МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОСИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

VII Международная научно-практическая конференция

«ИННОВАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГОРНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ: IPDME-2020»

23-24 апреля 2020 г.

сборник тезисов

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 620; 621; 622; 656; 681
ББК 39:34-08:3,2

В сборнике представлены в авторской редации статьи и тезисы докладов участников VII Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020», сосоявшейся 23-24 апреля 2020 г. в Санкт-Петербургском горном университете, г. Санкт-Петербург, Россия.

В сборник включены материалы секций: «Автоматизация производства и технология машиностроения», «Материаловедение и технология обработки материалов», «Горные машины, технологии переработки и транспортирования», «Электро-теплоэнергетика и электроника минерально-сырьевого комплекса», «Приборы и методы контроля, метрологическое обеспечение, оценка качества», «Транспорт и логистика в минерально-сырьевом комплексе».

ISBN 978-5-94211-912-6
© Санкт-Петербургский горный университет

СЕКЦИЯ 1.
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.928.23

АЛЕКСЕЕВА Л.Б.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГОЙ СРЕДЫ ЗОНЫ ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОВОДА

Аннотация. Исследование технологического процесса как объекта управления реализуется с помощью математических моделей, построенных на основе общих уравнений механики сплошных сред. Предложены модели зоны формирования стекломассы в процессе вытяжки стеклоизделий.

Ключевые слова: движение; стекломасса; упруговязкая среда; зона формирования; вытяжка световодов

ALEKSEEVA L.B.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of mechanical engineering

EQUATIONS OF MOTION OF A VISCOELASTIC MEDIA FORMATION ZONES

Abstract. The study of the technological process as a control object is implemented using mathematical models built on the basis of general equations of continuum mechanics. Models of the zone of formation of glass mass in the process of drawing glass products are proposed.

Keywords: movement; glass melt; visco-elastic medium; formation zone; drawing out optical fibers.

На качество световода влияет множество факторов, в том числе выбор метода изготовления и выбор основных технологических параметров (скорости вытягивания, вязкости разогретой стекломассы). Управляемость процесса вытяжки определяется физическим состоянием стекломассы, также кинематическими и динамическими параметрами устройств вытяжки: равномерностью скоростей подачи и вытяжки, уровнем виброактивности подвижных частей технологического оборудования, инерционностью переходных процессов, необходимостью корректировки параметров процесса. Одним из основных механических узлов установки вытяжки световодов является механизм вытяжки. В большинстве схем управления механизм вытяжки является регулирующим органом. В задачах управления непрерывными технологическими процессами используют системы виртуального мониторинга (СВМ). Основа СВМ – виртуальный анализатор (ВА), основная задача которого идентифицировать скрытую динамику протекающих процессов.

Физическое состояние стекломассы в зоне формирования определяет условия стабильного протекания процесса вытяжки и величины «откликов» на различные возмущающие и управляющие воздействия. Поэтому математическое описание процесса деформации стекломассы является важным [1].

Процесс образования геометрии световода происходит в зоне формирования, которая представляет собой переход от разогретой стекломассы к световоду. Зона формирования может быть представлена в виде ньютоновской вязкой жидкости. В ряде случаев более точной может быть модель упруговязкого тела (модель Максвелла). В модели Максвелла заложена способность среды к релаксации – возвращению к равновесному состоянию [2-4].

Для случая одномерного течения можно записать:

$$\lambda \dot{p}_z + p_z = \mu \frac{\partial \upsilon_z}{\partial z},$$

где $\lambda = \mu / G$ – время релаксации; $\dot{p}_z = d\, p_z / d\, t$; G – модуль сдвига.

Полагая, что скорость, вязкость, напряжения в зоне формирования являются функциями времени и осевой координаты, то модель одномерного потока, включает три группы уравнений: уравнения, определяющие физическое состояние среды, уравнения равновесия сил, уравнения неразрывности.

Уравнение неразрывности запишем в виде:

$$\frac{d}{d\, t}\left(S \cdot \delta z\right) = 0,$$

где S – площадь текущего сечения зоны формирования (потока), δz – элементарный отрезок параллельный оси z.

С учетом скорости линейного расширения при $\upsilon = \upsilon_z$ можно записать:

$$\frac{d}{d\, t}\left(\delta z\right) = \frac{\partial \upsilon}{\partial z}\, \delta z.$$

Тогда уравнение неразрывности приведем к виду:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \upsilon \frac{\partial S}{\partial z} + S \frac{\partial \upsilon}{\partial z} = 0$$

или

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial \left(S \upsilon\right)}{\partial z} = 0.$$

Уравнение равновесия сил, используя теорему об изменении количества движения K выделенного объема $S \cdot \delta z$, можно записать в виде:

$$\frac{d\, K}{d\, t} = \rho \frac{d\left(\upsilon \cdot S\, \delta z\right)}{d\, t} = \rho \left(\frac{d\left(\upsilon S\right)}{d\, t}\, \delta z + \upsilon S \frac{d}{d\, t}\left(\delta z\right) \right).$$

Объемными силами являются силы тяжести $\rho S g \delta z$.

Поверхностные силы равны $\frac{\partial \left(p S\right)}{\partial z}\, \delta z$, где $p = p_z$ – давление на площадке S с координатой z.

Тогда уравнение равновесия сил можно представить в виде:

$$\rho \left(\frac{\partial \left(\upsilon S\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\upsilon^2 S\right)}{\partial z} \right) = \rho S g + \frac{\partial \left(p S\right)}{\partial z}.$$

Итак, для одномерной модели имеем систему из трех уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial (\upsilon S)}{\partial z} = 0; \\ &\rho \left[\frac{\partial (\upsilon S)}{\partial t} + \frac{\partial (\upsilon^2 S)}{\partial z} \right] = \rho S g + \frac{\partial (p S)}{\partial z}; \\ &p + \lambda \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \upsilon \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 3 \mu \frac{\partial \upsilon}{\partial z}. \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Система уравнений с граничными условиями $z = 0$: $\upsilon = \upsilon_{\text{п}}$; $z = L$: $\upsilon = \upsilon_{\text{в}}$. описывает движение вязкоупругой среды с подвижной нижней границей. Использование разностных методов дает надежный результат только в случае фиксированных границ. Для преобразования переход может быть осуществлен с

метода необходимо создавать особые условия для прохождения вязкой

стекломассы через фильеры.

Для получения более точной геометрии световодов необходимо, чтобы стекломасса в зоне формирования обладала свойствами вязкоупругого тела. Такого состояния она может достичь при снижении температуры в зоне формирования. Это предопределяет выбор метод изготовления световодов – из заготовки. При использовании фильерного метода необходимо создавать особые условия для прохождения вязкой стекломассы через фильеры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Победря Б.Е.* Основы механики сплошной среды / Б.Е. Победря, Д.В. Георгиевский // Курс лекций. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 272 с.
2. *Алексеева Л.Б.* Исследование устойчивости автоматизированной системы управления процессом вытяжки оптических стержней / Л.Б. Алексеева, В.В. Максаров // М.: Известия вузов. Машиностроение. - 2008. - №8. - С. 19-24.
3. *Алексеева Л.Б.* Математические модели технологических систем, содержащих упруго-вязкую среду / Л.Б. Алексеева, В.А. Ильичев, В.П. Уваров // Тезисы доклада международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления». Москва. Институт проблем управления им. Трапезникова В.А. РАН. 27-29 октября 2008.
4. *Maksarov V.V.* Evaluation of effect of oil film of rotor bearing / V.V. Maksarov, L.B. Alekseeva // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 022003.

УДК 621.941.1

ВАЖЕНИН А.Ю.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Аннотация. Статья освещает вопрос обеспечения качества в процессе изготовления сферических поверхностей деталей из титановых сплавов. Предлагается способ обработки, основанный на совместном применении локального пластического деформирования заготовки с последующей лезвийной обработкой на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: предварительное локальное пластическое деформирование, титан, качество поверхности, сферическая поверхность.

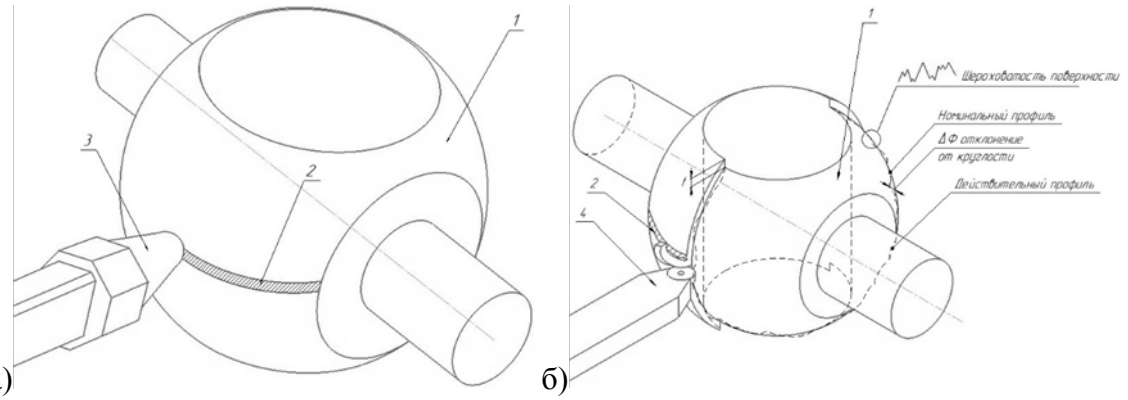
VAZHENIN A.Y.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of Mechanical engineering

IMPROVING THE QUALITY OF MANUFACTURING SPHERICAL SURFACES OF PARTS MADE OF TITANIUM ALLOYS ON CNC MACHINES

Abstract. The article highlights the issue of quality assurance in the manufacturing process of spherical surfaces of parts made of titanium alloys. A processing method is proposed based on the combined use of local plastic deformation of the workpiece followed by blade processing on CNC machines.

Keywords: preliminary local plastic deformation, titanium, surface quality, spherical surface.

Одним из наиболее перспективных методов повышения обрабатываемости титановых сплавов является пластическое деформирование [2, 3, 6, 7, 8]. В настоящей статье рассматривается способ изготовления и обеспечения заданного качества поверхности, включающий в себя помимо типовых технологических операций точения операцию пластического деформирования (рис. 1, а) и измененную операцию чистового точения (рис. 1, б):



а) б)

Рисунок 1 – Обработка заготовки:
а) Первый этап обработки; б) Второй этап обработки;
1 – заготовка; 2 – линия локального пластического воздействия; 3 – устройство для создания пластического воздействия; 4 – режущий инструмент

Первый этап включает в себя предварительную подготовку обрабатываемой поверхности посредством локального пластического деформирования, суть которого заключается в том, что специальным роликом высокой твердости в поверхностном слое заготовки перед чистовой операцией точения создается неоднородная структура, при пересечении которой плоскостью резания возникают вынужденные колебания, которые могут способствовать снижению автоколебаний технологической системы. В процессе давления роликом на обрабатываемую сферическую поверхность детали происходит ее пластическое деформирование в зоне контакта, при этом необходимо подобрать такое усилие, при котором глубина деформированного слоя будет ниже глубины последующей лезвийной обработки, чтобы обеспечить необходимые параметры качества и не снизить стойкость инструмента.

На втором этапе, т.е.на операции чистового точения в переменных условиях резания в целях снижения амплитуды колебаний инструментальной системы, и как следствие, повышения качества поверхностного слоя детали эффективным является регулировка скорости резания, описанная в работе [1], или же обеспечение ее постоянства на всех участках обрабатываемой сферы. реализуемая на основе разделения обрабатываемой поверхности на n-число секторов, для каждого из которых в управляющей программе станка задаются определенные режимы резания в зависимости от амплитуды колебаний режущего инструмента.

Также целесообразно использовать круглую геометрию режущего инструмента, что позволит обеспечить в процессе обработки постоянство главного и вспомогательного углов в плане, ширину срезаемого слоя, а также позволит осуществить обработку, не меняя инструмент, и не переустанавливая заготовку на станке.

Проведенные в работах [4-15] исследования подтверждают эффективность методов снижения вибраций технологической системы механической обработки в вопросах обеспечения качества обрабатываемых поверхностей. Способ локального пластического деформирования улучшает качество обработанной поверхности, снижает ее шероховатость, а также улучшает эксплуатационные свойства деталей из титановых сплавов, снижает нагрузку на режущий инструмент, повышая его стойкость. Предлагаемые способы токарной обработки отслеживают динамические параметры инструментальной системы, обеспечивают высокое качество поверхностного слоя, а также позволяют осуществить изготовление сферической поверхности без переустановки детали на станке, что существенно экономит время на изготовление детали, повышая производительность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афонина Н.А.* Повышение виброустойчивости процесса токарной обработки на основе управляемых колебаний скорости резания. Специальность: 05.03.01 – Технологии и оборудование механической и физико технической обработки. Диссертация на соиск… к.т.н. - Тула, 2004. – 182 с.

2. *Важенин А.Ю.* Обеспечение точности и качества изготовления сферических поверхностей деталей судовой арматуры / Научный центр «Орка». Вестник современных исследований. - 2017. - № 11-1(14). - С. 180–182.

3. *Кошелева Е.В.* Технология изготовления прецизионных поверхностей деталей из титановых сплавов с применением метода локального пластического деформирования / Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018»: СПб. сборник тезисов, 2018. - С. 30.

4. *Красный В.А.* Оценка влияния шероховатости поверхности на повышение прочности сцепления износостойкого напыляемого покрытия / В.А. Красный, В.В. Максаров // Металлообработка. - 2014. - №5. - С. 47–51.

5. *Максаров В.В.* Влияние структурных параметров режущей керамики на работоспособность инструмента при обработке прецизионных поверхностей деталей горных машин / В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - Т. 8(1). - С 56-64.
6. *Максаров В.В.* Повышение качества изготовления деталей из титановых сплавов методом локального пластического деформирования / В.В. Максаров, Е.В. Кошелева, А.Ю. Важенин // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. - 2017. - №1(20)209. -С. 278–281.
7. *Максаров В.В.* Повышение точности и качества изготовления деталей из титана и титановых сплавов на основе предварительного локального пластического деформирования / В.В. Максаров, Е.В. Кошелева // Качество и жизнь. - 2016. - №3(11). - С. 66–69.
8. *Максаров В.В.* Технологическое обеспечение качества прецизионных поверхностей деталей типа «тел вращения» из титановых сплавов / В.В. Максаров, Е.В. Кошелева, А.Ю. Важенин // Металлообработка. - 2018. - №4(106). - С. 52–60.
9. *Попок Н.Н.* Способы обработки сферических поверхностей деталей и технологическое оснащение для их реализации / Н. Н. Попок [и др.] // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. в 3-х т. – Новополоцк: ПГУ, 2009. - Т. 2. - С. 315–319.
10. *Попок Н.Н.* Способы обработки сферических поверхностей деталей и технологическое оснащение для их реализации / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, Г.И. Гвоздь // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : материалы VII Междунар. Науч.-техн. конференци : в 3 т. – Новополоцк: ПГУ, 2009. - Т.2. - С. 315-319.
11. *Постнов В.В.* Методологические аспекты комплексного диагностирования процесса резания при токарной обработке жаропрочных сплавов / В.В. Постнов, Б.Ф. Усманов, А.Ю. Федоровцев // Вестник УГАТУ. - Т.16. №8(53). - С. 129–133.
12. *Тимофеев Д.Ю.* Повышение точности изготовления прецизионных поверхностей детали шток гидроцилиндров / Д.Ю. Тимофеев, А.Е. Ефимов // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов IV международной научно-практической конференции, 2016. - С. 142–145.
13. *Maksarov V.V., Krasnyy V.A., Viushin R.V.* 2018 Simulation of dynamic processes when machining transition surfaces of stepped shafts *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 327 022047.
14. *Maksarov V.V., Olt J.* 2012 Theory and practice of management and modeling in the field of forecasting the dynamic properties of the technological systems *Metal.* 2. 7–13.
15. *Maksarov V.V., Olt J., Madissoo M.* Dynamic Stabilization of Technological Systems for Processing Edge Cutting Through Local Metstability *USB Proceedings. IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, 25th-27th May 2012 Tampere Hall Tampere, Finland*.

УДК 621.91: 531.36

ВАСИЛЬКОВ Д.В.,
АЛЕКСАНДРОВ А.С.,
ГОЛИКОВА В.В.,
КОЧИНА Т.Б.
Балтийский государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТРИЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОГО ТИПА

Аннотация. Выполнено исследование динамики контактных взаимодействий при обработке резанием на основе системы нелинейных дифференциальных уравнений кусочно-линейного типа. Анализ процессов, происходящих при контактном взаимодействии режущего инструмента и заготовки позволил представить этот процесс как двухфазный: с фазами схватывания и скольжения. Полученные результаты моделирования позволяют оценивать уровень амплитуд колебаний и определять регламентированные параметры точности обработки и шероховатости поверхности изготавливаемых изделий.

Ключевые слова: динамика, контактное взаимодействие, механическая обработка, скольжение, схватывание, система нелинейных дифференциальных уравнений кусочно-линейного типа.

VASILKOV D.V.,
ALEXANDROV A.S.,
GOLIKOVA V.V.,
KOCHINA T.B.
Baltic State Technical University
“VOENMEH” named after D.F. Ustinov

INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF CONTACT INTERACTIONS IN MECHANICAL PROCESSING BASED ON A SYSTEM OF NONLINEAR PIECEWISE LINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS

Abstract. A study of the dynamics of contact interactions in cutting processing is performed based on a system of nonlinear piecewise linear differential equations. Analysis of the processes occurring during the contact interaction of the cutting tool and the workpiece allowed us to present this process as a two-phase: with the phases of setting and sliding. The obtained simulation results allow us to evaluate the level of vibration amplitudes and determine the regulated parameters of processing accuracy and surface roughness of manufactured products.

Keywords: dynamics, contact interaction, mechanical processing, sliding, setting, system of nonlinear differential equations of piecewise linear type.

Исследование динамики контактных взаимодействий при обработке резанием получило широкое распространение в отечественных и зарубежных разработках [1-9]. Анализ процессов, происходящих при контактном взаимодействии режущего инструмента и заготовки позволил представить этот процесс как двухфазный: с фазами схватывания и скольжения [10-12].

Молекулярно-механические процессы, протекающие при взаимодействии режущего инструмента и заготовки, в пространстве переменных состояния могут быть описаны на базе системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{u} = Du + S(u), \tag{1}$$

где u - вектор переменных состояния; D - матрица преобразования с постоянными элементами; $S(u)$ - вектор-функция с кусочно-линейными компонентами.

Модельные решения применительно к системе дифференциальных уравнений (1) подробно рассмотрены в работах [10,12]. Ее особенностью является то, что вектор-функция $S(u)$ является кусочно-линейной функцией. Переходы между фазами скольжения и схватывания отслеживаются функцией переключения $Sg1$, которая может быть записана в виде соотношения [10].

$$Sg1 = \begin{cases} 1, - \textit{фаза схватывания}; \\ 0 - \textit{фаза скольжения}. \end{cases} \tag{2}$$

Рассматриваемая динамическая система (1) в пространстве переменных состояния является нелинейной кусочно-линейного типа. Ее решение представлено выражениями подробно описанными в [10-12]. На основе данной динамической системы можно исследовать частотный состав и уровень амплитуд колебаний при широком варьировании параметров модели.

Для оценки характера движений сформулируем условия вычислительного эксперимента.

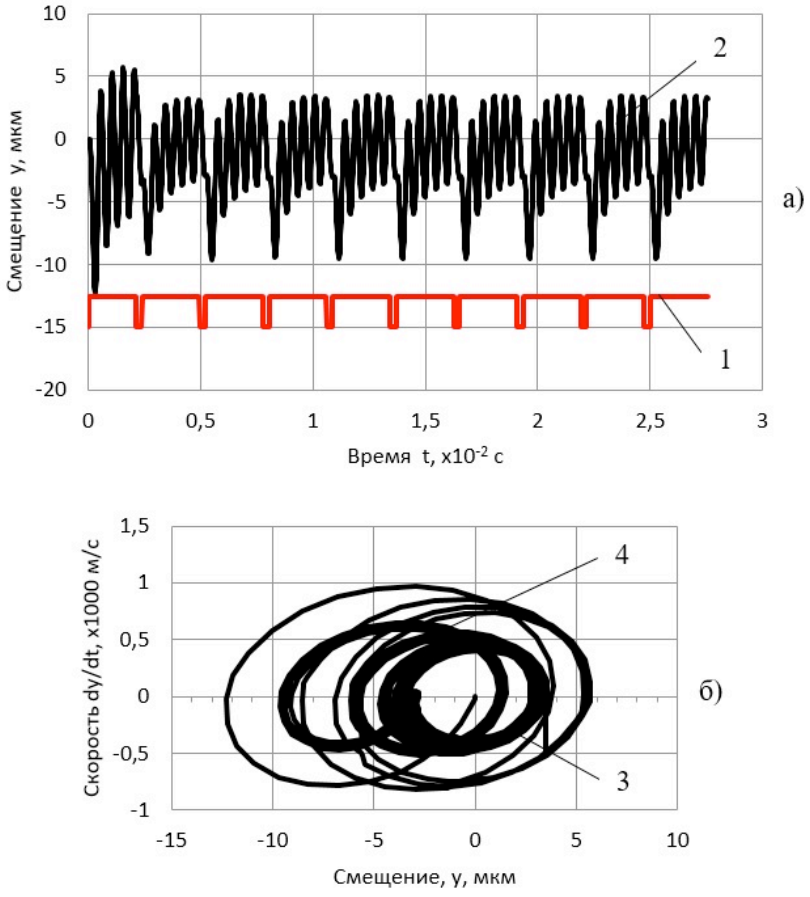


Рисунок 1 – Расчетные виброперемещения по нормали к формообразующей точке инструмента при V = 40 м/мин:
а – график смещений в направлении y, мкм; временная диаграмма функции переключений динамических режимов; б – фазовый портрет динамической системы

Параметры заготовки: диаметр d = 90 мм, вылет 135 мм, материал ХН65ВМТЮ. Параметры инструмента: задний угол α = 8°; передний угол γ = - 8°; главный угол в плане φ = 70°; вспомогательный угол в плане φ_1 = 20°, материал режущей части инструмента: при V = 30-70 м/мин - GC4235 «Sandvik» (Швеция); при V = 80-200 м/мин - M101S «Tungaloy» (Япония); сечение державки 40×20 мм; вылет державки 95 мм. Режимы резания: подача S = 0,19 мм/об, глубина резания t = 1,0 мм; скорость резания V = 30…220 м/мин. Обработка без охлаждения.

Во всех рассмотренных случаях движение в модели начинается с фазы схватывания. Об этом свидетельствует график функции переключения (временная диаграмма 1 на рис.1,а). Относительное смещение по нормали к формообразующей точке инструмента в направлении y (кривая 2 на рис.1,а) получено в результате расчета по модели (1).

По нему четко просматривается периодическое решение, которое формируется в результате переключения фаз скольжения и схватывания. На графиках переход из фазы схватывания в фазу скольжения сопровождается всплеском смещения y (кривая 2 на рис.1,а). При этом на фазовом портрете наблюдается выход фазовой траектории на предельный цикл с амплитудой 2–5 мкм (кривая 3 на рис.1,б). В момент перехода из фазы схватывания в фазу скольжения наблюдается характерное отклонение фазовой траектории от предельного цикла с амплитудой 3-12 мкм (кривая 4 на рис.1,б) с последующим возвратом на предельный цикл. Такое характерное проявление динамической системы наблюдается в диапазоне скоростей резания V = 30…50 м/мин (пункты 1-3 в табл. 1) и в диапазоне скоростей резания V = 70…200 м/мин (пункты 5-12 в табл. 1). В указанных режимах продолжительность фазы схватывания в среднем составляла 10^{-4}с, а фазы скольжения – на порядок больше.

На скорости резания V = 60 м/мин наблюдается резкое увеличение уровня вибраций с переходом на второй предельный цикл с амплитудой 30 мкм (пункт 5 в табл. 1). Данный режим является во всех случаях недопустимым и исключается из числа возможных для реализации.

Сопоставление количественных результатов расчета с позиции технической устойчивости представлено в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные данные по устойчивости динамической системы

№пп	Скорость резания, м/мин	Техническая устойчивость	max амплитуда колебаний, мкм	Инструментальный материал (+/-)	
				Твердый сплав	Минералокерамика
1	30	УПЦ, a = 3 мкм	12	+	-
2	40	УПЦ, a = 4 мкм	9	+	-
3	50	УПЦ, a = 5 мкм	10	+	-
4	60	НУПЦ, a = 30 мкм	30	+	-
5	70	УПЦ, a = 6 мкм	12	+	-
6	80	УПЦ, a = 4 мкм	9	-	+
7	120	УПЦ, a = 3,5 мкм	8	-	+
8	140	УПЦ, a = 3 мкм	8	-	+
9	160	УПЦ, a = 3 мкм	7	-	+
10	180	УПЦ, a = 2 мкм	3	-	+
11	190	УПЦ, a = 2 мкм	3	-	+
12	200	УПЦ, a = 2 мкм	3	-	+

УПЦ – устойчивый предельный цикл; НУПЦ – неустойчивый предельный цикл; а – амплитуда предельного цикла.

В соответствии с табл. 1 область допустимых режимов определена для инструментов из твердого сплавов и из минералокерамики. Причем, минералокерамика наиболее эффективна при температуре в зоне резания, когда происходит падение пределов

прочности и текучести для данного обрабатываемого материала. Об этом свидетельствует уменьшение уровня амплитуд колебаний менее 5 мкм.

В системе дифференциальных уравнений (1) заложен основной механизм адгезионно-деформационного взаимодействия в контактном соединении инструмент – заготовка в зоне резания, формируемый последовательностью фаз скольжения – схватывания. При этом функция переключения фаз формируется синергетически самой системой в соответствии с выражением (2).

Помимо данного механизма самонастройки динамической системы может быть рассмотрен и динамически отмоделирован механизм формирования элементов стружки, заложенный интегрально в выражениях (1). В соответствии с принятым исходным предположением данный механизм является малозначимым по уровню воздействия в сравнении с механизмом адгезионно-деформационного взаимодействия. Предполагалось, что усложнение модели путем учета данного механизма приведет к необоснованному усложнению результатов вычислений.

Опуская математические выкладки, приведем результаты моделирования динамической системы кусочно-линейного типа, в которой учитывается только переключение, отображающее формирование элементов стружки. На рис. 2 представлен результат моделирования, учитывающий только формирование элементов стружки при $V = 200$ м/мин. График построен при высоком увеличении. При этом функция переключения отображает формирование элементов стружки. Данный результат имеет важный теоретический смысл, так как позволяет в модельном решении выявить частоту формирования элементов стружки и определить условия элементного и адиабатического стружкообразования.

На графике четко просматриваются малые отклонения (рис. 2), связанные с формированием элементов стружки. Они обозначают формирование элементов стружки, но не оказывают серьезного влияния на характер динамических процессов. Указанное подтверждается также тем, что частота формирования элементов стружки составляет 11,4 кГц.

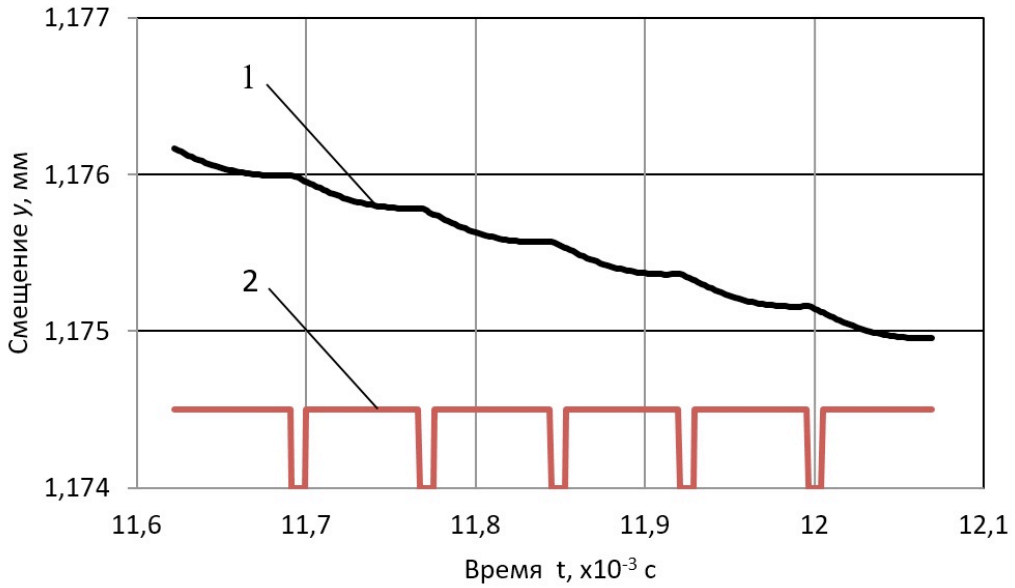


Рисунок 2 – Расчетные виброперемещения по нормали к формообразующей точке инструмента при высоком разрешении ($V = 200$ м/мин):
1 - график смещений в направлении y, мкм; 2 - временная диаграмма функции переключений динамических режимов

Полученные результаты позволяют исследовать динамику контактных взаимодействий при обработке резанием в рамках нелинейных динамических моделей.

Это дает возможность оценивать уровень амплитуд колебаний и определять регламентированные параметры точности обработки и шероховатости поверхности изготавливаемых изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кудинов В.А.* Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. - 359 с.
2. *Эльясберг М.Е.* Автоколебания металлорежущих станков: Теория и практика / М.Е. Эльянсберг. - СПб.: ОКБС, 1993. - 182 с.
3. *Васильков Д.В., Вейц В.Л., Шевченко В.С.* Динамика технологической системы механической обработки.- СПб.: Инструмент, 1997. - 230 с.
4. *Maksarov V.* 2015 Improving the accuracy of manufacturing of hydraulic power cylinders using vibration-proof cutting tool. *Agronomy Research* 13(3) 671-679.
5. *Olt J., Liivapuu O., Maksarov V., Liyvapuu A., Tärgla T.* 2016 Mathematical modelling of cutting process system *Springer Proceedings in Mathematics and Statistic* 178 173-186.
6. *Maksarov V.V., Efimov A.E.* 2018 Simulation modeling of dynamic characteristics of machining in NI LabView software environment to improve processing technique of a rod component *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 194(2) 022021.
7. *Olt J., Liyvapuu A., Madissoo M., Maksarov V.* 2016 Dynamic simulation of chip formation in the process of cutting *International Journal of Materials and Product Technology* 53(1) 1-14.
8. *Maksarov V.V., Khalimonenko A.D., Matrenichev K.G.* 2017 Stability analysis of multipoint tool equipped with metal cutting ceramics *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 87(8) 082030.
9. *Olt J., Maksarov V.V.* 2015 Cutting process simulation on the basis of rheological properties of metals. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 2015-January*, 229-237.
10. *Васильков Д.В., Кочина Т.Б.* Моделирование контактных взаимодействий с учетом реологии в зоне резания при высокоскоростной обработке изделий из жаропрочных сплавов // Металлообработка. - 2013. - №4(76). - С. 2-10.
11. *Васильков Д.В., Кочина Т.Б.* Динамические особенности формирования условий контактного взаимодействия в зоне резания на основе кусочно-линейной аппроксимации // Металлообработка. - 2013. - №5-6(77-78). - С. 2-3.
12. *Nikitin A.V., Tarikov I.Ya., Vasilkov D.V.* 2019 Determination of technological residual stresses in the surface layer of parts with thin-walled elements during turning *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems* 11(08) 2926-2932.

УДК 621.91: 531.36

ВАСИЛЬКОВ Д.В.,
ЧЕРДАКОВА В.С.
Балтийский государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИИ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ТОЧЕНИЕМ

Аннотация. В данной статье рассматривается подход кусочно-линейной аппроксимация контактного взаимодействия в технологической системы механической обработки в процессе резания. Он состоит в рассмотрении контактного взаимодействия при резании совокупностью реологических моделей, что позволяет в значительной степени определить условия формирования автоколебаний.

Ключевые слова: реологические модели, вязкость, упругость, скольжение, схватывание.

VASILKOV D.V.,
CHERDAKOVA V.S.
Baltic State Technical University
“VOENMEH” named after D.F. Ustinov

SIMULATION OF CONTACT INTERACTIONS TAKING INTO ACCOUNT RHEOLOGY IN THE CUTTING AREA WHEN PROCESSING PRODUCTS

Abstract. This article discusses the piecewise-linear approximation of contact interaction in a technological system of machining during cutting. It consists in the consideration of contact interaction during cutting by a set of rheological models, which allows to largely determine the conditions for the formation of self-oscillations.

Keywords: rheological models, viscosity, elasticity, slip, setting.

При механической обработке существуют проблемы обеспечения качества обрабатываемых изделий (размерной точности, микро- и макрогеометрии, технологических остаточных напряжений). Они могут быть эффективно решены на основе исследования динамических свойств технологической системы механической обработки (ТСМО), в частности, особенностей контактного взаимодействия в зоне стружкообразования [1-6].

Анализ процессов, происходящих при контактном взаимодействии стружки с передней поверхностью инструмента и обработанной поверхности с задней поверхностью инструмента, позволил представить этот процесс как двухфазный: с фазами схватывания и скольжения [7-9].

Молекулярные процессы, происходящие в зоне стружкообразования, представлены в виде реологических моделей, связывающих подсистемы заготовки и режущего инструмента [8-10]. В модельном представлении рассматриваемые процессы отображаются упруго-вязкой средой Фойхта, идеально упругой средой Гука, идеально вязкой средой Ньютона и идеально пластической средой Сен-Венана (ключ в форме триггера) (рис. 1, 2), модифицированными применительно к рассматриваемой задаче. Моделируются условия взаимодействия упруго-диссипативных и инерционных характеристик технологической системы и вязко-упруго-пластических характеристик в зоне стружкообразования.

Условия переключения фаз скольжения и схватывания при взаимодействии передней и задней поверхностей инструмента соответственно со сходящей стружкой и обработанной поверхностью формируются самой системой, которая является потенциально автоколебательной.

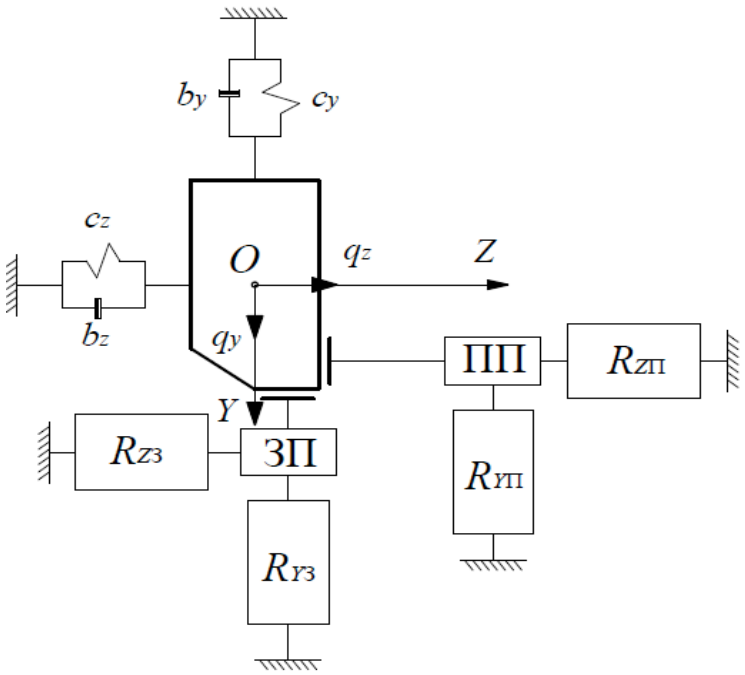


Рисунок 1 – Реологическое представление силовых взаимодействий в зоне резания

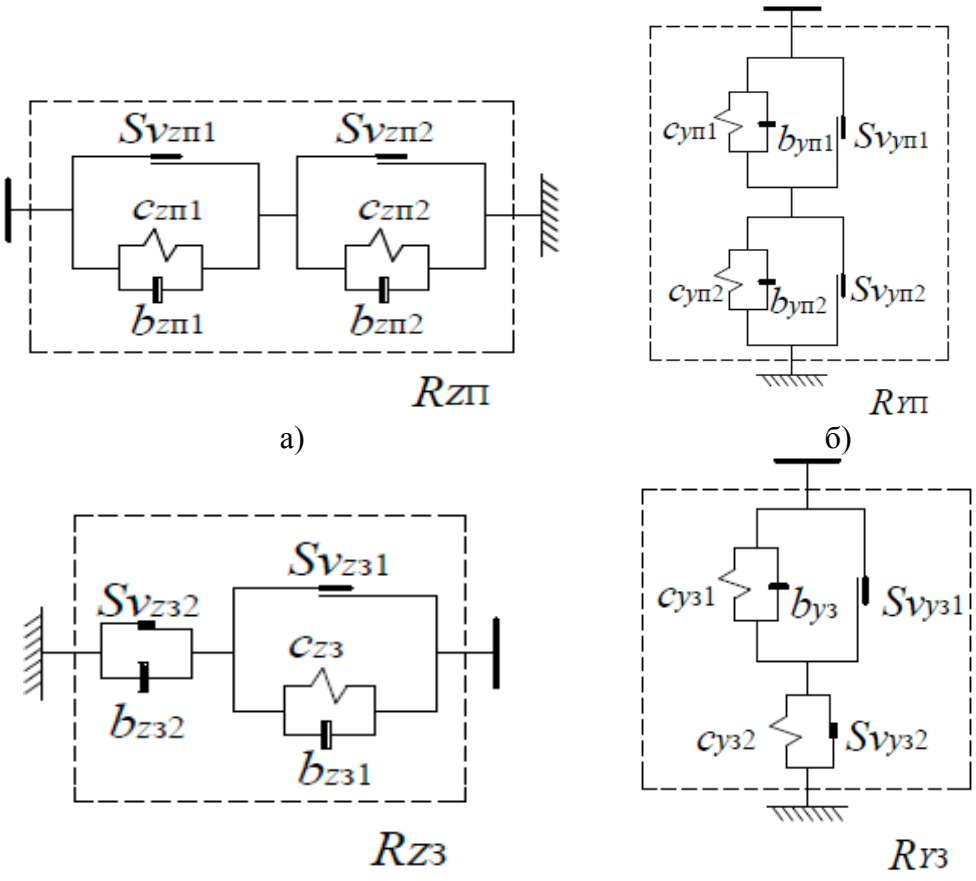


Рисунок 2 – Группы реологических элементов силовых взаимодействий в зоне резания

На рис. 1 обозначено: $R_{Z\text{П}}$, $R_{Y\text{П}}$ - группа реологических элементов по передней поверхности в направлении осей *OZ*, *OY*; $R_{Z\text{З}}$, $R_{Y\text{З}}$ - группа реологических элементов по задней поверхности в направлении осей *OZ*, *OY*; z, y – обобщенные координаты в направлении осей *OZ*, *OY*, c_z, c_y – коэффициенты жесткости, b_z , b_y – коэффициенты диссипации.

На рис. 2 обозначено: $c_{z\text{п}1}$, $c_{z\text{п}2}$, $c_{y\text{п}1}$, $c_{y\text{п}2}$, $b_{z\text{п}1}$, $b_{z\text{п}2}$, $b_{y\text{п}1}$, $b_{y\text{п}2}$ – коэффициенты упругости и диссипации реологических элементов по передней поверхности инструмента в направлении осей *OZ*, *OY*; $c_{z\text{з}1}$, $c_{z\text{з}2}$, $c_{y\text{з}1}$, $c_{y\text{з}2}$, $b_{z\text{з}1}$, $b_{z\text{з}2}$, $b_{y\text{з}1}$, $b_{y\text{з}2}$ – коэффициенты упругости и диссипации реологических элементов по передней поверхности инструмента в направлении осей *OZ*, *OY*; $Sv_{z\text{з}1}$ и $Sv_{z\text{з}2}$ – трибоэлементы Сен-Венана в касательном контуре по задней поверхности инструмента, $Sv_{y\text{з}1}$ и $Sv_{y\text{з}2}$ - трибоэлементы Сен-Венана в нормальном контуре по задней поверхности инструмента; $Sv_{z\text{п}1}$ и $Sv_{z\text{п}2}$ - трибоэлементы Сен-Венана в касательном контуре по передней поверхности инструмента, $Sv_{y\text{п}1}$ и $Sv_{y\text{п}2}$ - трибоэлементы Сен-Венана в нормальном контуре по передней поверхности.

Со стороны задней поверхности инструмента происходит вязкоупругое взаимодействие с обработанной поверхностью. Реология приповерхностной зоны материала изделия моделируется элементами $R_{Y\text{З}}$ и $R_{Z\text{З}}$ (рис. 1) [11]. Со стороны передней поверхности инструмента происходит вязкоупруго-упругое взаимодействие в области стружкообразования и моделируется элементами $R_{Y\text{П}}$ и $R_{Z\text{П}}$ (рис. 1). Детально реологические модели силовых взаимодействий в зоне резания на передней и задней поверхностях инструмента представлены на рис. 2.

Основной идеей, заложенной в рассматриваемом подходе, является кусочно-линейная аппроксимация контактного взаимодействия в ТСМО непосредственно в процессе резания. Она состоит в рассмотрении контактного взаимодействия при резании в виде последовательности состояний, каждое из которых может быть представлено своей совокупностью реологических моделей. При этом самой динамической системой формируются параметры функции переключения, которые определяют условия перехода из одной фазы в другую. Система дифференциальных уравнений движения применительно к рассматриваемой реологической модели (рис. 1, 2) имеет следующий вид:

$$m\ddot{z} + b_z\dot{z} + c_z z = R_{z\text{п}}^{(\text{мол})} + R_{z\text{п}}^{(\text{мех})} + R_{z\text{з}}^{(\text{мол})} + R_{z\text{з}}^{(\text{мех})}; \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + b_y\dot{y} + c_y y = R_{y\text{п}}^{(\text{мол})} + R_{y\text{п}}^{(\text{мех})} + R_{y\text{з}}^{(\text{мол})} + R_{y\text{з}}^{(\text{мех})}; \quad (2)$$

$$T_{z\text{п}}^{(\text{мол})}\dot{R}_{z\text{п}}^{(\text{мол})} + R_{z\text{п}}^{(\text{мол})} = -(b_{z\text{п}1}\dot{z} + c_{z\text{п}1}z)Sv_{z\text{п}1}; \quad (3)$$

$$T_{y\text{п}}^{(\text{мол})}\dot{R}_{y\text{п}}^{(\text{мол})} + R_{y\text{п}}^{(\text{мол})} = -(b_{y\text{п}1}\dot{y} + c_{y\text{п}1}y)Sv_{y\text{п}1}; \quad (4)$$

$$T_{z\text{п}}^{(\text{мех})}\dot{R}_{z\text{п}}^{(\text{мех})} + R_{z\text{п}}^{(\text{мех})} = -(b_{z\text{п}2}\dot{z} + c_{z\text{п}2}z)Sv_{z\text{п}2}; \quad (5)$$

$$T_{y\text{п}}^{(\text{мех})}\dot{R}_{y\text{п}}^{(\text{мех})} + R_{y\text{п}}^{(\text{мех})} = -(b_{y\text{п}2}\dot{y} + c_{y\text{п}2}y)Sv_{y\text{п}2}; \quad (6)$$

$$T_{z\text{з}}^{(мол)}\dot{R}_{z\text{з}}^{(мол)} + R_{z\text{з}}^{(мол)} = -(b_{z\text{з}1}\dot{z} + c_{z\text{з}}z)Sv_{z\text{з}1}; \quad (7)$$

$$T_{y\text{з}}^{(мол)}\dot{R}_{y\text{з}}^{(мол)} + R_{y\text{з}}^{(мол)} = -(b_{y\text{з}}\dot{y} + c_{y\text{з}1}y)Sv_{y\text{з}1}; \quad (8)$$

$$T_{z\text{з}}^{(мех)}\dot{R}_{z\text{з}}^{(мех)} + R_{z\text{з}}^{(мех)} = -\mu c_{y\text{з}2}\, y\, Sv_{z\text{з}2}; \quad (9)$$

$$T_{y\text{з}}^{(мех)}\dot{R}_{y\text{з}}^{(мех)} + R_{y\text{з}}^{(мех)} = -b_{z\text{з}2}\dot{z}\, Sv_{y\text{з}2}, \quad (10)$$

где $T_{z\text{п}}^{(\text{мол})}$, $T_{y\text{п}}^{(\text{мол})}$, $T_{z\text{п}}^{(\text{мех})}$, $T_{y\text{п}}^{(\text{мех})}$, $T_{z\text{з}}^{(\text{мол})}$, $T_{y\text{з}}^{(\text{мол})}$, $T_{y\text{з}}^{(\text{мех})}$, $T_{y\text{з}}^{(\text{мех})}$ - постоянные времени рабочих процессов в направлении осей *OY, OZ*;

$R_{z\text{п}}^{(\text{мол})}, R_{z\text{п}}^{(\text{мех})}, R_{z\text{з}}^{(\text{мол})}, R_{z\text{з}}^{(\text{мех})}, R_{y\text{п}}^{(\text{мол})}, R_{y\text{п}}^{(\text{мех})}, R_{y\text{з}}^{(\text{мол})}, R_{y\text{з}}^{(\text{мех})}$ - проекции силы резания в форме динамических характеристик со стороны передней и задней поверхностей инструмента в направлении осей *OY, OZ*.

При контактном взаимодействии переход из фазы схватывания в фазу скольжения

и обратно моделируется подвижными трибоэлементами Сен-Венана с характеристиками соответственно $Sv_{z\text{п}1}$, $Sv_{z\text{п}2}$, $Sv_{z\text{з}1}$, $Sv_{z\text{з}2}$ в касательном контуре и $Sv_{y\text{п}1}$, $Sv_{y\text{п}2}$, $Sv_{y\text{з}1}$, $Sv_{y\text{з}2}$ в нормальном контуре. Функция переключения между фазами скольжения и схватывания может быть записана в виде соотношения:

$$\begin{cases} при\ Sv_{z\text{п}1} = Sv_{y\text{п}1} = Sv_{z\text{з}1} = Sv_{y\text{з}1} = 0, Sv_{z\text{п}2} = Sv_{y\text{п}2} = Sv_{z\text{з}2} = Sv_{y\text{з}2} = 1 - \text{схватывание}; \\ при\ Sv_{z\text{п}1} = Sv_{y\text{п}1} = Sv_{z\text{з}1} = Sv_{y\text{з}1} = 1, Sv_{z\text{п}2} = Sv_{y\text{п}2} = Sv_{z\text{з}2} = Sv_{y\text{з}2} = 0 - \text{скольжение}. \end{cases} \quad (11)$$

Характеристики подвижных трибоэлементов $Sv_i = 1$ (соответственно для контуров z и y) указывают на то, что данный подвижный трибоэлемент замкнут и его реологический блок является абсолютно твердым телом. Это означает, что в контактном взаимодействии участвует только один реологический блок. Функция переключения (11) синхронно с системой дифференциальных уравнений (1)-(10) осуществляет последовательное переключение трибоэлементов в состояния схватывание – скольжение при отслеживании кинематических характеристик относительных колебаний в рассматриваемой динамической системе.

Принципиально адгезионный процесс, при котором происходит схватывание, имеет место при выполнении следующих условий:

$$\delta_{kz} > [\delta_{kz}], \quad (12)$$

где δ_{kz} - контактная нормальная деформация; $[\delta_{kz}]$ – величина контактной нормальной деформации, начиная с которой имеет место адгезионный процесс, и

$$V_z < \frac{l_c}{T_{y\text{п}}^{(\text{ммол})}} = [V_z], \quad (13)$$

где V_z - относительная касательная скорость в контактной паре; $[V_z]$ – величина относительной контактной касательной скорости, начиная с которой прекращаются адгезионные процессы; l_c – путь стружкообразования.

В данном модельном представлении процессы в зоне резания рассматриваются на основе реологического подхода, что позволяет отображать взаимодействие упруго-диссипативных и инерционных характеристик технологической системы в зоне резания в рамках общей динамической модели. Полученные дифференциальные уравнения существенно упрощают способ определения числа переключений между фазами скольжения и схватывания на периоде в области существования автоколебательных режимов. Этот метод позволяет в значительной степени определить условия формирования автоколебаний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vasilkov D.V., Nikitin A.V., Cherdakova V.S.* 2018 Stability of the dynamic system of the machine tool when machining with a blade tool *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 194(4) 042026.
2. *Olt J., Liivapuu O., Maksarov V., Liyvapuu A., Tärgla T.* 2016 Mathematical modelling of cutting process system *Springer Proceedings in Mathematics and Statistic* 178 173-186.
3. *Olt J., Liyvapuu A., Madissoo M., Maksarov V.* 2016 Dynamic simulation of chip formation in the process of cutting *International Journal of Materials and Product Technology* 53(1) 1-14.
4. *Maksarov V.V., Khalimonenko A.D., Matrenichev K.G.* 2017 Stability analysis of multipoint tool equipped with metal cutting ceramics *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 87(8) 082030.
5. *Maksarov V.* 2015 Improving the accuracy of manufacturing of hydraulic power cylinders using vibration-proof cutting tool *Agronomy Research* 13(3) 671-679.
6. *Olt J., Maksarov V.V.* 2015 Cutting process simulation on the basis of rheological properties of metals. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 2015-January*, 229-237.

7. *Васильков Д.В.* Моделирование процесса стружкообразования на основе кусочно-линейной аппроксимации / Д.В. Васильков, В.Л. Вейц, В.В. Максаров // Академический вестник. Информатизация. Вып. 1. - СПб.: Имаш., 1998. - С. 16-21.
8. *Васильков Д.В.* Моделирование контактных взаимодействий с учетом реологии в зоне резания при высокоскоростной обработке изделий из жаропрочных сплавов / Д.В. Васильков, Т.Б. Кочина // Металлообработка, №4(76). 2013. С. 2-10.
9. *Vasilkov D.V., Nikitin A.V., Tarikov I.Ya.* 2019 The Dynamics of Contact Interaction during the Cutting Process *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences* 4(5) 1218–1227.
10. *Васильков Д.В.* Формирование реологических свойств поверхностного слоя материалов / Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сборник. Вып. 3. – СПб.: СЗПИ, 1996. С. 94-99.
11. *Васильков Д.В.* Динамика контактных взаимодействий при обработке резанием / IV Международная научно-техническая конференция по динамике технологических систем. - Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2001. Т. 2. С.9-13.

УДК 533.9

ВЕСЕЛОВСКИЙ А.П.,
ГРАЧЕВ С.Ю.,
ЗВЕРЕВ С.Г.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

ПОДЖИГ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА В ВЧИ-ПЛАЗМОТРОНЕ

Аннотация. Материал статьи относится к области плазменной техники и касается конструкции устройства для зажигания высокочастотного плазменного разряда в индукционных плазмотронах различного давления плазмообразующих газов. Индукционный поджиг кольцевого разряда упрощает конструкцию зажигающего устройства, снижает вероятность коротких замыканий неизолированных элементов плазмотрона и зажигающих устройств.

Ключевые слова: Высокочастотный плазменный разряд, устройство зажигания, воздушный трансформатор.

VESELOVSKY A.P.,
GRACHEV S.Y.,
ZVEREV S.G.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

INDUCTION DISCHARGE IGNITION IN A HIGH FREQUENCY INDUCTION PLASMA TORCH

Abstract. The material of the article belongs to the field of plasma engineering and concerns the design of the device for ignition of high-frequency plasma discharge in induction plasma torches of different pressures of plasma-forming gases. Inductive ignition with a ring-shaped discharge simplifies the design of the ignition device and reduces the likelihood of short-circuits between uninsulated elements of the plasma torch and ignition device.

Keywords: High frequency plasma discharge, ignition device, air-core transformer.

Highfrequency induction (HFI) plasma torchesare devices that allow to obtain and hold stationary plasma with its temperature in the range of $(7...10)\cdot 10^3$ K.

The working principle of the HFI plasma torch is based on a high-frequency electrodeless discharge in the gas discharge chamber caused by the variable electromagnetic field of the inductor. Such discharge is an electrodeless ring-shaped current in ionized gas, where plasma is not contaminated with foreign impurities, as it has no constant contact with electrodes in the discharge zone.

High-frequency ignition of the plasma discharge can be used in induction plasma torches with plasma-forming gases at various pressures.

The induction discharge in the HFI plasma torch was used in previously published works [1–5] and is listed in patents [6-12]. For example, the patent [8] describes ignition where a high-voltage discharge is produced at the exit of the plasma-forming gas supply node with an igniter, in which the incendiary electrode makes reciprocating movement by means of a pneumatic cylinder. A disadvantage of this approach lies in the fact that the high-voltage discharge occurs between the igniting electrode and the wall of the discharge chamber. Such discharge can lead to the burn through the section of the discharge chamber and a failure of the plasma torch, which

often happens in practice. One of the simple and feasible approaches to igniting a plasma discharge is to ignite a discharge between the terminals of the secondary winding of an air-core transformer, where the discharge chamber of the plasma torch is not involved in the formation of an electron-ion conducting medium. Here, the primary winding of the air-core transformer is the plasma torch inductor.

The discharge chamber of the plasma torch with protective segmented metallic wall inserts that are water-cooled is a cylinder made of profiled copper sections with longitudinal slits between them. It is placed within the plasma confinement tube made of quartz.

The feature of the device is that to ignite the ring-shaped high-frequency discharge in the discharge chamber of the plasma torch, a short-term arc discharge is made in the secondary winding of the air-core transformer, located in the insulating frame with windows. For short-circuiting the secondary winding of the air-core transformer, a movable contact is used.

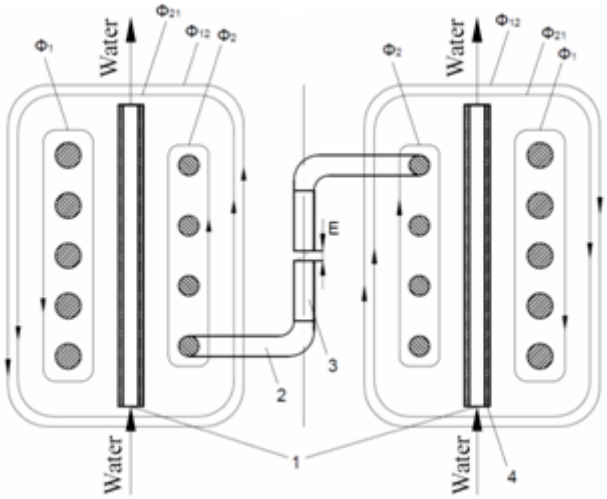


Fig.1. Magnetic fluxes in the design with an air-core transformer
1 – is the plasma torch cooling section; 2 - is the flexible conductor;
3 - is the moveable contact; 4 - is the quartz tube

Fig.1 shows water-cooled sections of the slit plasma torch, which are located between the windings of the inductor and the ignition device. To ignite a ring-shaped discharge in plasma, it is necessary to briefly bring the coil of the igniter into the discharge chamber of the slit plasma torch and compress the spring supply mechanism of the contacting rod. As a result of coupling the contact pair of the spring mechanism, an electric arc or spark discharge occurs due to the high voltage on the secondary winding of the air-core transformer. To limit the short-circuit on the second winding of the transformer, it is made of high resistance material (e.g. nichrome). The voltage on the secondary winding can reach 5...10 kV, which allows to produce an arc or spark discharge, which develops into a ring-shaped induction one.

Changes in magnetic flux linkage Ψ of mutual induction lead to excitation in inductively coupled windings of an air transformer of EMF$e_2$of mutual inductance M:

$$e_2 = \frac{d\Psi}{dt} = M\frac{di}{dt}.$$

The value of mutual inductance M mainly depends on the number of loops of the ignition device inductor, their shape and relative location. We also need to take into account magnetic properties of the cooling device of the slit plasma torch, material of the ignition device winding, insulating carcass and the flow of plasma-forming gas.

The degree of inductive coupling between the inductor and the ignition coil can change during the ignition of the plasma, as when the ignition coil is short-circuited, a current flows through it that influences the magnetic flux Φ_{21} of the mutual inductance M.

Inductive coupling coefficient k of coils of the inductor and ignition devices is:

$$k = \sqrt{\frac{\Phi_{21} \cdot \Phi_{22}}{\Phi_1 \cdot \Phi_2}} = \sqrt{\frac{Mw_1 \cdot Mw_2}{L_1 w_1 \cdot L_2 w_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} < 1,$$

whereΦ_{12} and Φ_{21} are magnetic fluxes of the mutual induction of the inductor with the ignition device and the ignition device with the inductor; Φ_1 and $\Phi_2$are flows of the self-inductance of the inductor and the ignition device.

Flux linkage *M* of the air-core transformer appearing because of mutual inductance binds together the magnetic fluxes of the inductor and the air-core transformer.

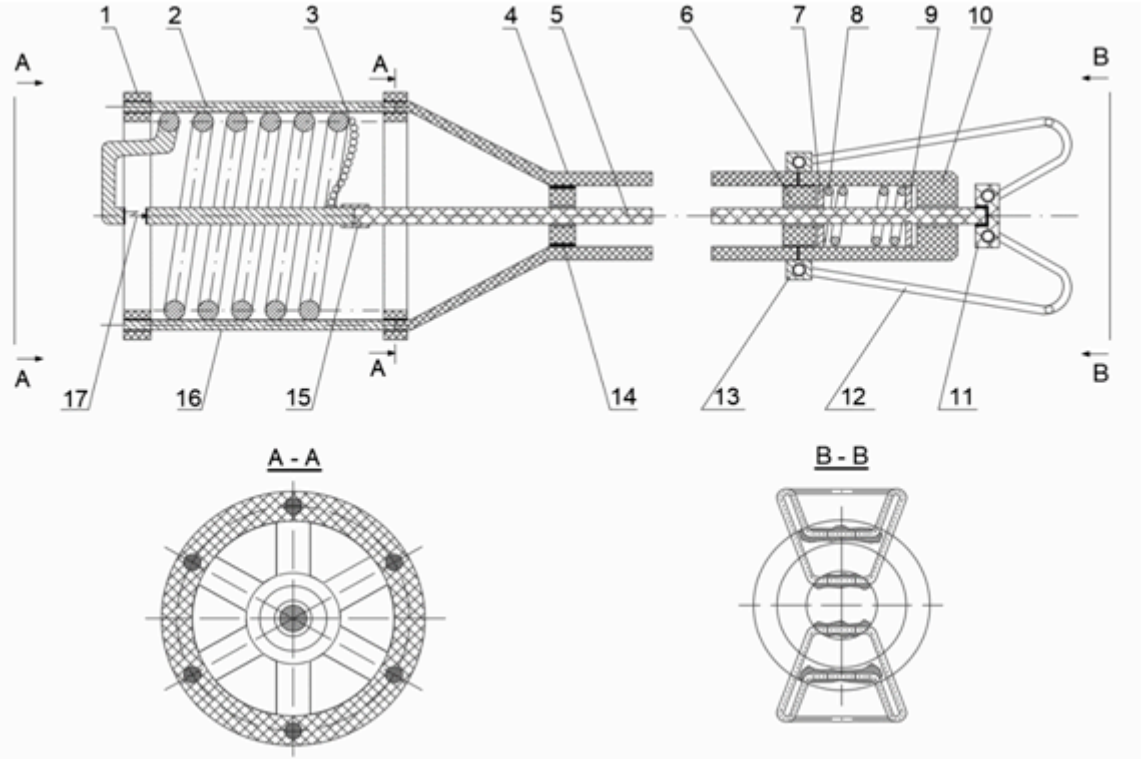


Fig. 2. The design of the device for plasma ignition

1 - is the insulating frame of the transformer; 2 – is the secondary winding of the air-core transformer; 3 - is the flexible conductor; 4 - is the fiberglass tube; 5 - is the contact electrode feeder rod; 6 - and 14 are guide washers; 7 - is athrust washer; 8 - is the spring; 9 - is a lock washer; 10 - is an end glass; 11 - is a restrictive washer; 12 - is aspring mechanism of contact rod return; 13 - is alocking ring; 15 - is a coupling; 16 - is the moveable contact; 17 - is the arc

On the Fig. 2 we present a variant of the design of the device for plasma ignition.

Views A–A and B–B are shown up to the break-up section.

The air-core transformer contains several loops (up to 10) of high resistance wire in the form of a spiral (spring) with free terminals forming a switching node, placed in an insulation frame with windows and slits to let the plasma-forming gas through.

The secondary winding of the air-core transformer of the ignition device is placed in an insulation frame with windows and slits to letthe plasma-forming gas through.

The insulating frame (Fig. 2, No. 1) is needed to eliminate short-circuits between windings of the ignition device and the cooling device of the slitplasma torch. Windings (coils) of the inductor and ignition device are located rather close to each other (20...30 mm) and contain w_1 and w_2 loops, sothemagnetic field of the inductor current extends to the area of the ignitiondevice winding.

The device operates in the following way:

When the generator is turned on, high-frequency voltage is applied to the load, inductor that forms a high-frequency ring-shaped discharge. However, to get to the initial stage of

discharge, it is necessary to form a conductive electronic-ion environment in the gas jet flowing through the inductor, developing into a ring-shaped discharge.

The ignition device, which for a short time (several seconds) is moved into the inductor area and forms an air transformer with it, fulfills the task of forming an environment that conducts electric current.

Our tests confirmed the efficiency of the device and the convenience of using it in the laboratory.

This research work was supported by the Academic Excellence Project 5-100 proposed by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

REFERENCES

1. *Koroteev A.S., Mironov V.M., Svirchuk Y.S.* Plasma Torches. Designs, Characteristics, Calculations. (Mashinostroenie, Moscow, 1993), 205 p.
2. *Klimenko G.K., Lialin A.A.* Designs of Electric Arc Plasma Torches. Study book for the discipline "Plasma Generators", (MSTU named after N. Bauman, Moscow, 2010).
3. *Dresvin S.V., Zverev S.G.* Plasma Torches: Designs, Parameters, Technology. Study book. (Polytechnical University Publishing House, St. Petersburg, 2007), 208 p.
4. *Dresvin S.V., Zverev S.G.* Heat Exchange in Plasma. Study book. (Polytechnical University Publishing House, St. Petersburg, 2008), 212 p.
5. *Dresvin S.V.* Low-temperature Plasma Generators // Encyclopedic series "Encyclopedia of Low-Temperature Plasma": Introductory Volume: in 4 books / Ed. by V.E. Fortov. - M.: Science, IAIC, Science / Interperodica,2000. –book 2, pp. 280–328.
6. *Patent of the Russian Federation* No.2524173, H05H1/34; H05B7/20, published July 27, 2014. Plasma torch for the smelting furnace with an arc-type ignition device.
7. *Patent RU* 2440701 C, H05H1/00, published in bulletin No 2, January 20, 2012. A device for igniting a ring induction discharge.
8. *Patent RU* 2558728 C1, H05B7/18; H05H1/24, published July 10, 2015, bulletin No 22. Combined induction-arc plasma torch and a method of induction discharge ignition.
9. *Patent of the Russian Federation* No. 2477026, Class H05B7/00, published February 27, 2013 High-frequency plasma torch, heating with electric discharges.
10. *JP09223595*, Ignition method of high frequency inductive coupling arc plasma and plasma generator, H05H-001/42, 1995JP-0324929 1995-12-14.
11. *JP3118300*, High frequency induction heat plasma torch, H05H-001/30, 1992JP-0040687 1992-01-31.
12. *US3501675*, Initiation process, H05H-001/24, H05H-001/46, 1966GB-0045619 1966-10-12.

УДК 629.3.017.5

ГЛАДУШЕВСКИЙ И.С.,
ЕВТЮКОВ С.С.
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗАМЕДЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ КАТЕГОРИИ M_1, УЧИТЫВАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

Аннотация. Проведены испытания замедления транспортных средств категории M_1 при использовании деселерометра BRAKE TESTER модели LWS – 2/MC на сухом асфальтобетонном покрытии t = (0 ± 0.5) °C. Рассмотрена методика расчета и введен коэффициент изменения замедления транспортного средства учитывающий технологический прогресс.

Ключевые слова: транспорт, протектор, шипы, тормозной путь, сцепление с дорогой, эффективность торможения, технологии, замедление.

GLADUSHEVSKY I.S.,
EVTYUKOV S.S.
St. Petersburg State University of Architecture and
Civil Engineering

TECHNIQUE OF CALCULATION OF DECELERATION OF CATEGORY M_1 VEHICLES TAKING INTO ACCOUNT TECHNOLOGICAL PROGRESS

Abstract. The deceleration tests of category M1 vehicles were carried out using the BRAKE TESTER model LWS - 2/MC decelerometer on dry asphalt pavement t = (0 ± 0.5) °C. The calculation method was considered and the coefficient of variation of the vehicle deceleration taking into account technological progress was introduced.

Keywords: transport, tread, spikes, braking distance, traction, braking performance, technology, deceleration.

Погодно-климатические условия вносят значимые изменения в траекторию движения транспортных средств. Определение тормозного пути не всегда возможно, особенно для современных транспортных средств, улучшающихся совместно с технологическим прогрессом [1].

Для определения тормозного пути и проведения испытаний было задействовано пятнадцать современных транспортных средств. Измерения проводились с использованием деселерометра BRAKE TESTER модели LWS - 2/MC [2-4].

Для определения замедления транспортных средств использовался деселерометр имеющий погрешность измерений установившегося замедления не более 4%. Датчик замедления прибора фиксировался на лобовом стекле внутри автомобиля и перед каждым измерением производилась его калибровка. Перед началом движения на приборе устанавливалась скорость 40 км/ч, по достижению которой производилось экстренное торможение. Все транспортные средства находились в исправном состоянии. Замеры тормозного пути и замедления производились на зимней шипованной и не шипованной резине, где высота рисунка протектора была более 5 мм. Глубина рисунка протектора определялась при помощи штангенциркуля. Масса транспортного средства определялась как снаряженная масса и масса одного пассажира [5-7].

Измерения замедления транспортных средств категории M_1 проводились на влажном асфальтобетонном покрытии при нулевых температурах. Методика включает в себя разгон транспортного средства до скорости 40 км/ч, после чего, при достижении зоны замедления, водитель начинал применять экстренное торможение. Во время проведения эксперимента производилось несколько измерений для каждого транспортного средства.

В результате каждого измерения были получены данные замедления транспортных средств. Пример полученных данных отображен на рис. 1 и рис. 2.

Из данных графиком видно, что:

- В обоих случаях применялась экстренная система торможения.
- Торможение осуществлялось с активной антиблокировочной системой.

При детальном рассмотрении линии замедления видно, что более плавное замедление было осуществлено на транспортном средстве Audi A6. В то время как на транспортном средстве BMW 750D активно работала система стабилизации.

В табл. 1 представлены данные, полученные в ходе проведения испытаний.

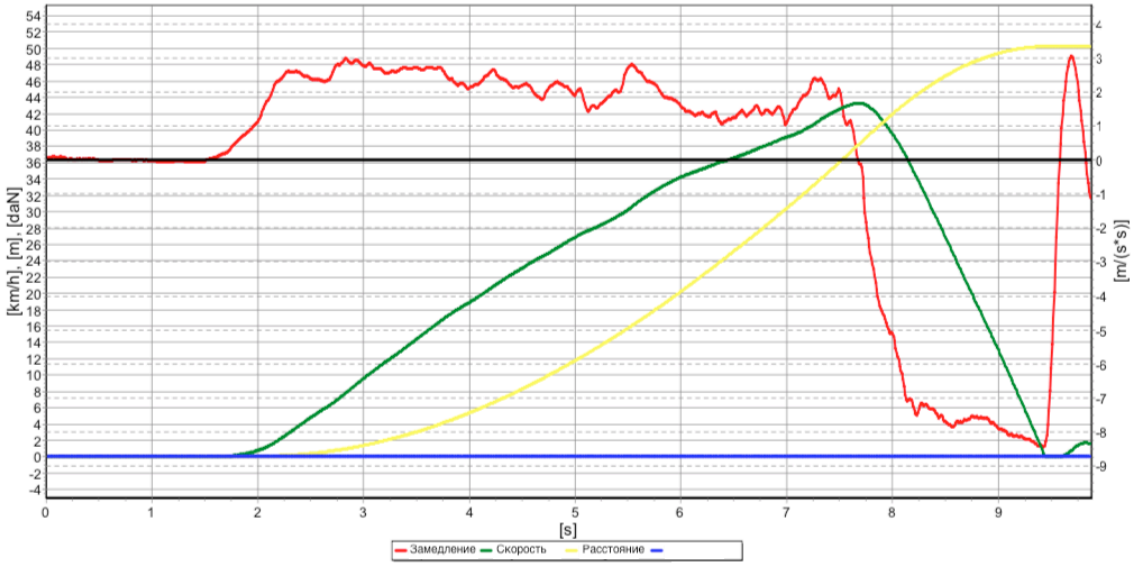


Рисунок 1 – Результат замера замедления ТС Audi A6

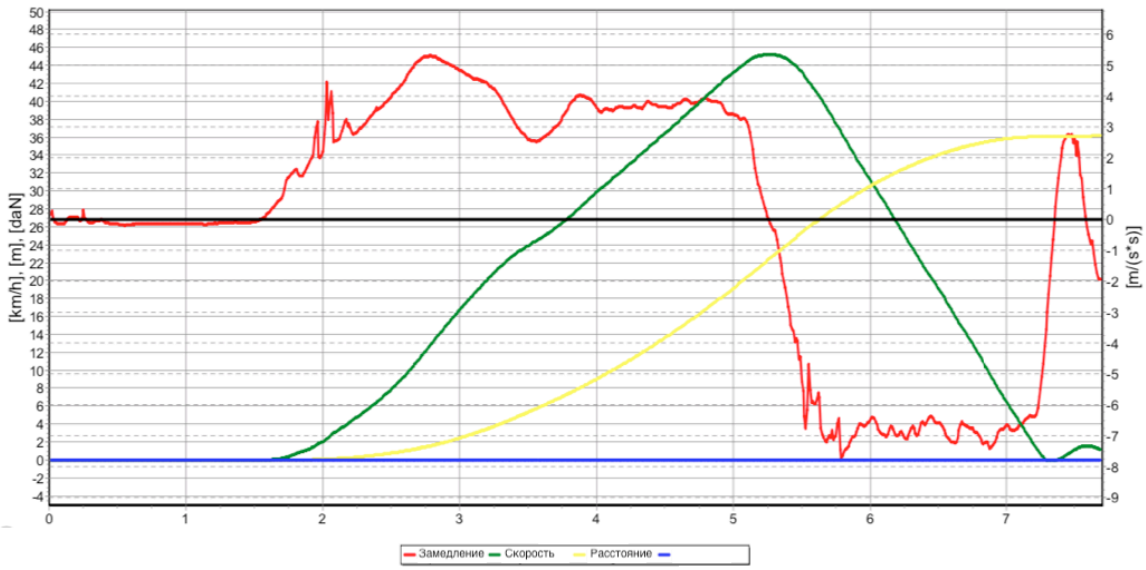


Рисунок 2 – Результат замера замедления ТС BMW 750D

Таблица 1

Замедление транспортных средств категории M_1 при использовании зимней резины на сухом асфальтобетонном покрытии t = (0 ± 0.5) °C

№, п.п.	Марка ТС	Модель ТС	Год ТС	Масса ТС, кг	Шипы	Протектор, мм	J_{TCmax}, m/s^2	$J_{тс}$, m/s^2
1	Audi	A8	2016	2035	да	6,31	8,01	7,07
2	BMW	750D	2017	2095	да	8,82	7,99	7,10
3	Mersedes-Benz	S-klasse 500	2016	2150	нет	7,43	7,99	6,97
4	Audi	A6	2018	1884	да	8,03	7,96	7,38
5	BMW	5	2016	1845	нет	6,39	7,98	7,38
6	Mersedes-Benz	E-klasse	2017	1815	нет	5,66	8,04	7,39
7	Volvo	S80	2011	1866	да	7,04	7,97	7,34
8	Toyota	Camry	2017	1695	да	5,84	8,10	7,30
9	Lexus	IS	2013	1635	да	6,64	8,18	7,28
10	Mersedes-Benz	C-klasse 180	2015	1475	нет	7,00	7,80	7,18
11	Audi	A4	2016	1485	да	5,94	7,84	7,23
12	BMW	3	2013	1485	да	5,58	7,81	7,17
13	Audi	A3	2008	1625	нет	5,30	8,25	7,34
14	Mazda	CX-5	2015	1635	да	6,89	7,88	7,28
15	Toyota	LC 150	2019	2310	да	10,00	7,92	7,29

Значения полученного замедления из табл. 1 показывают технические изменения транспортных средств, полученные в связи с технологическим прогрессом [8-14]. На изменение замедления относительно значений ГОСТ 33997-2016 [15] повлияло следующее:

- Наличие антиблокировочной тормозной системы;
- Применение современных материалов производства шинной продукции;
- Применение современных материалов производства тормозных систем;
- Применение современных тормозных систем;
- Переход транспортных средств с МКПП на АКПП;
- Применение современных системы стабилизации;
- Применение современных материалов при дорожном строительстве.

Расчетная модель не учитывает внедряющихся технологических изменений, совместно с технологическим прогрессом. Введение постоянного коэффициента, учитывающего изменения, позволит привести расчеты к полученным результатам. Данный коэффициент будет отражать нововведения, касающиеся области тормозных систем транспортных средств.

В формулу расчета замедления транспортного средства, по результатам тормозных испытаний, введем коэффициент $K_{техн}$, позволяющий учитывать изменение техники и технологий процесса замедления транспортных средств. Заданный коэффициент является постоянной величиной, $K_{техн} = 1{,}33$.

$$J_{\text{п зам}} = \frac{(g*(m_{\text{тор}} cos\alpha\varphi_n + m_a g sin\alpha) + P_{\text{п в}} + P_{\text{зац}})K_{\text{техн}}}{m_a \delta K_{\text{э } n}}, \quad (1)$$

где $J_{\text{п зам}}$ – замедление транспортного средства; g - ускорение свободного падения; $m_{\text{тор}}$ - масса, приходящаяся на заторможенные колеса; α - угол продольного наклона дороги; φ_n - коэффициент сцепления колес с дорогой на определенном интервале; m_a- фактическая масса ТС; $P_{n\,в}$- сила сопротивления воздуха; δ - коэффициент учета вращающихся масс; $K_{э\,n}$ - коэффициент эффективности торможения на определенном интервале; $P_{зац}$ - сила зацепа шипа; $K_{техн}$ – коэффициент технологического прогресса.

Первоначальная расчетная модель замедления транспортного средства будет актуализирована.

В табл. 2 рассмотрено изменение до введения и после введения коэффициента.

Таблица 2

Расчет замедления транспортных средств категории M_1 при использовании зимней резины с учетом коэффициента технологического прогресса.

№, п.п.	Марка ТС	Модель ТС	$J_{тс}$, без коэф, m/s^2	$J_{тс}$, с коэф, m/s^2
1	Audi	A8	5,94	7,07
2	BMW	750D	5,97	7,1
3	Mersedes-Benz	S-klasse 500	5,86	6,97
4	Audi	A6	6,20	7,38
5	BMW	5	6,20	7,38
6	Mersedes-Benz	E-klasse	6,21	7,39
7	Volvo	S80	6,17	7,34
8	Toyota	Camry	6,13	7,3
9	Lexus	IS	6,12	7,28
10	Mersedes-Benz	C-klasse 180	6,03	7,18
11	Audi	A4	6,08	7,23
12	BMW	3	6,03	7,17
13	Audi	A3	6,17	7,34
14	Mazda	CX-5	6,12	7,28
15	Toyota	LC 150	6,13	7,29

Применение данного коэффициента позволяет привести методику расчета к результатам, полученным при проведении исследования. Изменение значения данного коэффициента возможно при изменении характеристик тормозных систем, используемых на современных транспортных средствах на дорогах общего пользования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гладушевский И.С., Шаронов А.А., Пирогов Д.И.* Прогнозирование автоматизации функции управления / Серия «Автомобильные дороги и транспорт»: сб. статей магистрантов и аспирантов. Вып. 1; СПб.: СПбГАСУ, 2018. С. 79-81.
2. *Гладушевский И.С., Евтюков С.С.* Методика расчета тормозного пути на сухом асфальтобетонном покрытии при движении на шипованных шинах / Вестник гражданских инженеров, 2019. №2 (73). С.142-146.
3. *Гладушевский И.С., Евтюков С.С.* Оценка свойств замедления автомобиля при использовании зимнего типа шин на укатанном снежном покрытии / Вестник гражданских инженеров, 2019. №5(76) С. 217-221.
4. *Евтюков С.С., Гладушевский И.С.* Совершенствование методики исследования замедления ТС при эксплуатации летних шин с разной высотой протектора / Мир транспорта и технологических машин, 2020. № 1 (65). С. 72-78.
5. *Евтюков С.А., Голов Е.В.* Реконструкция дорожно-транспортных происшествий. - СПб.: Издательский дом «Петрополис, 2017. - 204 с.
6. *Добромиров В.Н., Евтюков С.С., Куракина Е.В.* Совершенствование методов оценки безопасности дорожного движения на скоростных автомобильных дорогах / Мир транспорта и технологических машин, 2017. №1(56). С. 94-100.
7. *Чооду О.А., Евтюков С.С., Монгуш С.Ч., Сандан Н.Т.* Особенности эксплуатации транспортно-технологических машин в условиях высоких амплитуд суточных температур / Вестник гражданских инженеров, 2018. № 5(70). С. 167-173.

8. *Гладушевский И.С., Евтюков С.С.* Зависимость тормозного пути от вида протектора. Коэффициент сцепления / Вестник гражданских инженеров, 2018. №6(71). С. 175-179.
9. *Евтюков С.А*. Влияние факторов на сцепные качества покрытий автомобильных дорог / Современные проблемы науки и образования, 2012. №3.
10. *Куракина Е.В., Евтюков С.А.* Исследование влияния сцепных качеств дорог на безопасность дорожного движения / Вестник гражданских инженеров, 2013. № 5(40). С. 166-172.
11. *Евтюков С.С., Куракина Е.В.* Исследование сцепных характеристик дорожного покрытия при автотехнической экспертизе ДТП / Вестник гражданских инженеров. СПбГАСУ, 2015. №5(52). С.216-223.
12. *Евтюков С.А., Евтюков С.С.* Параметры, влияющие на сцепные качества покрытий автодорог / Вестник Тувинского государственного университета. №3 Технические и физико-математические науки, 2013. № 3(18). С. 75-82.
13. *Домке Э.Р.* Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Э.Р. Домке. 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 288 с.
14. *Евтюков С.А., Брылев И.С.* Алгоритм корректировки нормативных значений времени нарастания замедления, установившегося замедления двухколесных механических транспортных средств / Мир транспорта и технологических машин, 2015. № 3(50). С. 3.
15. ГОСТ 33997-2016. Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки.

УДК 621.914

ГОРШКОВ И.В.,
ПОПОВ М.А.
Санкт-Петербургский Горный университет

СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ, КАК ФАКТОР, ВЛИЯЮЩИЙ НА КАЧЕСТВО МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. В работе рассмотрена проблема неоднородности структуры и состава оксидно-карбидных режущих пластин и влияние этих факторов на работоспособность металлорежущего инструмента. Был предложен способ решения данной проблемы путём проверки структуры каждой отдельной режущей пластины на стадии подготовки производства. Также был найден прикладной способ неразрушающего контроля структуры оксидно-карбидных режущих пластин. Целесообразность применения предложенных решений была подтверждена экспериментальным путём.

Ключевые слова: режущая керамика, микроструктура керамики, стойкость инструмента, качество обработки, неразрушающие методы контроля, фрезерование.

GORSHKOV I.V.,
POPOV M.A.
Saint-Petersburg Mining University

STRUCTURAL PARAMETERS OF CUTTING CERAMICS AS A FACTOR INFLUENCING THE QUALITY OF MACHINING

Abstract. The paper considers the problem of heterogeneity of the structure and composition of oxide-carbide cutting inserts and the influence of these factors on the performance of a metal-cutting tool. A method was proposed for solving this problem by checking the structure of each individual insert at the stage of preparation for production. An applied method of non-destructive testing of the structure of oxide-carbide cutting plates was also found. The appropriateness of the application of the proposed solutions was confirmed experimentally.

Keywords: cutting ceramics, ceramic microstructure, tool life, machining quality, non-destructive testing methods, milling.

Одним из главных способов повышения качества и производительности механической обработки является применение современных сверхтвёрдых материалов. Оксидно-карбидная керамика является одним из главных и наиболее доступных представителей этой группы материалов. Металлорежущий инструмент изготовленный из оксидно-карбидной режущей керамики (РК) позволяет производить обработку с высочайшим качеством и производительностью, вдвое превышающей более распространённые твёрдосплавные режущие инструменты. Основной сферой применения РК является финишная обработка высокопрочных сталей и чугунов с обеспечением высокой геометрической точности и низких значений шероховатости поверхности. Высокие механические свойства режущей керамики обусловлены высокой прочностью, твёрдостью и теплостойкостью [1, 2].

Широкое распространение такого инструмента на данный момент ограниченно в связи с высокой хрупкостью и низкой стабильностью. Режущие пластины из РК одной марки обладают различной стойкостью к изнашиванию и разрушению при одинаковых технологических условиях. Данная особенность возникает из-за сложности изготовления

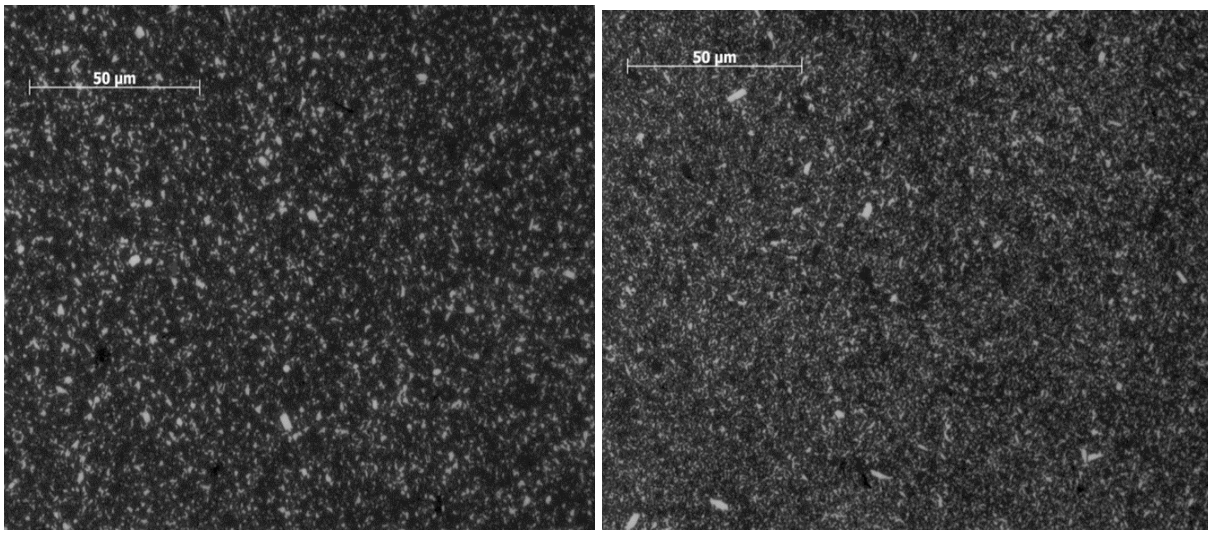
такого материала, в следствии чего возникает неоднородность состава и микроструктурных параметров. Эта особенность не позволяет с требуемой точностью определять период стойкости режущего инструмента, что ведёт к возникновению большого количества брака изготавливаемых деталей. Так как режущую керамику преимущественно используют при обработке точных и ответственных деталей, возникновение брака ведёт к большим финансовым потерям [3].

Решением данной проблемы является диагностирование структуры материала каждой отдельной режущей пластины на стадии подготовки производства для определения фактических механических свойств.

Современная оксидно-карбидная керамика состоит из оксида алюминия Al_2O_3 ~ 75% и карбидов металлов TiC, WC, MoC ~ 25% в различных комбинациях и процентных отношениях. Основными факторами, влияющими на механические свойства керамических режущих пластин, является количество, равномерность распределения и величина зерен карбидных включений [4, 5].

В ранее проведённых исследованиях Максарова В.В. и Халимоненко А.Д. было определено, что оксидно-карбидная керамика обладает определенным значением электропроводности. Так как проводниками электричества в таком материале являются карбиды металлов, то и значение электропроводности изменяется с ростом количества и размера металлических включений. Соответственно РК, как и любой токопроводящий материал обладает обратной характеристикой электропроводности – электрическим сопротивлением [2, 3, 5, 6].

Оксидно-карбидные пластины обладающие относительно низким электрическим сопротивлением (R ~ 10 Ом) (рис. 1,а) имеют большой процент пористости (14%), большой средний диаметр зёрен (2,2 мкм) и относительно малое количество карбидных зёрен (21 зерно в исследуемом периметре). Такие пластины обладают меньшей стойкостью к изнашиванию. Образцы, обладающие высоким электрическим сопротивлением (R ~ 100 Ом) (рис. 1,б), имеют более мелкозернистую структуру, средний диаметр зёрен составляет 1,5 мкм, процент пористости – 8%, а количество карбидных зёрен вдвое больше (47 зёрен), чем в образце с низким сопротивлением [7, 8].



а б

Рисунок 1 – Микроструктура оксидно-карбидной керамики с увеличением в 500 раз: а – образец с крупнозернистой структурой; б – образец с мелкозернистой структурой

Проведение измерения величины удельного электрического сопротивления R каждой керамической пластины позволяет определить ее микроструктуру, сформированную в процессе изготовления и определить наиболее рациональное применения конкретной керамической пластины для выполнения производственных задач

[3, 9, 10].

На данный момент известно два способа определения сопротивления оксидно-карбидных режущих пластин. Первый метод основан на измерении сопротивления путём создания объёмного контактов с двух сторон пластины с помощью металлов находящихся в жидком состоянии при нормальных условиях, таких как ртуть и сплав олово-галлий-индий, к которым подключается измерительный прибор – Омметр. Данный метод является эталонным, так как с его помощью была найдена вышеописанная зависимость, но такой способ не подходит для использования на металлообрабатывающих производствах из-за ряда технических ограничений [3, 11, 12].

В связи с этим возникла необходимость поиска прикладного способа измерения сопротивления оксидно-карбидных режущих пластин. Были изучены различные способы измерения электрического сопротивления и неразрушающего контроля микроструктуры полупроводниковых материалов, к которым относится и оксидно-карбидная керамика. Таким образом был найден бесконтактный метод измерения сопротивления керамических режущих пластин, основанный на измерении вихревых токов, возникающих при помещении пластины из РК в магнитное поле. Магнитное поле вихретокового преобразователя возбуждает в объекте контроля – оксидно-карбидной керамической пластине - концентрические вихревые токи, плотность которых максимальна на поверхности объекта в контуре, диаметр которого близок к диаметру возбуждающей обмотки. Результирующее поле зависит от электромагнитных свойств контролируемого объекта и расстояния между преобразователем и объектом (от зазора), поскольку распределение плотности вихревых токов зависит от этих факторов. Электромагнитное поле вихревых токов в свою очередь воздействует на катушки преобразователя и в измерительной обмотке наводится ЭДС, которая служит сигналом, передающим информацию об объекте в блок измерения. Геометрические размеры, электрические и магнитные свойства исследуемого образца, а также дефекты сплошности и расположение преобразователя влияют на параметры вихревых токов (интенсивность и распределение). Это свойство данного метода зачастую осложняет измерение, так как все вышеперечисленные параметры могут создавать помехи для измерения. Несмотря на это, данный метод позволяет производить измерения независимо от загрязнённости поверхности исследуемого образца и характеристик среды, таких как температура, влажность, давление и газовый состав [13, 14, 15]. Для данных измерений использовался вихретоковый дефектоскоп «Константа» К6.

Соответствие результатов измерений с эталонным методом были подтверждены экспериментально, погрешность измерений не превысила 14%, что позволяет использовать данный метод непосредственно на производствах, где используются оксидно-карбидные режущие пластины.

Также для подтверждения целесообразности разделения оксидно-карбидных режущих пластин были проведены эксперименты в которых производилось фрезерование заготовки из чугуна марки СЧ-20 торцовой фрезой с двумя различными вариантами компоновки фрезы керамическими режущими пластинами.

При такой обработке разделение пластин по механическим свойствам и селективное оснащение имеют особое значение, так как нагрузка на пластины имеет переменный характер из-за постоянно повторяющегося периодического врезания зубьев фрезы в заготовку. Такая нагрузка вызывает хрупкое разрушение в значительно большей степени в сравнении с точением. Также при выходе из строя одной режущей пластины возрастает нагрузка на следующую за ней и влечёт к преждевременному выходу из строя всех режущих пластин.

Во время эксперимента в одном случае на фрезу были установлены пластины со значением сопротивления близким к 10 Ом, а во втором случае фрезу оснащали пластинами с сопротивлением близким к 100 Ом. Обработка производилась на следующих режимах резания: V = 600 м/мин, S = 0,01 мм/об, t = 0,1 мм, до того момента, пока не

происходило резкое ухудшение качества обработки поверхности, после чего эксперимент останавливался.

Фактический период стойкости фрезы с компоновкой пластинами с высоким значением сопротивления с учётом обеспечения требуемой шероховатости поверхности 1,6 мкм составил 34 мин, фреза с компоновкой пластинами с низким значением сопротивления обеспечила период стойкости порядка 20 мин.

Таким образом в ходе проведённых исследований был найден прикладной способ неразрушающего контроля микроструктурных параметров режущих пластин оксидно-карбидной режущей керамики и экспериментально подтверждена целесообразность разделения таких режущих пластин на группы по фактическим показателям работоспособности на примере селективной компоновки торцевой фрезы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Максаров В.В*. Управление работоспособностью режущего инструмента, оснащенного сменными пластинами из режущей керамики / В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко, Ю. Ольт, Т. Лаатсит // Металлообработка – СПб.: Издательство «Политехника», 2008 №6(48), С. 50-58.
2. *Максаров В.В.* Влияние структурных параметров режущей керамики на работоспособность инструмента при обработке прецизионных поверхностей деталей горных машин / В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2017. №8. С. 56-64.
3. *Халимоненко А.Д.* Управление качеством процесса точения инструментом из режущей керамики: дисс. канд. техн. наук: 03.11.09. СПб., 2009. – 140 с.
4. *Максаров В.В.* Исследование работоспособности инструмента, оснащённого сменными пластинами из режущей керамики / В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко, Ю. Ольт, Т. Лаатсит // Инструмент и технологии, 2010. №27. С. 54-58.
5. *Халимоненко А. Д.* Точность обработки при точении заготовок режущим инструментом, оснащенным сменными керамическими пластинами / А.Д. Халимоненко, Р.В. Вьюшин // Записки Горного института, Т.209, 2014. С. 99-103.
6. *Максаров В.В.* Моделирование и управление динамическими свойствами технологических систем / В.В. Максаров, П.В. Леонидов // Записки Горного института, 2014. Т.209. С. 71-77.
7. *Максаров В.В.* Обеспечение качества при фрезеровании режущей керамикой точных элементов узлов и деталей машин / В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко // Современное машиностроение. Наука и образование, 2017. №6. С. 572-582.
8. *Максаров В.В*. Технологическое обеспечение параметров точности и шероховатости обработки станин на основе совершенствования торцевого фрезерования на станках с ЧПУ / В.В. Максаров, Р.Р. Рахманкулов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва, 2017. №1(40). С. 268-276.
9. *Максаров В.В.* Технология обеспечения качества геометрических параметров при обработке привалочной поверхности блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания / В.В. Максаров, Р.Р. Рахманкулов // Качество и жизнь, 2016. №3(11). С. 61-65.
10. *Халимоненко А.Д.* Анализ устойчивости работы многолезвийного инструмента, оснащённого режущей керамикой / А.Д. Халимоненко, Т.С. Голиков // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики - IPDME-2017, Сборник научных трудов международной научно-технической конференции, 2017. С. 305-308.
11. *Maksarov V.V., Khalimonenko A.D., Matrenichev K.G.* 2017 Stability analysis of multipoint tool equipped with metal cutting ceramics *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 87(8) 082030.
12. *Максаров В.В.* Способ прогнозирования работоспособности режущего инструмента

оснащённого режущей керамикой / В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко // пат. 2611980 Рос. Федерация: МПК G01N 3/58/; Заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский Горный университет. - №2015150214; заявл. 23.11.2015; опубл. 01.03.2017, Бюл. № 7.
13. *Максаров В.В.* Технологическое обеспечение качества направляющих металлорежущих станков / В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко, И.В. Горшков, И.А. Бригаднов // Металлообработка, 2019. №4. С. 59–68.
14. *Клюев В.В.* Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. Под общ. ред. Клюева В.В. Т. 2. В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. - 688 с.
15. Исследование электрофизических свойств полупроводниковых слоев (n- и p- тип) и структур с двумерным электронным газом методом Холла и вихретоковым методом. Методические указания по исследовательской работе / СПб.: Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, 2010. – 40 с.

УДК 621

ЕРШОВ Д.Ю.,
ЗЛОТНИКОВ Е.Г.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения

ПЕРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС ПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО УГЛОВОЙ СКОРОСТИ В РЕЖИМЕ РАЗБЕГА

Аннотация. В статье описаны динамические переходные процессы, которые протекают в электроприводе технологического оборудования при изменении управляющего воздействия скачкообразным образом. Для этого случая рассматриваются условия режимов разбега, торможения, реверсирования, перехода от одной угловой скорости к другой при моментах двигателей постоянного и переменного тока, зависящих от угловой скорости. Управление переходными процессами электропривода позволяет обеспечить максимальное быстродействие при соответствующих ограничениях.

Ключевые слова: угловая скорость; переходной процесс; момент двигателя; разбег привода; режим разбега; механическая система.

ERSHOV D.Y.,
ZLOTNIKOV E.G.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of mechanical engineering

TRANSITION PROCESS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT DRIVE BY ANGULAR SPEED IN RUN-UP MODE

Abstract. The article describes dynamic transients that take place in the electric drive of technological equipment when the control influence is changed in a jumpy way. Conditions of modes of run, braking, reversing, transition from one angular speed to another at moments of DC and AC motors depending on angular speed are considered for this case. The drive transients can be controlled to ensure maximum speed with appropriate limits.

Keywords: angular velocity; transient process; engine torque; drive run-up; run-up mode; mechanical system.

Привод является одной из главных составных частей технологического оборудования, определяющей его функциональные и эксплуатационные характеристики. Наиболее сложные условия работы электропривода наблюдаются в переходных режимах, к которым относятся моменты пуска, разгона, реверсирования и торможения механизмов технологических машин. В такие моменты требуется обеспечить согласование электромеханических характеристик двигателя с динамическими характеристиками механизмов оборудования с учетом сил технологического сопротивления и сил инерции.

Рассмотрим разбег привода при скачкообразном изменении управляющего воздействия - напряжения, подаваемого на якорь двигателя, и постоянном моменте нагрузки M_L^0. С целью ограничения пускового момента двигателя в цепь якоря вводят, кроме добавочного сопротивления, индукционную катушку, что увеличивает индуктивность цепи. В этом случае приходится наряду с механическими учитывать и электромагнитные переходные процессы. Таким образом, при изучении динамических процессов режима разбега привода следует использовать динамическую характеристику

двигателя [1]:

$$T_e\dot{M}_E + M_E = \beta_E\omega_0 - \beta_E\omega_E, \quad (1)$$

где T_e - электромагнитная постоянная времени, определяемая индуктивностью и сопротивлением цепи якоря двигателя; M_E - момент двигателя; β_E - модуль статической жесткости; ω_0 - угловая скорость холостого хода двигателя; ω_E - угловая скорость двигателя под нагрузкой.

На основании проведенного в работах [2–16] исследованиях, рассмотрим особенности рассматриваемого режима разбега с помощью динамической модели привода, показанной на рис. 1.

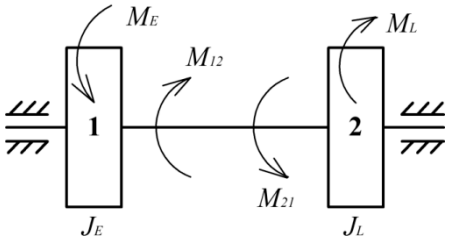


Рисунок 1 - Динамическая модель привода технологического оборудования

Дифференциальные уравнения, описывающие электромеханические динамические процессы в приводе, имеют вид:

$$\begin{cases} J_E\dot{\omega}_E = M_E + M_{12} \\ J_L\dot{\omega}_L = M_{21} - M_L^0 \\ T_e\dot{M}_E + M_E = \beta_E\omega_0 - \beta_E\omega_E \end{cases}. \quad (2)$$

В рассматриваемом случае разбег привода состоит из двух этапов. На первом этапе при неподвижной механической системе ($\omega_E = 0$) в двигателе после его запуска происходят электромагнитные процессы, описываемые третьим уравнением системы (2). При этом момент двигателя M_E возрастает от нуля до значения $M_E = M_L^0$. На втором этапе, когда $M_E > M_L^0$, происходит разбег механической системы.

Рассмотрим влияние угловой скорости двигателя $\omega_E(t)$ на переходной процесс. Поскольку $\omega_E = 0$, то из третьего уравнения системы (2) имеем:

$$T_e\dot{M}_E + M_E = \beta_E\omega_0 - M_{sc}, \quad (3)$$

где M_{sc} - момент короткого замыкания.

Общее решение уравнения (3) будет иметь вид:

$$M_E(t) = Be^{\lambda t} + M_{sc}.$$

Момент двигателя возрастает по экспоненте. Так как в момент времени $t = \tau$, $M_E = M_L^0$, то получим:

$$M_L^0 = M_{sc}\left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_e}}\right).$$

Решение последнего уравнение будет в виде:

$$\tau = -T_e\, ln\left[\frac{M_{sc} - M_L^0}{M_{sc}}\right]. \quad (4)$$

Рассмотрим второй этап разбега при $t > \tau$, для чего преобразуем систему (2) к одному уравнению относительно переменной ω_E. На этом этапе $\dot{\omega}_E = \dot{\omega}_L$:

$$(J_E + J_L)\dot{\omega}_E = M_E + M_L^0.$$

Решая последнее уравнение относительно M_E, и продифференцировав по времени,

получим:

$$\dot{M}_E = \left(J_E + J_L\right)\ddot{\omega}_E .$$

Характеристическое уравнение будет иметь вид:

$$T_e T_m \lambda^2 + T_m \lambda + 1 = 0 .$$

Корни характеристического уравнения:

$$\lambda_{1,2} = \frac{-T_m \mp \sqrt{T_m^2 - 4T_e T_m}}{2T_e T_m} = -\frac{1}{2T_e} \mp \frac{1}{\sqrt{T_e T_m}} \sqrt{\frac{T_m}{4T_e} - 1} . \quad (5)$$

Как следует из полученного выражения, характер движения привода в режиме разбега определяется соотношением постоянных времени T_e и T_m. Рассмотрим три возможных случая.

1. Если $T_m > 4T_e$, переходный процесс по угловой скорости ω_E при разбеге привода будет описываться зависимостью:

$$\omega_E(t) = C_1 e^{\lambda_1 (t-\tau)} + C_2 e^{\lambda_2 (t-\tau)} + \omega_E^0 .$$

Такой переходной процесс является апериодическим и затухающим.

2. Если $T_m = 4T_e = T^*_m$, где T^*_m - критическое значение механической постоянной времени. Такой переходной процесс также будет являться апериодическим и затухающим:

$$\omega_E(t) = \left(C_1 + tC_2\right) e^{-\frac{1}{2T_e}} + \omega_E^0 .$$

3. Если $T_m < T^*_m = 4T_e$, переходный процесс по угловой скорости ω_E при разбеге привода будет описываться зависимостью:

$$\omega_E(t) = Ae^{-\frac{t-\tau}{2T_e}} sin\left[\Omega_c (t-\tau) + \psi\right] + \omega_E^0 . \quad (6)$$

Продифференцируем выражения (6) по времени:

$$\dot{\omega}_E(t) = -\frac{1}{2T_e} Ae^{-\frac{t-\tau}{2T_e}} sin\left[\Omega_c (t-\tau) + \psi\right] + A\Omega_c e^{-\frac{t-\tau}{2T_e}} cos\left[\Omega_c (t-\tau) + \psi\right], \quad (7)$$

где:

$$A = \frac{\omega_E^0}{\sqrt{1 - \frac{T_m}{4T_e}}},\ \tilde{\psi} = \pi + arctg\sqrt{4\frac{T_e}{T_m} - 1} = \pi + \psi .$$

Частное решение дифференциального уравнения (7) имеет вид:

$$\omega_E(t) = \omega_E^0 \left\{ 1 - \frac{e^{-\frac{t-\tau}{2T_e}}}{\sqrt{1 - \frac{T_m}{4T_e}}} sin\left[\Omega_c (t-\tau) + \psi\right] \right\}. \quad (8)$$

С ростом сопротивления якоря двигателя растет механическая постоянная T_m, а также собственная частота Ω_c уменьшается. Привод в этом случае представляет собой демпфированное колебательное звено, а постоянная времени T_m играет роль диссипативного фактора, характеризующего затухание колебаний. Величина отношения $\frac{T_m}{T_m^*}$ определяет характер переходного процесса в приводе. На основании выражения (8) был получен график переходного процесса привода в режиме разбега по угловой скорости, представленный на рис. 2.

На первом этапе ($0 \le t \le \tau$) режима разбега механическая система неподвижна (участок $0a$ графика). При $t > \tau$ момент $M_E(t)$ удовлетворяет условию $M_E(t) > M_L^0$ и механическая система приходит в движение (участок ab графика). В точке b графика угловая скорость $\omega_E(t)$ достигает установившегося значения $\omega_E(t) = \omega_E^0$. Но так как момент

двигателя по-прежнему удовлетворяет условию $M_E(t) > M_L^0$, то на участке *bc* происходит дальнейшее увеличение угловой скорости. Ускорение $\dot{\omega}_E$ обращается в нуль и скорость ω_E достигает наибольшего значения (точка *c* графика). Далее ускорение $\dot{\omega}_E$ обращается в нуль, и угловая скорость достигает минимума. Переходный процесс по угловой скорости ω_E имеет характер затухающих колебаний, происходящих около ω_E^0 и M_L^0, которые определяют установившееся движение привода.

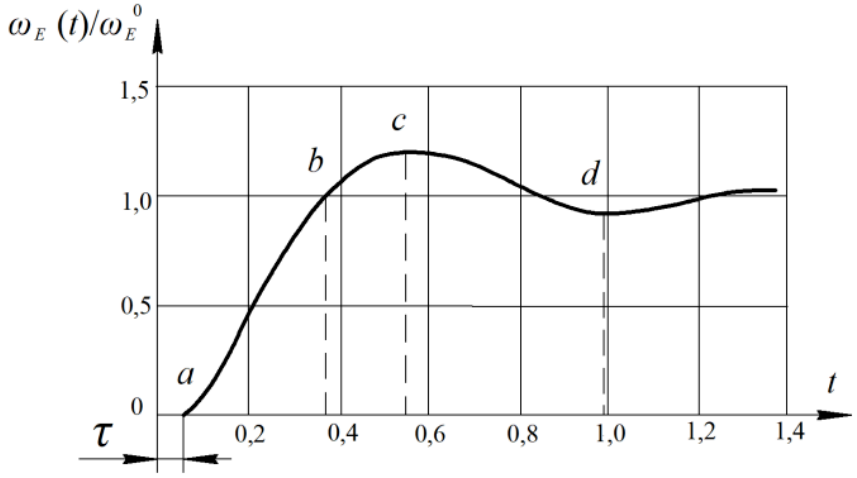


Рисунок 2 - График переходного процесса привода в режиме разбега по угловой скорости

Из решений (8) следует, что чем больше электромагнитная постоянная времени T_e привода, тем менее интенсивно происходит затухание колебаний. Поэтому введение в цепь якоря индуктивной катушки, предназначенной для снижения пика момента, приводит к увеличению времени переходного процесса привода, т.е. к уменьшению его быстродействия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ershov D.Y., Lukyanenko I.N.* 2020 Dynamic model of technological equipment drive with S DOFs *Smart Innovation, Systems and Technologies* 154 171-182.
2. *Ершов Д.Ю.* Определение собственных частот колебаний трехмассовых динамических систем / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018: сб. тезисов международной научно-практической конференции / под ред. Максарова В.В. // Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. Т.1, С. 25-25.
3. *Ершов Д.Ю.* Применение трехмассовых динамических моделей при исследовании колебательных процессов в электромеханических системах / Д.Ю.Ершов, И.Н. Лукъяненко // Современные проблемы теории машин, 2016. №4. С. 71-74.
4. *Ershov D.Y., Zlotnikov E.G., Nestorovski B.* 2019 Own fluctuations of technological systems *Journal of Physics. Conf. Series*, 1399(2), 22055.
5. *Максаров В.В.* Моделирование динамических процессов механической обработки в среде NILabVIEW для совершенствования технологии изготовления деталей горных машин / В.В. Максаров, Д.А. Осминко, А.Е. Ефимов // Металлообработка, 2018, №1. С. 21-28.
6. *Efimov A.E., Maksarov V.V., Timofeev D.Y.* 2018 Modeling dynamic processes at stage of formation of parts previously subjected to high-energy laser effects *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327(2) 22026.
7. *Maksarov V.V., Olt J.* 2017 Dynamic stabilization of machining process based on local metastability in controlled robotic systems of CNC machines *Journal of Mining Institute* 226

446-451.
9. *Maksarov V.V., Krasnyy V.A., Viushin R.V.* 2018 Simulation of dynamic processes when machining transition surfaces of stepped *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327 022047.
10. *Блехман И.И.* Механика и вибрационная реология (теория и приложения) - М.: Физматлит, 2018. - 752 с.
11. *Алексеева Л.Б.* Определение характеристик переходных режимов при управлении приводом машины / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2016. №4. С. 18-25.
12. *Vasilkov D.V., Nikitin A.V., Cherdakova V.S.* 2018 Dynamic system stability when machining with cutter *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 194(2) 022045.
13. *Shvetsov, I.V.*, *Vasilkov D.V., Tarikov I.Ya.* 2019 Vibration stability criterion in assessing the dynamic quality and limiting capabilities of machine tools *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 656(1) 012049.
14. *Федоренко И.Я.* Динамические свойства двухмассной вибрационной технологической машины / И.Я. Федоренко, А.А. Гнездилов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2016. №3(137). С. 179-183.
15. *Грудинин. В.Г.* Динамический анализ гасителя угловых колебаний / Вестник ИрГТУ, 2012. №4(63). С. 33-39.
16. *Поветкин В.В.*Разработка динамической модели привода шаровой мельницы с учетом демпфирующих свойств его элементов / В.В. Поветкин, М.Е. Исаметова, И.Н. Исаева, А.З. Букаева // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2018. №5. С. 184–192.

УДК 621.91.01

ЕФИМОВ А.Е.,
МАКСАРОВ В.В.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЭТАПЕ РАСТАЧИВАНИЯ СВАРНОЙ РАЗНОРОДНОЙ КОНСТРУКЦИИ ИНСТРУМЕНТОМ С РЕГУЛИРУЕМЫМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ

Аннотация. На сегодняшний день в машиностроении нашли широкое применение сварные разнородные конструкции. Механическая обработка таких изделий сопровождается возникновением неустойчивого автоколебательного процесса. Для снижения интенсивности вибраций предлагается применять расточную оправку с регулируемой степенью напряжено-деформированного состояния. Исследования динамических характеристик разработанного инструмента в зависимости от степени напряжено-деформированного состояния осуществлялись на основе виртуальных цифровых моделей, созданных на базе высокопроизводительных программных средах COMSOL Multyphysics и LabVIEW. Такой подход позволяет предварительно оценить уровень амплитуды автоколебательного процесса и показатели шероховатости внутренней поверхности изделия.

Ключевые слова: математическое моделирование, динамические параметры, автоколебательный процесс, напряженно-деформированное состояние, шероховатость поверхности.

EFIMOV A.E.,
MAKSAROV V.V.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of mechanical engineering

MODELING OF DYNAMIC PROCESSES AT THE STAGE OF BORING OF THE WELDED DIFFERENT CONSTRUCTION DESIGN BY THE TOOL WITH A STRESSED-DEFORMED STATE

Abstract. Today, the welded different construction design are used in mechanical engineering. mechanical processing of such products is accompanied by an unstable self-oscillating process. to reduce the intensity of vibrations, it is proposed to use a boring bar with an adjustable degree of stress-strain state. studies of the dynamic characteristics of the developed tool depending on the degree of stress-strain state were carried out on the basis of virtual digital models created on the basis of high-performance software environments Comsol Multiphysics and LabVIEW. This approach allows you to pre-evaluate the level of the amplitude of the self-oscillating process and the roughness of the inner surface of the product.

Keywords: mathematical modeling, dynamic parameters, self- oscillating process, stress-strain state, surface roughness.

На сегодняшний день во многих машиностроительных производствах нашли широкое применение детали, сваренные из разнородных сталей [3, 5]. К таком типу изделий относится деталь «Труба» запорного электромагнитного клапана. Изделие

сварено из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т и углеродистой стали 45, путём электродуговой сварки.

Проведенные комплексные динамические исследования позволили установить, что процесс растачивания комбинированных внутренних поверхностей из разнородных сталей сопровождается возникновением автоколебательного процесса, который переходит в неустойчивый режим функционирования [2, 4, 8]. Поэтому решением для данной проблемы может служить разработка антивибрационного расточного инструмента, изменяющего собственное напряженно-деформирование состояние по периферии оправки посредство конструктивного демпфирования в виде внутреннего разжимного конуса (рис. 1).

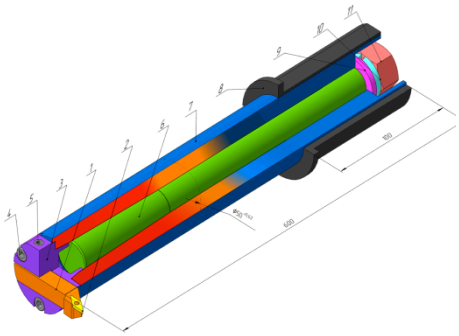


Рисунок 1 – Развёртка сборочной модели напряжённо-деформированной оправки

Эффективность диссипации энергии от автоколебательного процесса разработанным антивибрационным инструментом оценивалась по амплитудно-частотной характеристике [1, 10, 12]. Для этого в программной среде COMSOL Multyphysics осуществлялось создание цифровой модели (рис. 2). Результаты исследований показали, что расточной инструмент с вылетом 0.5 м и степенью затяжки разжимного конуса $90\ Н \cdot м$ обеспечивает высокие показатели коэффициента демпфирования 0.12 по сравнению со стандартной оправкой 0.075. Помимо этого разработанная оправка лучше сопротивляется деформациям при изгибных колебаниях, что положительно отразиться на механической обработке сварной конструкции [6, 11].

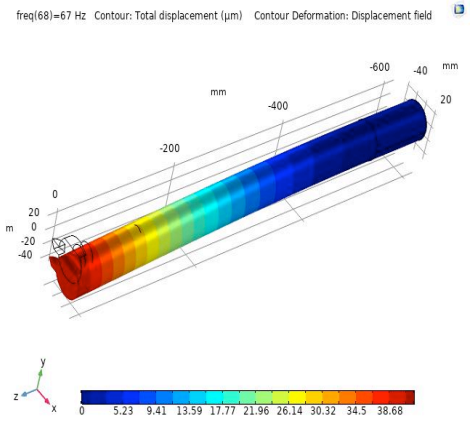


Рисунок 2 – Деформации в разработанной расточной оправке

Дальнейшие исследования расточной оправки с регулируемым напряженно-деформированным состоянием осуществлялись в программной среде LabView 2019. С этой целью создавалась двухконтурная математическая модель процесса растачивания изделий, сваренных из разнородных сталей [7, 9, 14]. На базе программной среды LabView создан виртуальный прибор, позволяющий оценивать устойчивость динамического процесса при растачивании антивибрационным инструментом (рис. 3) [13, 15, 16].

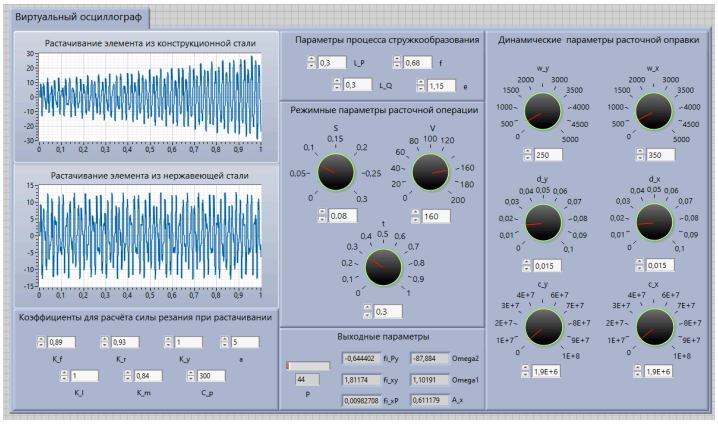
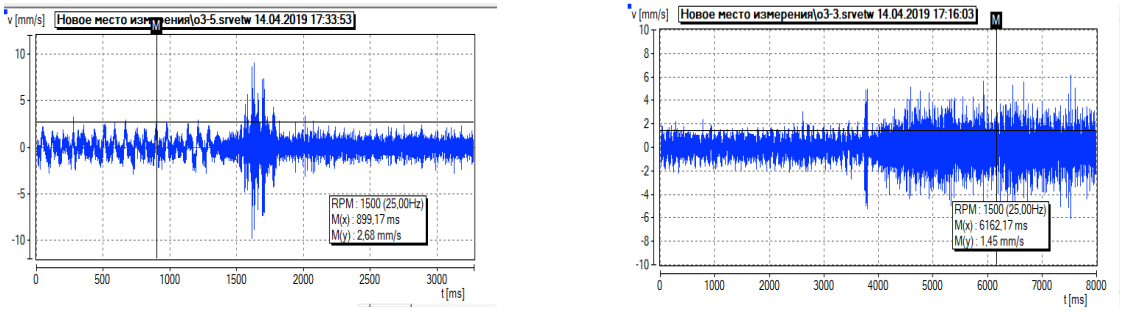


Рисунок 3 – Созданный виртуальный прибор по определению динамической устойчивости процесса растачивания

Отработка режимов механической обработки производилась в практических условиях на станке модели Hyundai WIA L300C. Проведенные экспериментальные исследования показали, что антивибрационный инструмент позволяет снизить амплитуду автоколебательного процесса и его вероятность перехода в неустойчивый режим функционирования (рис. 4).



а б

Рисунок 4 – Процесс растачивания сварного изделия:
а – антивибрационный иснутрмент; б – стандарный иснутрмент

В ходе испытаний установлено, что шероховатость на протяжении всего участка обработки антивибрационным инструментом составила R_a = 0.8…1.6 мкм, а стандартным инструментом - R_a = 1.5…1.8 мкм. Следовательно, разработанный инструмент эффективнее демпфирует вибрации и позволяет улучшить качество обрабатываемых внутренних поверхностей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ershov D.Y., Zlotnikov E.G., Timofeev D.Y.* 2019 Analysis of proper fluctuations of technological systems *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 560 012015.
2. *Efimov A.E., Maksarov V.V., Timofeev D.Y.* 2018 Modeling dynamic processes at stage of formation of parts previously subjected to high-energy laser effects *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327(2) 22026.
3. *Krasnyy V.* 2018 Application of seals made of directed reinforced polymeric composite materials to improve wear resistance of friction units of oil well pumps *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 194 042008.
4. *Krasnyy V.*, Vazhenin A. 2018 The Assessment of Wear Resistance of Thin-Layer Carbide Coatings under Vacuum Arc Deposition *Advances in Engineering Research* 177 213-216.
5. *Krasnyy V.* 2019 The use of nanomaterials to improve the wear resistance of machine parts under fretting corrosion conditions *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 560 012186.
6. *Khalimonenko A.D., Pompeev K.P., Timofeev D.Y.* 2019 Dimensional analysis of the manufacturing processes of axisymmetric parts *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 560 012144.
7. *Maksarov V., Keksin A.* 2018 Technology of magnetic-abrasive finishing of geometrically complex products *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327 042068.
8. *Maksarov V.V., Krasnyy V.A., Viushin R.V.* 2018 Simulation of dynamic processes when machining transition surfaces of stepped *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327 022047.
9. *Maksarov V., Keksin A.* 2018 Forming conditions of complex-geometry profiles in corrosion-resistant materials *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 194 062016.
10. *Olt J., Maksarov V., Efimov A.* 2019 Improving the quality of critical tractor parts through the dynamic stabilisation of the manufacturing process in regard to CNC machines *Agronomy Research* 17 1146-1154.

11. *Pompeev K.P, Timofeev D.Yu.* 2018 Precision dimensional analysis in CAD design of reliable technologies *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science* 194(2) 022028.
12. *Zlotnikov E.G*., *Khalimonenko A.D., Kazakov Yu.* 2018 Modeling and calculation of load on cutting inserts of disk milling cutters in software environment of Autodesk Inventor *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 194 022048.
13. *Кексин А.И.* Технологическое обеспечение шероховатости резьбовых поверхностей посредством предварительного магнитно-абразивного полирования метчика / А.И. Кексин, В.В. Максаров // Металлобработка, 2018. №2. С. 35-40.
14. *Тимофеев Д.Ю*. Повышение качества изготовления деталей из титановых сплавов с применением метода предварительного локального пластического деформирования / Д.Ю. Тимофеев, Е.В. Кошелева // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики, 2017. С. 302-305.
15. Максаров В.В. Технологическое обеспечение качества направляющих металлорежущих станков / В.В. Максаров, И.В. Горшков, А.Д. Халимоненко, И.А. Бригаднов // Металлообработка, 2019. №112(4). С 59-67.
16. *Васильков Д.В.* Моделирование контактных взаимодействий с учетом реологии в зоне резания при высокоскоростной обработке изделий из жаропрочных сплавов / Д.В. Васильков, Т.Б. Кочина // Металлообработка, №4(76). 2013. С. 2-10.

УДК 621.01

ЖАВНЕР В.Л.,
ЖАВНЕР М.В.,
ЧЖАО ВЭНЬ
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
БЕЛОГУР В.П.
ООО ФИРМА «СПРИНГ-ЦЕНТР»

МЕХАТРОННЫЕ ПРУЖИННЫЕ ПРИВОДЫ ДЛЯ НЕФТЯНЫХ КАЧАЛОК

Аннотация. При разработке теоретических основ проектирования технологического оборудования и его отдельных узлов, в частности, совершающих возвратно-поступательные перемещения, особенно перспективным с точки зрения энергетических затрат является разработка принципиально нового вида привода для нефтяных качалок, что позволит снизить энергопотребление, массу, габариты, что в свою очередь снизит и стоимость фундаментов для их установки.
Разработка теоретических основ проектирования оборудования с минимальными затратами энергии позволит разработать как алгоритмы проектирования, так и оценки технологического оборудования с позиций энергетических затрат. Актуальность задачи снижения потребления энергии технологическим оборудованием заключается в том, что в настоящее время не разработан системный подход к выявлению и оценке составляющих энергетических затрат. Снижение энергетических затрат, например, в три раза, позволит снизить потребляемую мощность в девять раз. Это, прежде всего, касается нефтедобычи и загрузочно-разгрузочных операций в большинстве отраслей промышленности.

Ключевые слова: энергосбережение; мехатроника; пружинный привод; рекуперация энергии; рабочие операции циклического действия; инерционные силы; производительность; быстродействие; нефтедобыча

ZHAVNER V.L.,
ZHAVNER M.V.,
ZHAO WEN
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
BELOGUR V.P.
LLC FIRM «SPRING-CENTER»

MECHATRONIC SPRING DRIVES FOR OIL PUMPS

Abstract. When developing the theoretical basis for the design of technological equipment and its individual components, in particular, performing reciprocating movements, it is particularly promising in terms of energy costs to develop a fundamentally new type of drive for oil rockers, which will reduce energy consumption, weight, dimensions, which in turn will reduce the cost of foundations for their installation.
The development of theoretical foundations for the design of equipment with minimal energy costs will allow us to develop both design algorithms and estimates of technological equipment from the standpoint of energy costs. The relevance of the task of reducing energy consumption by technological equipment lies in the fact that at present no systematic approach has been developed to identify and evaluate the components of energy costs. Reducing energy costs, for example, three times, will reduce power consumption by 9 times. This is especially true for oil production and loading and unloading operations in most industries.

Keywords: energy saving; mechatronics; spring drive; energy recovery; cyclic operations; inertial forces; productivity; speed; oil production

Технологическое оборудование является основным потребителем энергии в промышленности. Рассматривая жизненный цикл технологического оборудования и инфраструктуру, которая обеспечивает его функционирование, можно отметить, что основными характеристиками, определяющими затраты энергии, являются масса оборудования и масса его подвижных частей, габаритные размеры, система приводов и установочная мощность. При сравнительном анализе различных видов технологического оборудования одного функционального назначения все вышеперечисленные характеристики, отнесенные к единице продукции, могут служить критериями оценки их энергетической эффективности [1-7].

Энергопотребление технологическим оборудованием, определяются работой, затрачиваемой на выполнение технологических операций, работой, связанной с диссипативными потерями, работой, обусловленной силами инерции, работой, затрачиваемой на преодоление сил тяжести и затратами энергии на системы управления [1].

Классическим вариантом привода нефтяной качалки является привод, имеющий выходное звено, совершающее возвратно-качательное движение, причём с одной стороны на этом звене закреплен сегмент блока с гибким элементом, который в свою очередь соединен со штангой насоса. С другой стороны выходное звено соединено с противовесом. По такой схеме выполнено подавляющее большинство нефтяных качалок. В последние годы появились другие варианты нефтяных качалок, из которых выделим несколько типов:

1. Приводы с пневматическими системами уравновешивания;
2. Приводы с использованием гидравлических цилиндров;
3. Приводы с электроприводом и грузовым уравновешиванием;
4. Приводы с линейными электроприводами без уравновешивания.

На рис. 1 представлена диаграмма потребления энергии в современном технологическом оборудовании.

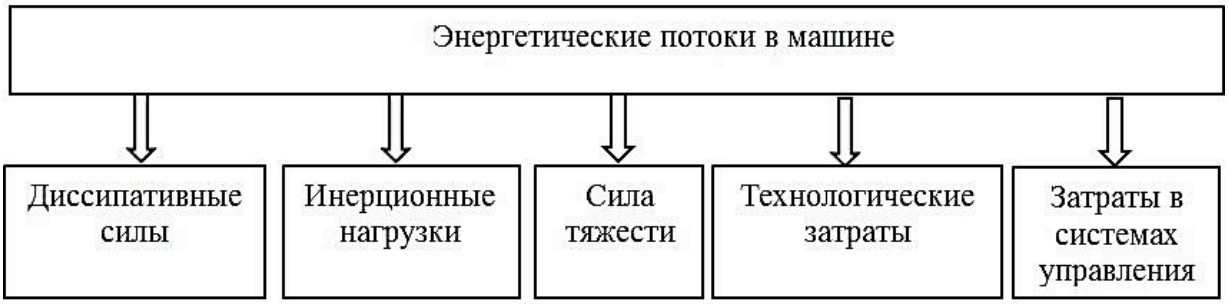


Рисунок 1 – Схема потребления энергии в технологическом оборудовании

Инерционные нагрузки определяются из двух уравнений:

$$M = J_{\text{пр}}\ddot{q},$$

$$F = ma,$$

где $\ddot{q}$, a– характеристики, зависящие от технологического процесса, которые возрастают с увеличением производительности.

Затраты энергии на преодоление сил тяжести определяется из уравнения:

$$A = mgh,$$

где h – высота перемещения массы по вертикали.

В случае нефтяных качалок hопределяется ходом штанги.

Способами уменьшения затрат энергии являются: использование рекуперации энергии в электрическом приводе, механическая рекуперация и пневматическая рекуперация.

Из этих уравнений видно, что снижение затрат энергии обеспечивается, прежде всего, за счёт снижения массы подвижных элементов. С другой стороны, с увеличением производительности увеличиваются линейные и угловые ускорения, что увеличивает затраты энергии.

Уменьшение затрат энергии, связанных с диссипативными потерями обеспечиваются за счет снижения потерь в опорах, уменьшения кинематических цепей, энергосберегающих ориентиров при выборе типа двигателя[1-4, 5-8].

Рассматривая режимы работы нефтяной качалки необходимо отметить, что рабочие движения происходят в вертикальной плоскости, как правило, в пределах 0,8-2 м и с массой нагрузки до 8000 кг. Количество циклов в минуту ориентировочно равно 15.

Предлагается использовать мехатронные пружинные приводы с рекуперацией энергии для возвратно поступательных перемещений [1, 7, 10-12].

Мехатронные пружинные приводы с рекуперацией энергии обладают наименьшими затратами энергии по сравнению со всеми другими типами приводов, имеют наилучшие показатели по удельной мощности (мощность, развиваемая приводом, отнесённая к его весу – Вт/Н). Кроме того, они обладают следующими преимуществами [12]:

1. Хорошая пожароустойчивость и взрывобезопасность;
2. Низкий уровень шума;
3. Высокий срок службы;
4. Высокая надёжность (например, все тормозные системы в грузоподъёмных механизмах имеют пружинное замыкание тормозных колодок);
5. Нечувствительность к перепаду температур;
6. Хорошие динамические режимы.

По максимальному габаритному размеру, вдоль направления перемещений, они могут соперничать с электромеханическими модулями для прямолинейных перемещений с использованием винтовой передачи.

Линейные пружинные приводы [8-10]с рекуперацией энергии имеют меньший линейный габарит в направлении движения по сравнению с актюаторами, пневматическими и гидравлическими цилиндрами, и имеют равные показатели с модулями для линейных перемещений с подвижными столами с электроприводом.

Осознание этих преимуществ позволит разработчикам технологического оборудования существенно расширить применение пружинных рекуперативных приводов, что, в свою очередь, позволит снизить энергопотребление при одновременном снижении массогабаритных характеристик и повышении надёжности.

Вне зависимости от используемого пружинного аккумулятора, предлагаемые мехатронные пружинные приводы являются автоколебательными системами с управляемым выстоем и с подкачкой энергии от дополнительного источника энергии [1, 6, 10-12]. Автоколебательная система с управляемым выстоем (рис. 2) состоит из пружинного аккумулятора, двигателя для компенсации диссипативных потерь, фиксаторов, системы управления с информационно-измерительными компонентами.

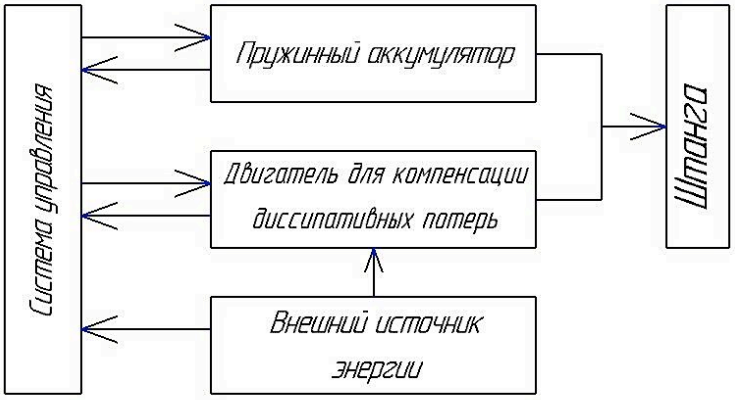


Рисунок 2 – Структурная схема привода

В качестве двигателя для компенсации диссипативных потерь возможно использование стандартных приводов с выходным звеном, совершающим возвратно-поступательное перемещение [11-14] или линейных электродвигателей с ротором, совершающих возвратно-поступательное движение.

Затраты энергии в мехатронных пружинных приводах определяются в основном потерями, связанными в основном с внутренним трением в пружинах [1, 3] и приблизительно в пять раз меньше, чем затраты энергии стандартных классических приводов.

При создании мехатронных пружинных приводов используются стандартные пружины сжатия, производство которых освоено в России. Приводы можно строить по модульному принципу, и с помощью комбинации модулей можно получить приводы с разной выходной мощностью.

Габариты мехатронных пружинных приводов для нефтяных качалок позволяют производить сборку на заводах-изготовителях, размещать в стандартных грузовых контейнерах и устанавливать на месте над устьем скважины при монтаже.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жавнер В.Л., Мацко О.Н., Жавнер М.В., Чжао Вэнь.* Мехатронные пружинные приводы с рекуперацией энергии в технологическом оборудовании: учеб. пособие. – СПБ.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 77 с.

2. *Пелупесси Д.С., Жавнер М.В.* Пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном для шаговых перемещений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2016. №10(679). С. 9-17.

3. *Жавнер В.Л., Мацко О.Н., Жавнер М.В.* Рекуперативные приводы для цикловых перемещений // Deutschland, Saarbrucken, Palmarium Academic Publishing, 2014. – 90 с.

4. *Жавнер М.В., Янь Чуаньчао, Чжао Вэнь.* Мехатронные рекуперативные приводы для шаговых перемещений на базе пневматических цилиндров с возвратными пружинами // Вестник Международной академии холода, 2019. №2. С. 22-28.

5. *Salamandra B.L.* 2017 Analysis of ways to stabilize the position of the label on automatic packaging machines *Problems of mechanical engineering and machine reliability* 2 106-112.

6. *Надеждин И.В., Мочанов А.А.* Динамика мехатронных рекуперативных приводов загрузочных устройств автоматизированных сборочных систем // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева, 2015. №1(32). С. 19–24.

7. *Надеждин И.В.* Исполнительные механизмы цикловых машин-автоматов и мехатронных систем. – Изд.: LAP LAMBERT Academic Publishing, Deutschland, 2015. – 280 с.

8. *Жавнер М.В.* Моментные характеристики пружинных аккумуляторов с выходным поворотным звеном // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. (22–23 июня 2017 г.). - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 450–461.
9. *Жавнер М.В.* Законы движения пружинных приводов на базе пружинных аккумуляторов // Современное машиностроение. Наука и образование, 2018. №5. С. 645-653.
10. *Жавнер В.Л., Жавнер М.В.* Законы движения мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии // Проблемы механики современных машин: Материалы VII Междунар. науч. конф., 2018. С. 48-52.
11. *Zhavner V.L., Matsko O.N.* 2016 Spring drives for reciprocal motion *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* 1 1-5.
12. *Zhavner V.L., Matsko O.N., Zhavner M.V.* 2018 Comparative Analysis of Mechatronic Drives for Reciprocal Motion *International Review of Mechanical Engineering* 12 9 784-789.
13. *Жавнер В.Л., Мацко О.Н.* Пружинные приводы с уравновешиванием для горизонтальных возвратно-поступательных перемещений / Вестник научно-технического развития, 2016. №5(105). С. 12-17.
14. *Жавнер В.Л., Мацко О.Н.* Пружинные приводы с рекуперацией энергии для возвратно-поступательных перемещений // Современное машиностроение. Наука и образование, 2016. №5. С. 645-653.

УДК 621

ЗЛОТНИКОВ Е.Г.,
ЕРШОВ Д.Ю.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РЕЖИМЕ РАЗБЕГА

Аннотация. Статья описывает динамические переходные процессы по моменту в электроприводе технологического оборудования при включении. На основе динамической модели привода с двумя степенями свободы проведен анализ различных этапов режима разбега. Определены характеристики статической составляющей крутящего момента на валу в установившемся режиме и динамической составляющей, вызванной переходным процессом. Предложены пути снижения значимой для работы привода динамической составляющей.

Ключевые слова: динамический момент; момент двигателя; переходные процессы; этап режима разбега; приведенный момент инерции.

ZLOTNIKOV E.G.,
ERSHOV D.Y.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of mechanical engineering

DETERMINING THE TORQUE OF THE PROCESS EQUIPMENT DRIVE IN RUN-UP MODE

Abstract. The article describes dynamic transients by the moment in the electric drive of technological equipment at start-up. On the basis of the dynamic drive model with two degrees of freedom, the different stages of the run-up mode were analyzed. The characteristics of the static component of torque on the shaft in steady mode and the dynamic component caused by the transient process are determined. The ways of reduction of the dynamic component significant for the drive operation are offered.

Key words: dynamic moment; motor torque; transients; run-up mode; reduced moment of inertia.

Надежное функционирование любого технологического оборудования, в том числе металлообрабатывающих станков, возможно при полном учете как статических, так и динамических нагрузок, связанных с изменением режимов работы или колебаниями сил технологического сопротивления. Большое значение имеет анализ динамических переходных процессов в приводе технологических машин, происходящих при изменениях угловой скорости узлов механизмов, которые наиболее выражены в моменты их пуска, остановки или реверсирования.

Используя динамическую модель с двумя степенями свободы (рис. 1), проведем анализ переходного процесса привода по моменту в режиме разбега при скачкообразном подключении якоря двигателя к источнику напряжения. При наличии индуктивности в цепи якоря следует рассматривать совместно электромагнитные и механические переходные процессы. Будем использовать динамическую характеристику двигателя [1]:

$$T_e \dot{M}_E + M_E = \beta_E \omega_0 - \beta_E \omega_E . \quad (1)$$

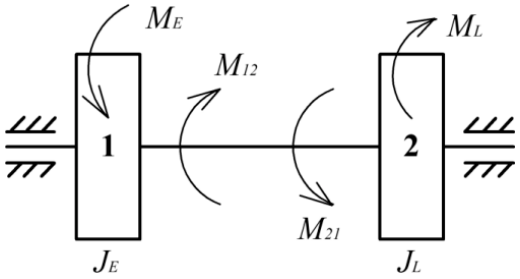


Рисунок 1 – Динамическая модель привода технологического оборудования с двумя степенями свободы

Опираясь на проведенные в работах [2–16] исследования, рассмотрим особенности этапов разбега привода. Электромеханические динамические процессы в приводе описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} J_E\dot{\omega}_E = M_E + M_{12} \\ J_L\dot{\omega}_L = M_{21} - M_L^0 \\ T_e\dot{M}_E + M_E = \beta_E\omega_0 - \beta_E\omega_E \end{cases}, \qquad (2)$$

где J_E, J_L - моменты инерции ротора двигателя и рабочего органа, нагруженного силами технологического сопротивления; T_e - электромагнитная постоянная времени, определяемая индуктивностью и сопротивлением цепи якоря двигателя; M_E - момент двигателя; β_E - модуль статической жесткости; ω_0 - угловая скорость холостого хода двигателя; ω_E - угловая скорость двигателя под нагрузкой.

В первый момент после включения, пока механическая система двигателя еще остается неподвижной ($\omega_E = 0$) до момента времени $t = \tau$, на первом этапе разбега происходят электромагнитные процессы согласно (2). При условии $\dot{\omega}_E = 0$ и $M_{12} = -M_{21}$ из первого уравнения системы (2) получаем $M_{21} = M_E$. С учетом того, момент двигателя M_E экспоненциально возрастает от нулевого значения, крутящий момент на валу привода определяется выражением:

$$M_{21} = M_E = M_L^0 = M_{sc}\left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_e}}\right),$$

длительность первого этапа:

$$\tau = -T_e\, ln\left[\frac{M_{sc} - M_L^0}{M_{sc}}\right], \qquad (3)$$

где M_{sc} - момент короткого замыкания.

При дальнейшем росте $M_E > M_L^0$ на втором этапе происходит разбег механической системы, начиная с момента времени $t > \tau$.

Для определения момента M_{21} на втором этапе режима разбега используем второе уравнение системы (3) при $\dot{\omega}_L = \dot{\omega}_E$:

$$M_{21} = J_L\dot{\omega}_E + M_L^0$$

и зависимость, описывающую разгон двигателя по угловой скорости:

$$\omega_E(t) = Ae^{-\frac{t-\tau}{2T_e}}\, sin\left[\Omega_c(t-\tau) + \psi\right] + \omega_E^0. \qquad (4)$$

Продифференцируем по времени функцию (4):

$$\dot{\omega}_E(t) = \frac{2\omega_E^0}{T_m\sqrt{\frac{4T_e}{T_m} - 1}} e^{-\frac{t-\tau}{2T_e}}\, sin\,\Omega_c(t-\tau)$$

и, принимая во внимание, что $\omega_E^0 = \omega_0 M_L^0 \beta_E^{-1} = \left(M_{sc} - M_L^0\right)\beta_E^{-1}$, получим:

$$M_{21}(t) = J_L \cdot \frac{2}{T_e} \cdot \frac{\left(M_{sc} - M_L^0\right)}{\beta_E} \cdot \frac{e^{-\frac{t-\tau}{2T_e}}}{\sqrt{\frac{4T_e}{T_m} - 1}} \sin\Omega_c (t-\tau) + M_L^0.$$

Учитывая, что $T_m = \left(J_E + J_L\right)\beta_E^{-1}$, окончательно получим:

$$M_{21}(t) = \frac{J_L}{J_E + J_L} \cdot \frac{2\left(M_{sc} - M_L^0\right)}{\sqrt{\frac{4T_e}{T_m} - 1}} \cdot e^{-\frac{t-\tau}{2T_e}} \sin\Omega_c (t-\tau) + M_L^0. \quad (5)$$

Функция (5) определяет переходный процесс привода по крутящему моменту на валу на втором этапе режима разбега привода. Представим момент M_{21} в виде суммы динамической составляющей M_{21}^d и статической составляющей M_{21}^s:

$$M_{21} = M_{21}^d + M_{21}^s.$$

Если статическая составляющая определяется силами технологического сопротивления в установившемся режиме $M_{21}^s = M_L^0$, то динамическая составляющая обусловлена переходным процессом привода:

$$M_{21}^d(t) = \frac{J_L}{J_E + J_L} \cdot \frac{2\left(M_{sc} - M_L^0\right)}{\sqrt{\frac{4T_e}{T_m} - 1}} \cdot e^{-\frac{t-\tau}{2T_e}} \sin\Omega_c (t-\tau). \quad (6)$$

Динамический момент M_{21}^d определяет дополнительную нагрузку на звенья механизма и, как правило, в большинстве случаев оказывается существенно больше, чем статическая составляющая M_{21}^s. Поэтому одной из важных задач конструктора при проектировании привода технологического оборудования является снижение динамической составляющей момента.

Определим наибольшее значение момента M_{21}^d из условия $\dot{M}_{21}^d = 0$. Продифференцируем по времени выражение (6) по времени и приравняем производную к нулю, получим:

$$\dot{M}_{21}^d(t) = \frac{J_L}{J_E + J_L} \cdot \frac{2\left(M_{sc} - M_L^0\right)}{\sqrt{\frac{4T_e}{T_m} - 1}} \cdot$$

$$\cdot \left[-\frac{1}{2T_e} e^{-\frac{t-\tau}{2T_e}} \sin\Omega_c (t-\tau) + e^{-\frac{t-\tau}{2T_e}} \cdot \Omega_c \cos\Omega_c (t-\tau) \right] = 0.$$

После упрощения уравнение принимает следующий вид:

$$-\frac{1}{2T_e} \sin\Omega_c (t_{ext} - \tau) + \Omega_c \cos\Omega_c (t_{ext} - \tau) = 0.$$

Решение последнего уравнения имеет следующий вид:

$$t_{ext} = \frac{2T_e}{\sqrt{\frac{4T_e}{T_m} - 1}} arctg \sqrt{\frac{4T_e}{T_m} - 1} + \tau = \tilde{t}_{ext} + \tau,$$

где t_{ext} - момент времени, соответствующий экстремальному значению функции $M_{21}^d(t)$.

Обозначим:

$$\tilde{t}_{ext} = \frac{2T_e}{\sqrt{\frac{4T_e}{T_m} - 1}} arc\,tg \sqrt{\frac{4T_e}{T_m} - 1}.$$

Тогда:

$$M_{21}^d\left(t - t_{ext}\right) = max\, M_{21}^d = \frac{J_L}{J_E + J_L} \cdot \frac{2\left(M_{sc} - M_L^0\right)}{\sqrt{\frac{4T_e}{T_m} - 1}} \cdot e^{-\frac{\tilde{t}_{ext}}{2T_e}} sin\,\Omega_c \tilde{t}_{ext}. \quad (7)$$

Анализируя выражение (7), можно сделать вывод, что одним из путей снижения $max\, M_{21}^d$ является уменьшение приведенного момента инерции J_L. Решение этой задачи можно получить, во-первых, за счет рационального конструирования, обеспечивающего уменьшение масс и моментов инерции деталей механизмов привода, во-вторых, за счет правильного деления общего передаточного отношения между ступенями передаточного или исполнительного механизмов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ershov D.Y.,* Lukyanenko *I.N.* 2020 Dynamic model of technological equipment drive with S DOFs *Smart Innovation, Systems and Technologies* 154 171-182.
2. *Ершов Д.Ю.* Определение собственных частот колебаний трехмассовых динамических систем / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018: сб. тезисов международной научно-практической конференции / под ред. Максарова В.В. // СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. Т.1, С. 25-25.
3. *Ершов Д.Ю.* Применение трехмассовых динамических моделей при исследовании колебательных процессов в электромеханических системах / Д.Ю.Ершов, И.Н. Лукъяненко // Современные проблемы теории машин, 2016. № 4, С. 71-74.
4. *Ershov D.Y., Zlotnikov E.G., Nestorovski B.* 2019 Own fluctuations of technological systems *Journal of Physics. Conf. Series*, 1399(2), 22055.
5. *Максаров В.В.* Моделирование динамических процессов механической обработки в среде NILabVIEW для совершенствования технологии изготовления деталей горных машин / В.В. Максаров, Д.А. Осминко, А.Е. Ефимов // Металлообработка, 2018. №1. С. 21-28.
6. *Efimov A.E., Maksarov V.V., Timofeev D.Y.* 2018 Modeling dynamic processes at stage of formation of parts previously subjected to high-energy laser effects *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327(2) 22026.
7. *Maksarov V.V., Olt J.* 2017 Dynamic stabilization of machining process based on local metastability in controlled robotic systems of CNC machines *Journal of Mining Institute* 226 446-451.
9. *Maksarov V.V., Krasnyy V.A., Viushin R.V.* 2018 Simulation of dynamic processes when machining transition surfaces of stepped *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327 022047.
10. *Блехман И.И.* Механика и вибрационная реология (теория и приложения). - М.: Физматлит, 2018. - 752 с.
11. *Алексеева Л.Б.* Определение характеристик переходных режимов при управлении приводом машины / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2016. №4. С. 18-25.
12. *Vasilkov D.V., Nikitin A.V., Cherdakova V.S.* 2018 Dynamic system stability when machining with cutter *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 194(2) 022045.
13. *Shvetsov, I.V.*, *Vasilkov D.V., Tarikov I.Ya.* 2019 Vibration stability criterion in assessing the dynamic quality and limiting capabilities of machine tools *IOP Conference Series: Materials*

Science and Engineering 656(1) 012049.
14. *Федоренко И.Я.* Динамические свойства двухмассной вибрационной технологической машины / И.Я. Федоренко, А.А. Гнездилов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2016. №3(137). С. 179-183.
15. *Грудинин. В.Г.* Динамический анализ гасителя угловых колебаний / Вестник ИрГТУ, 2012. №4(63). С. 33-39.
16. *Поветкин В.В.* Разработка динамической модели привода шаровой мельницы с учетом демпфирующих свойств его элементов / В.В. Поветкин, М.Е. Исаметова, И.Н. Исаева, А.З. Букаева // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2018. № 5. С. 184–192.

УДК 621.92:621.99:658.512

КЕКСИН А.И.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения

АЛГОРИТМ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ФУНКЦИОНАЛЬНО РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ ИЗДЕЛИЯ

Аннотация. В представленной статье раскрыта значимость применения алгоритмов для машиностроительной отрасли и показан пример составления алгоритма по результатам научно-исследовательской работы для разработки технологии магнитно-абразивной обработки функционально различных участков изделия.

Ключевые слова: алгоритм разработки технологии; функционально различные участки; магнитно-абразивная обработка; режущий инструмент, научно-исследовательская работа.

KEKSIN A.I.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of mechanical engineering

ALGORITHM FOR DEVELOPING TECHNOLOGY FOR MAGNETIC-ABRASIVE FINISHING OF FUNCTIONALLY DIFFERENT PARTS OF THE PRODUCT

Abstract. The article reveals the significance of applying algorithms for the machine-building industry and shows an example of compiling an algorithm based on the results of research work for the development of technology for magnetic-abrasive finishing of functionally different parts of the product.

Keywords: technology development algorithm; functionally different sections; magnetic-abrasive finishing; cutting tools, research work.

Проблеме технологического обеспечения и повышения качества машиностроительных изделий в настоящее время уделяется достаточно большое внимание[1-2, 4, 13-16]. Вызвано это в первую очередь тем, что эффективно решаемые задачи в данной проблеме позволяют повысить в целом уровень развития машиностроительной отрасли, что положительно сказывается на общем благосостоянии государства.

Одной из основных задач в проблеме технологического обеспечения и повышения качества машиностроительных изделий является разработка новых и совершенствование существующих технологий обработки с целью формирования улучшенного состояния подвергаемых обработке поверхностей [3]. Разработка или совершенствование технологий обработки машиностроительных изделий осуществляется посредством научно-исследовательских работ, в результате которых устанавливаются технологические факторы (режимные параметры) процесса обработки, способствующие с минимальными затратами улучшить состояние обрабатываемых поверхностей.

На окончательной стадии разработки или совершенствования технологии, когда все теоретические и эмпирические зависимости установлены и технологические факторы (режимные параметры) процесса обработки выявлены, следует определить последовательность действий для решения подобных задач. Такой последовательный порядок действий принято называть алгоритмом. Составленный алгоритм позволяет в последующем при видоизменении задачи, к примеру при изменении материала изделия,

следуя четким предписаниям с меньшей трудоемкостью разработать новую или усовершенствовать существующую технологию.

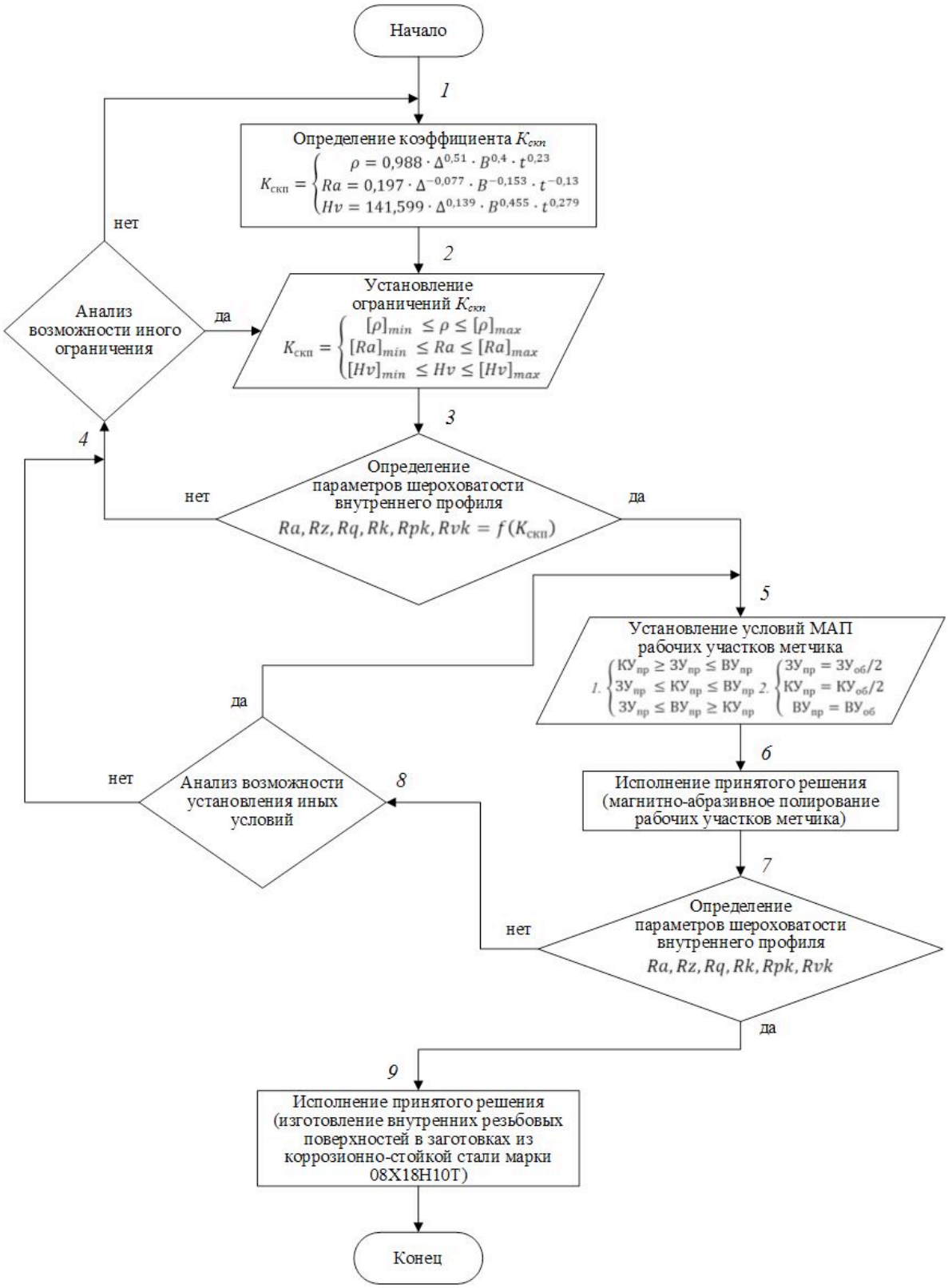


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма для разработки технологии магнитно-абразивной обработки функционально различных участков изделия [9]

Примером составленного алгоритма по результатам научно-исследовательской работы [9], отраженной в статьях [5-7, 9-12], может служить алгоритм для разработки технологии магнитно-абразивной обработки функционально различных участков изделия

(схема алгоритма представлена на рис. 1). Представленный алгоритм необходим для определения технологических факторов (зернистость абразивного материала, магнитная индукция, время обработки) магнитно-абразивной обработки при формировании рациональных качественных показателей функционально различных участков изделия. В данном случае под функционально различными участками изделия имеются в виду рабочие участки режущего инструмента для нарезания внутренних резьб – метчика [9].

Подробное описание каждого действия алгоритма для разработки технологии магнитно-абразивной обработки функционально различных участков изделия(метчика)выглядит следующим образом [9]:

1. Первоначально проводится определение коэффициента, отвечающего за состояние контактных поверхностей зубьев метчика (радиус скругления, шероховатость и микротвердость режущих кромок). Процесс определения осуществляется путем проведения экспериментальных исследований магнитно-абразивной обработки метчика в широком диапазоне технологических факторов (зернистость абразивного материала, магнитная индукция, время обработки), в результате которых строится система уравнений вида:

$$K_{\text{скп}} = \begin{cases} \rho = 0{,}988 \cdot \Delta^{0{,}51} \cdot B^{0{,}4} \cdot t^{0{,}23} \\ Ra = 0{,}197 \cdot \Delta^{-0{,}077} \cdot B^{-0{,}153} \cdot t^{-0{,}13}, \\ Hv = 141{,}599 \cdot \Delta^{0{,}139} \cdot B^{0{,}455} \cdot t^{0{,}279} \end{cases}$$

где $K_{скп}$ – коэффициент, отвечающий за состояние контактных поверхностей зубьев метчика; ρ – радиус скругления режущих кромок; Ra – шероховатость режущих кромок; Hv -микротвердость режущих кромок; Δ – зернистость абразивного материала; B – магнитная индукция; t – время обработки.

2. Устанавливаются технологические ограничения коэффициента, отвечающего за состояние контактных поверхностей зубьев метчика, в рамках которых будет производиться поиск решения:

$$K_{\text{скп}} = \begin{cases} [\rho]_{min} \le \rho \le [\rho]_{max} \\ [Ra]_{min} \le Ra \le [Ra]_{max}, \\ [Hv]_{min} \le Hv \le [Hv]_{max} \end{cases}$$

где $[\rho]_{min}$,$[\rho]_{max}$, $[Ra]_{min}$, $[Ra]_{max}$, $[Hv]_{min}$, $[Hv]_{max}$ – нижние и верхние пределы изменений радиуса скругления, шероховатости и, соответственно, микротвердости режущих кромок метчика.

3. Определяются параметры шероховатости внутреннего резьбового профиля в зависимости от состояния контактных поверхностей зубьев метчика, сформированного при различных технологических факторах магнитно-абразивнойобработки. По результатам проведенных исследований строятся зависимости вида:

$$Ra, Rz, Rq, Rk, Rpk, Rvk = f(K_{\text{скп}}).$$

В случае удовлетворения полученными параметрами шероховатости боковых сторон внутреннего резьбового профиля происходит переход к 5 этапу данного алгоритма, при неудовлетворительных результатах к 4 этапу. Оценка об удовл./неудовл. осуществляется с условием, что метчик, подготовленный магнитно-абразивной обработкой в соответствии с функциональными особенностями его рабочих участков, улучшает параметры шероховатости боковых сторон внутреннего резьбового профиля в 1,3-1,5 раза по сравнению с метчиком, который был обработан в наилучших условиях магнитно-абразивной обработки в рассматриваемом диапазоне технологических факторов.

4. При неудовлетворительных значениях параметров шероховатости боковых сторон внутреннего резьбового профиля производится анализ возможности установления иных технологических ограничений коэффициента, отвечающего за состояние контактных поверхностей зубьев метчика. В случае возможности, повторяются этапы 2 и 3. Если не имеется возможности ограничения, то производится переход к 1 этапу.

5. Определяются условия формирования качественных показателей на каждом из

функционально различных участков метчика при прямом и обратном вращениях последнего в магнитно-абразивной массе. Условия устанавливаются в соответствии с функциональными особенностями функционально различных участков метчика.

Качественные показатели на каждом рабочем участке при магнитно-абразивной обработке с прямым вращением метчика определяются относительно рабочих участков друг к другу, а при обратном вращении – относительно показателей, сформированных при прямом вращении метчика в магнитно-абразивной массе. Условия записываются в следующем виде:

$$1.\begin{cases} КУ_{пр} \geq ЗУ_{пр} \leq ВУ_{пр} \\ ЗУ_{пр} \leq КУ_{пр} \leq ВУ_{пр}; \\ ЗУ_{пр} \leq ВУ_{пр} \geq КУ_{пр} \end{cases} \quad 2.\begin{cases} ЗУ_{пр} = ЗУ_{об}/2 \\ КУ_{пр} = КУ_{об}/2, \\ ВУ_{пр} = ВУ_{об} \end{cases}$$

где *1* и *2* – условия, которые соответствуют прямому и обратному вращению метчика в магнитно-абразивной массе; $ЗУ_{пр}$,$КУ_{пр}$, $ВУ_{пр}$, $ЗУ_{об}$, $КУ_{об}$, $ВУ_{об}$ – заборный, калибрующий и ведущий рабочие участки метчика при прямом и обратном вращениях в процессе магнитно-абразивной обработки.

6. Производится формирование качественных показателей на каждом функционально различном участке метчика при помощи разработанного способа магнитно-абразивной обработки [патент].

7. Осуществляется изготовление внутреннего резьбового профиля метчиком, подготовленным магнитно-абразивной обработкой в соответствии с функциональными особенностями его рабочих участков, и производится контроль параметров шероховатости внутренних резьбовых поверхностей. При неудовлетворении полученными результатами необходимо перейти к 8 этапу настоящего алгоритма, при удовлетворении к 9 этапу.

8. Проводится анализ возможности установления иных условий формирования качественных показателей на каждом из рабочих участков метчика при прямом и обратном вращениях последнего в магнитно-абразивной массе. В случае возможности, повторяются этапы 5, 6 и 7. Если не имеется возможности установления иных условий, то осуществляется переход к 4 этапу.

9. При удовлетворении полученными значениями параметров шероховатости боковых сторон внутреннего резьбового профиля производится исполнение принятого решения или осуществляется процесс механической обработки по изготовлению внутренних резьбовых поверхностей метчиками, подготовленными технологией магнитно-абразивной обработки в соответствии с функциональными особенностями его рабочих участков.

Таким образом, по результатам проведенной научно-исследовательской работы[9] был составлен алгоритм для разработки технологии магнитно-абразивной обработки функционально различных участков изделия (метчика), который позволяет определить технологические факторы (зернистость абразивного материала, магнитная индукция, время обработки) магнитно-абразивной обработки при формировании рациональных качественных показателей на каждом функционально различном участке изделия (метчика), предназначенного для изготовления внутренних резьбовых поверхностей в заготовках из коррозионно-стойкой стали марки 08Х18Н10Т. Составленный алгоритм может быть распространенна подготовку метчиков из других материалов, а также при изменении материала, в котором планируется изготовить внутренние резьбовые поверхности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акулович Л.М.* Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л.М. Акулович, Л.Е Сергеев, В.Я. Лебедев // Минск: БГАТУ, 2012. - 316 с.

2. *Акулович Л.М.* Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев // Минск: БГАТУ, 2013. - 372 с.
3. *Барон Ю.М.* Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. - Л: Машиностроение, 1986. - 176 с.
4. *Ефимов А.Е.* Совершенствование технологии механической обработки титановых сплавов посредством применения предварительного пластического воздействия / А.Е. Ефимов, В.В. Максаров, А.Ю. Важенин // Металлообработка, 2019. №3. С. 20–26.
5. *Keksin A.I.*, Maksarov V.V., Olt J.J. 2018 Internal thread cutting process improvement based on cutting tools treatment by composite powders in a magnetic field *Journal of Silicate Based and Composite Materials* 70(4) 128-131.
6. *Maksarov V.*, *Keksin A.* 2018 Forming conditions of complex-geometry profiles in corrosion-resistant materials *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 194 062016.
7. *Maksarov V.*, *Keksin A.* 2018 Technology of magnetic-abrasive finishing of geometrically complex products *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327 042068.
8. *Кексин А.И.* Пат. 2626124 Российская Федерация, МПК B24B 31/112 Способ магнитно-абразивного полирования рабочих участков метчика / А.И. Кексин, В.В. Максаров // Заявитель и патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» – № 2016114202; заявл. 12.04.2016; опубл. 21.07.2017. Бюл. № 21 – 13 с.: ил.
9. *Кексин А.И*. Повышение качества внутренних резьбовых поверхностей на основе предварительного магнитно-абразивного полирования сложнопрофильного инструмента: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / СПб. 2017. - 200 с.
10. *Кексин А.И.* Технологическое обеспечение шероховатости резьбовых поверхностей посредством предварительного магнитно-абразивного полирования метчика / А.И. Кексин, В.В. Максаров // Металлообработка, 2018. №2(104). С. 35-40.
11. *Кексин А.И.* Технологические особенности магнитно-абразивной обработки в условиях цифровых технологий. / А.И. Кексин, В.В. Максаров, И.А. Филипенко, И.А. Бригаднов // Металлообработка, 2019. № 4(112). С. 3-10.
12. *Кексин А.И.* Технологическое повышение качества сложнопрофильных поверхностей методом магнитно-абразивного полирования / А.И. Кексин, В.В. Максаров // Металлообработка, 2017. №1(97). С. 47-57.
13. *Красный В.А.* Триботехнические характеристики деталей горных машин с регулярной микрогеометрией поверхности / В.А. Красный, В.В. Максаров // Металлообработка, 2016. №1. С. 29-35.
14. *Красный В.А*. Применение метода направленного затвердевания для повышения качества трубчатых заготовок из различных чугунов / В.А. Красный, В.Ф. Бевза, В.П. Груша // Металлург, 2018. №6. С. 36-44.
15. *Максаров В.В*. Технологическое обеспечение качества направляющих металлорежущих станков / В.В. Максаров, И.В.Горшков, А.Д. Халимоненко, И.А Бригаднов // Металлообработка, 2019. №112(4). С 59 – 67.
16. *Тимофеев Д.Ю.* Повышение точности изготовления прецизионных поверхностей детали шток гидроцилиндров / Д.Ю. Тимофеев, А.Е. Ефимов // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов IV международной научно-практической конференции, 2016. Т.3. С. 142-145.

УДК 62-242.3: 621.2.082.18

КРАСНЫЙ В.А.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ МАСЛОСЪЕМНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ С ПИРОЛИТИЧЕСКИМ КАРБИДОХРОМОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

Аннотация. Рассмотрены современные конструкции маслосъемных поршневых колец двигателей внутреннего сгорания, включая кольца коробчатого сечения с экспандером. Приведены результаты триботехнических испытаний образцов, показавшие эффективность пиролитического карбидохромового покрытия в сравнении с гальваническим покрытием хромом, при этом в одних и тех же условиях износ образцов с пиролитическим хромированием в 3,5…4 раза меньше. Показано, что пиролитическое карбидохромовое покрытие является перспективным для поршневых маслосъемных колец.

Ключевые слова: износостойкие покрытия; поршневые маслосъемные кольца; электролитическое хромирование; пиролитическое карбидохромовое покрытие; триботехнические испытания.

KRASNYY V.A.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of mechanical engineering

PYROLYTIC CARBIDOCHROME PLATED PISTON RINGS WEAR SIMULATION

Abstract. Modern designs of oil removable piston rings of internal combustion engines, including box-section rings with expander are considered. The results of tribotechnical tests of samples which have shown efficiency of pyrolytic carbidochrome covering in comparison with galvanic covering with chrome are resulted, thus in the same conditions deterioration of samples with pyrolytic chrome covering is 3,5...4 times less. It is shown that pyrolytic carbidochrome coating is promising for piston oil rings.

Keywords: wear-resistant coatings; piston oil rings; electrolytic chromium plating; pyrolytic carbidochrome coating; tribotechnical tests.

Работоспособность деталей цилиндропоршневой группы (поршневых колец, гильз, поршней) во многом определяет надежность и долговечность работы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в целом. При этом следует отметить, что именно износостойкость поршневых колец чаще всего является лимитирующим фактором долговечности работы и сроком капитального ремонта двигателя. В настоящее время все сильнее на первый план выступают требования к высокой экономичности ДВС, в частности, экономия топлива, повышение срока службы и снижение расхода масла.

В связи с этим к поршневым кольцам предъявляются высокие требования как с точки зрения сокращения поломок, прижогов и расхода масла, так и увеличение срока службы, снижения трения и повышение газонепроницаемости.

Согласно экспертным оценкам [1-3] на работу трения поршневых колец затрачивается до 50% от всей работы трения ДВС. Повышение износостойкости деталей машин и, в частности, деталей цилиндропоршневой группы ДВС, включая маслосъемные

кольца, основано в большой степени на использовании технологических мероприятий. К таким мероприятиям следует отнести как совершенствование технологии изготовления и применение современных перспективных материалов и покрытий [4…11], так и применение современных технологий, в том числе технологий вакуумного нанесения карбидообразующих покрытий [12…15].

Кольцевое уплотнение состоит из комплекта колец: первого - компрессионного, одного или двух минутных и маслосъемного (рис. 1). Наиболее интенсивному изнашиванию подвергается верхнее (компрессионное) кольцо, которое эксплуатируется в наиболее жестких условиях в режиме полусухого трения и высоких температур. В то же время по данным ряда исследователей доля мощности трения маслосъемных колец составляет от 30 до 60% общего трения пакета поршневых колец. Маслосъемные поршневые кольца предназначены для снятия излишков масла со стенок гильз цилиндров и сброса его в картер двигателя. В современных конструкциях двигателей используются маслосъемные кольца коробчатого сечения с двумя узкими рабочими кромками и внутренним расширителем (экспандером) для создания необходимой упругости кольца (рис. 2).

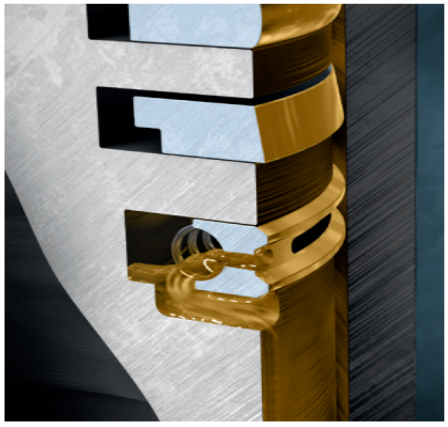


Рисунок 1 – Кольцевое уплотнение

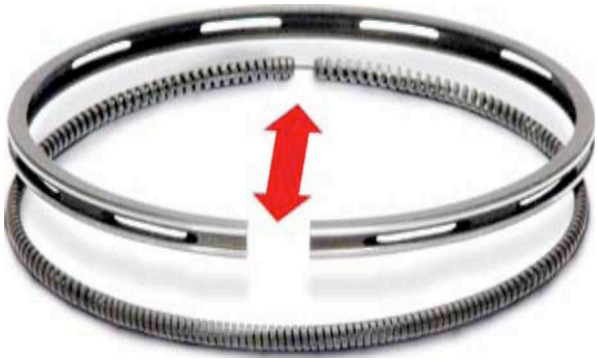


Рисунок 2 - Схема конструкции поршневого маслосъемного кольца с экспандером

Узость рабочих кромок (до 0,6 мм) в сочетании со значительным давлением прижима их к стенкам цилиндра под действием экспандера (0,6…1,2 МПа) создают условия, приводящие к быстрому износу в процессе эксплуатации, что применительно к маслосъемным кольцам проявляется в повышенном расходе масла на угар.

Для повышения износостойкости рабочих кромок таких колец традиционно используется электролитическое покрытие твердым хромом. Однако помимо высокой энергоемкости, хромирование рабочих кромок (скребков) маслосъемного кольца представляет серьезные технологические трудности. Для получения качественного покрытия необходимо обеспечить особо жесткое соблюдение условий процесса подготовки поверхностей и режимов хромирования. Кроме того, следует учитывать также склонность к наводораживанию и образованию дендритов в процессе электролитического хромирования, а также сложность последующего прорезания пазов для сброса масла. Определенные трудности представляет и обработка после хромирования. Так, при хромировании возникает необходимость изолировать поверхность между кромками для обеспечения последующего фрезерования дренажных пазов, так как такая обработка по хромированной поверхности нецелесообразна из- за быстрого износа фрез. Прорезание же дренажных пазов до хромирования приводит к неравномерному хромированию рабочей поверхности.

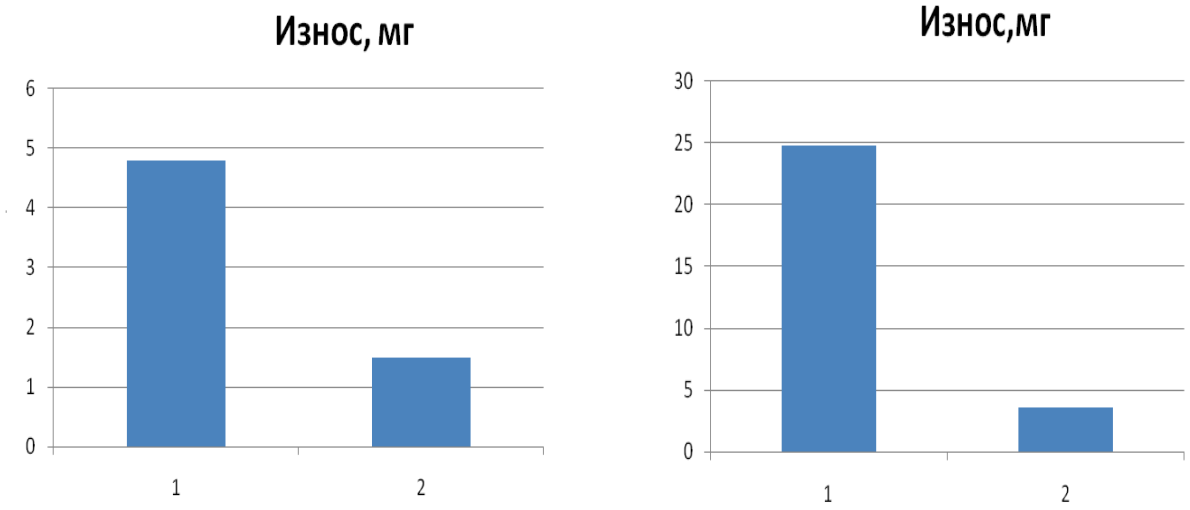
В настоящей работе предложено применение покрытие маслосъемных колец на основе карбида хрома, наносимого методом газофазного пиролиза, а также приведены

результаты лабораторных триботехнических испытаний образцов с покрытием электролитическим хромом и пиролитическим карбидохромовым покрытием.

Процесс нанесения пиролитических хромовых покрытий проводится в вакууме путем разложения паров смеси хроморганических соединений (промышленно выпускаемая жидкость «Бархос») при температуре 400…450 °С и давлении 2×10^{-3} МПА. Получаемое покрытие состоит в основном из карбида хрома с брутто-формулой Cr_7C_3 и характеризуется высокой адгезией к материалу подложки (30 МПА и более), микротвердостью до 20…25 ГПа.

В коррозионных средах пиролитический хром ведет себя практически как «благородный металл», а его износостойкость значительно превышает износостойкость гальванического хрома. Важным для эксплуатации свойством является стойкость покрытий к нагреву. В результате нагрева твёрдость пиролитических карбидохромовых покрытий, полученных осаждением из паровой фазы, не только не падает, как в случае гальванических покрытий, а повышается. Решающим технологическим фактором, посредством которого можно регулировать износостойкость и микротвёрдость покрытия, является температура подложки. При небольшом количестве примесей (1…3 %) при температуре ~ 500 °С образуются плёнки покрытия, имеющие основную слоистую микроструктуру, содержащую отдельные включения – глобулы (монокристаллы Cr7C3), размер которых изменяется в зависимости от температуры и времени осаждения в диапазоне от 5 до 80 мкм.

Триботехнические испытания производились на машине трения СМЦ-2 по схемам «колодка – ролик» и «ролик-ролик».



а б

Рисунок 3 – Результаты усредненных результатов лабораторных испытаний износа образцов:
а - роликов с покрытием гальваническим (1) и пиролитическим (2) хромом;
б – контробразцов из чугуна, работавших в паре с соответствующими роликами

В первой серии испытаний оценивалась сравнительная интенсивность изнашивания образцов «колодка– ролик» (с покрытием на вращающемся ролике, колодка без покрытия, материал образцов серый чугун) в среде смазочного масла МС-20. Перед нанесением покрытия ролик и колодка прирабатывались. Толщина покрытия для гальванического хрома составляла 60…80 мкм, для пиролитического – 8…10 мкм. Температура контакта, оцениваемая по показателям термопары, достигала 96…100 °С, что соответствует условиям эксплуатации поршневых колец. Продолжительность испытаний каждой пары образцов достигала 5 часов, при этом на начальном этапе проводилось ступенчатое

нагружение (от 0,5 до 1,2 МПа) с постепенным нарастанием частоты вращения ролика (от 700 до 1200 мин$^{-1}$). Износ образцов определялся взвешиванием на электронных весах с ценой деления 0,1 мг.

Во второй серии испытаний по схеме «ролик-ролик» проводилось сравнение интенсивности изнашивания комбинированной поверхности «чугун – карбидохром» в сравнении с чисто чугунной поверхностью. В первой группе пар трения покрытие из пиролитического хрома имел только неподвижный образец, во второй группе использовались ролики из чугуна без покрытия. Определение сравнительного износа проводилось с помощью микроскопа МПБ-3 путем измерения ширины выработанной на поверхности неподвижного ролика канавки.

При данной схеме трения в процессе изнашивания на неподвижном образце образуется канавка износа. С целью моделирования процесса изнашивания для измерения и сравнения площади канавки износа была разработана специальная методика.

За критерий износа при испытаниях образцов с не постоянной геометрией контакта принималась площадь пятна износа, образовавшаяся на образце через заданное время испытаний (60 мин). При этом очевидно, что наилучший во фрикционном отношении материал должен иметь наименьшую площадь пятна износа при прочих равных условиях испытаний. Время испытания выбиралось таким, чтобы достигалась возможность получения площади пятна износа, которая могла быть с достаточной точностью измерена с помощью оптического инструментального микроскопа с ценой деления 0,01 мм.

Анализ полученных результатов показывает (рис. 3), что в одних и тех же условиях износ образцов с пиролитическим хромированием в 3,5…4 раза меньше, чем с гальваническим. При этом значительно (в 5…10 раз) снижается и износ сопрягаемого контробразца, что позволяет моделировать для реальных условий и снижение износа гильзы цилиндра в паре с кольцом. Подобное явление может объясняться отсутствием дендритов на поверхности пиролитического хрома и меньшей склонностью к абразивному изнашиванию.

Таким образом, испытания образцов маслосъемных колец с пиролитическим карбидохромовым покрытием показали, что они превосходят по триботехническим показателям образцы, которые хромированы электролитическим способом. Использование предложенной технологии является перспективным для поршневых маслосъемных колец, упрощает технологический процесс их изготовления и значительно снижает его энергоемкость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мяконьков М.Б.* Сравнительные исследования способов нанесения покрытий на поршневые кольца для уменьшения их износа / Металлообработка, 2010. №3. С. 36-39.
2. *Кравченко И.Н.* Обеспечение надежности адгезионной связи плазменных покрытий на поршневых кольцах ДВС с учетом их теплового и термонапряженного состояния / И.Н. Кравченко, Е.М. Бобряшов, А.Ф. Пузряков // Международный журнал экспериментального образования, 2013. №10. С. 358-361.
3. *Загребин Г.Г.* Расчет формы поршневых колец в свободном их состоянии / Автомобильная промышленность, 2014. №10. С. 13-15.
4. *Максаров В.В*. Технологические особенности магнитно-абразивной обработки в условиях цифровых технологий / В.В. Максаров, А.И. Кексин, И.А. Филипенко, И.А. Бригаднов // Металлообработка, 2019. №4(112). С. 3-10.
5. *Максаров В.В.* Технологическое обеспечение качества направляющих металлорежущих станков / В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко, И.В. Горшков, И.А. Бригаднов // Металлообработка, 2019. № 4(112). С. 59-67.
6. *Максаров В.В.* Совершенствование технологии механической обработки титановых сплавов посредством применения предварительного пластического воздействия /

В.В. Максаров, А.Е.Ефимов, А.Ю. Важенин // Металлообработка, 2019. №3(111). С. 20-26.
7. *Халимоненко А.Д.* Точность обработки при точении заготовок режущим инструментом, оснащенным сменными керамическими пластинами / А.Д. Халимоненко, Р.В. Вьюшин // Записки горного института, 2014. Т.209. С. 99-103.
8. *Ershov D.Y., Zlotnikov E.G., Nestorovski B.* 2019 Own fluctuations of technological systems *Journal of Physics. Conf. Series*, 1399(2), 22055.
9. *Mavliutov A.R., Zlotnikov E.G.* 2018 Optimization of cutting parameters for machining time in turning process *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 327(4) 042069.
10. *Тимофеев Д.Ю.* Повышение качества изготовления деталей из титановых сплавов с применением метода предварительного локального пластического деформирования / Д.Ю. Тимофеев, Е.В.Кошелева // В сборнике: Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017 Сборник научных трудов международной научно-технической конференции, 2017. С. 302-305.
11. *Krasnyy V., Maksarov V., Olt J.* 2016 Increase of wear and fretting resistance of mining machinery parts with regular roughness patterns *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium* 151-156.
12. *Красный В.А.* Оценка влияния шероховатости поверхности на повышение прочности сцепления износостойкого напыляемого покрытия / В.А. Красный, В.В. Максаров // Металлообработка, 2014. №5. С. 47-51.
13. *Ольт Ю.* Обеспечение адгезионной прочности газотермических покрытий поршневых колец двигателей карьерного транспорта / Ю. Ольт, В.В. Максаров, В.А. Красный // Записки Горного института, 2018. Т.229. С. 77-83.
14. *Maksarov V.V., Krasnyy V.A.* 2017 The formation of surface roughness of piston rings for the purpose of improving the adhesion of wear-resistant coatings *Key Engineering Materials* 736 73-78.
15. *Ильин В.А.* Пиролитическое карбидохромовое покрытие (технология, оборудование, свойства) / В.А. Ильин, А.В. Панарин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. Т.13. №4(2). С. 357-360.

УДК 621.91.01

ЛАРИОНОВА Т.А.,
ЛЮБОМУДРОВ С.А.,
ЛАРИОНОВ Е.О.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ТОЧЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ41

Аннотация. В статье представлена разработанная математическая модель образования погрешностей при точении титановых сплавов, учитывающая тепловые деформации и размерный износ режущего инструмента, упругие деформации технологической системы. На основе математической модели описана методика определения рациональных режимов резания и геометрии режущего инструмента при точении нового труднообрабатываемого титанового сплава ВТ41, обеспечивающая необходимую точность размеров и качество поверхностного слоя детали.

Ключевые слова: титановые сплавы, точность размеров, качество поверхностного слоя, математическая модель, режимы резания, погрешности обработки, температурное удлинение резца, износ инструмента.

LARIONOVA T.A.,
LYUBOMUDROV S.A.,
LARIONOV E.O.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

MATHEMATICAL MODEL OF ERROR FORMATION WHEN TURNING PARTS MADE OF TITANIUM ALLOY VT41

Abstract. The article presents a developed mathematical model of error formation during turning of titanium alloys , which takes into account thermal deformations and dimensional wear of the cutting tool, elastic deformations of the technological system. Based on a mathematical model, a method is described for determining rational cutting modes and cutting tool geometry when turning a new hard-to-process titanium alloy VT41, which provides the necessary dimensional accuracy and quality of the surface layer of the part.

Key words: titanium alloys, dimensional accuracy, surface layer quality, mathematical model, cutting modes, processing errors, temperature elongation of the cutter, tool wear.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время появляется много новых жаропрочных сплавов на основе титана. Благодаря своим свойствам титановые сплавы широко используют в машиностроительных производствах, в том числе при производстве оборудования для горнодобывающей промышленности. Они обладают высокой механической прочностью, которая сохраняется при высоких температурах, коррозионной стойкостью, удельной прочностью и малой плотностью [1].Ответственные детали из титановых сплавов (диски, втулки, валы, задвижки и т.д.) в эксплуатационных условиях подвержены воздействию значительных вибрационных нагрузок. При изготовлении деталей из титановых сплавов возникают проблемы, связанные с их механической обработкой резанием, так как

большинство титановых сплавов являются труднообрабатываемыми. Обрабатываемость металлов резанием имеет принципиальное значение для рационального выбора режимов резанием [2]. Уникальные свойства титановых сплавов, проблемы при механической обработке этих материалов и возможные пути их решения широко представлены в научной литературе [3-10].

Во время механической обработки титановых сплавов образуется нарост на режущем клине инструмента, который фактически приводит к процессу резания, протекающему как в паре титан – титан [11], что приводит к интенсивному износу режущего инструмента. В результате возникают высокие температуры при обработке: от 1100 до 1200 °С, увеличиваются значения сил резания *P* [11].

Для обеспечения качества изготовления деталей из титановых сплавов необходимо использовать соответствующее оборудование, рациональные режимы резания и геометрию режущего инструмента [12], которые позволяют получить требуемую точность размеров и высотные параметры шероховатости поверхности [13].

Для этого необходимо разработать математическую модель образования погрешностей, которая позволит на начальном этапе технологического процесса моделировать погрешности [14-16] и выбрать рациональные режимы резания, обеспечивающие точность обработки деталей из труднообрабатываемых титановых сплавов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Для выбора рациональных режимов резания, обеспечивающих требуемую точность изготовления деталей типа «тел вращения» из титановых сплавов, на кафедре «Технология машиностроения» СПбПУ была разработана математическая модель образования погрешностей.

Основные погрешности при точении титановых сплавов это: температурные деформации инструмента и детали (формула 1), размерный износ режущего инструмента (формула 2) и упругие деформации технологической системы (формула 3). Систематическая составляющая погрешностей обработки находится как их алгебраическая сумма (формула 4). Математическая модель представлена ниже:

$$\xi = K(\tau + A)(1 - e^{-\alpha\tau}), \quad (1)$$

где: ξ – температурное удлинение резца, соответствующее моменту времени τ; K и A – коэффициенты, зависящие от обрабатываемого материала, режимов резания, материала и формы резца; α – коэффициент, зависящий от материала и формы режущего инструмента; e – основание натуральных логарифмов, а для определения коэффициентов уравнения по экспериментальным данным необходимо воспользоваться методом наименьших квадратов.

$$\Delta U = 2u\pi Dl/s, \quad (2)$$

где: ΔU – закономерно изменяющаяся погрешность, обусловленная износом резца, мкм; D – диаметр заготовки, мм; u – относительный размерный износ резца, мкм; s – подача резца, мм/об; l – длина обработки, мм.

$$\Delta_{\text{УПР.}} = \frac{1}{j} / (P_Y/P_Z \cdot C_P \cdot s^{0.75}), \quad (3)$$

где: j – жесткость системы Н/мм(определяется экспериментально для каждой единицы оборудования); C_P – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала (для каждого материала определяется экспериментально); P_Y и P_Z – составляющие силы резания, Н.

$$\Delta_{\text{сист.}} = \Delta_U + \Delta_{\text{УПР}} + 2\xi. \quad (4)$$

Для жаропрочных сплавов теплофизические и силовые характеристики представлены в работе Василькова Д.В. [17].

Для численной оценки степени зависимости параметров резания и шероховатости

поверхности от режимов резания и геометрии режущего инструмента в математическую модель включены соответствующие эмпирические уравнения (формулы 5-12).

$$A = C_A V^{aA} S^{bA} r^{dA}, \quad (5)$$

$$K = C_K V^{aK} S^{bK} r^{dK}, \quad (6)$$

$$\alpha = C_\alpha V^{a\alpha} S^{b\alpha} r^{d\alpha}; \quad (7)$$

$$u = C_u V^{au} S^{bu} r^{du}; \quad (8)$$

$$P_Y = C_y V^{ay} S^{by} r^{dy}, \quad (9)$$

$$P_Z = C_z V^{az} S^{bz} r^{dz}, \quad (10)$$

$$Ra = C_{Ra} V^{aRa} S^{bRa} r^{dRa}, \quad (11)$$

$$Rz = C_{Rz} V^{aRz} S^{bRz} r^{dRz}, \quad (12)$$

где: V– скорость резания, м/мин; s – подача, мм/об, r– радиус при вершине резца, мм C_A, C_K, C_α,C_u,C_y, C_z, C_{Ra}, C_{Rz}– коэффициенты, зависящий от геометрии и материала инструмента; aA, bA и dA; aK, bK и dK; $a\alpha$, $b\alpha$ и $d\alpha$; au, bu и du; ay, by и dy; az, bz и dz; aRa, bRa и dRa; aRz, bRz и dRz – показатели степени V, s и r соответственно.

Для определения коэффициентов модели необходимо выполнить многофакторный эксперимент в диапазоне рекомендованных режимов резания.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

Для обеспечения требуемых параметров точности размеров и высотного параметра шероховатости поверхности выбираем режимы резания. В начале выбираем режимы по аналогии с другими титановыми сплавами. Подставляем их и радиус при вершине режущего инструмента в эмпирические формулы (5-12), полученные данные заносим в формулы основных составляющих погрешностей от износа инструмента, его температурного удлинения и упругих деформаций системы (формулы 1-3); складываем их алгебраически и высчитываем общую погрешность (формула 4).

Если величина погрешности удовлетворяет нашим требованиям, а величина шероховатости соответствует указанной на чертеже, то параметры резания принимаются как рабочие, если не соответствуют – необходимо, либо уменьшать подачу или скорость, либо увеличивать радиус при вершине инструмента и снова производить расчет. Если параметры нас удовлетворяют, то мы можем увеличить режимы резания с целью увеличения производительности и снова произвести расчет погрешности обработки. Таким образом производится подбор режимов резания и геометрии режущего инструмента чтобы добиться минимально возможной погрешности обработки.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель образования погрешностей при точении титановых сплавов, учитывающая тепловые деформации и размерный износ резца, упругие деформации технологической системы. Отличительной особенностью данной модели является особый вид зависимости тепловых деформаций режущего инструмента от времени обработки при точении труднообрабатываемых титановых сплавов.

2. На основе математической модели разработана методика определения рациональных режимов резания при точении труднообрабатываемых титановых сплавов, обеспечивающих требуемую точность размеров и качество поверхностного слоя деталей из титановых сплавов.

3. Для подтверждения методики определения режимов резания произведена обработка партии заготовок из нового титанового сплава ВТ41 типа «Втулка» с самым точным размером по 5-му квалитету на установленных по методике режимах резания. Отклонение полученной величины суммарной погрешности и качества поверхностного

слоя от расчетной по модели при изготовлении партии деталей составляет не более 13-15 %. Все детали в партии соответствуют требуемой точности по 5 квалитету.

4. Эффективность применения предлагаемой методики подтверждается Актом о промышленном апробировании результатов работы на заводе АО «Завод «Двигатель».

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00243.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Максаров В.В., Кошелева Е.В., Важенин А.Ю.* Повышение качества изготовления деталей из титановых сплавов методом локального пластического деформирования // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева, 2017. №1(40). С. 276-281.

2. *Васильков Д.В., Александров А.С., Голикова В.В.* Обрабатываемость металлов резанием // Системный анализ и аналитика, 2019. №1(9). С. 93-100.

3. *Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В.* Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД / Электронный научный журнал «ТРУДЫ ВИАМ», 2014. № 3.

4. *Kishawy H.A., Hosseini A.* 2019 Titanium and Titanium Alloys *Machining Difficult-to-Cut Materials. Materials Forming, Machining and Tribology. Springer, Cham*.

5. *Gialanella S., Malandruccolo A.* 2020 Titanium and Titanium Alloys *Aerospace Alloys. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. Springer, Cham*.

6. *Akhonin S.V., Berezos V.O., Severyn A.Yu., Gadzyra M.P., Tymoschenko Y.G. and Davydchuk N.K.* 2019 Structure and Properties of Titanium Modified Silicon-carbide at EBM *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 582 012051

7. *Siregar Ikhsan, Saedon J.B., Mohd Shahriman Adenan, Norhafiez Mohd Nor, Muhammad Firdaus Mohammed Azmi and Mohd Hafiz Bin Jamaludin* 2019 Tool wear investigation in drilling titanium alloy *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 505 012043.

8. *Skotnikova M.A., Tsvetkova G.V., Lanina A.A., Krylov N.A., Ivanova G.V.* 2015 Structural and phase transformation in material of blades of steam turbines from titanium alloy after technological treatment *Advances in mechanical engineering. Selected contributions from the conference "Modern engineering: science and education, Saint Petersburg, Russia, Springer, Berlin, Heidelberg* 93–101.

9. *Rui Liu.* Dynamic Compression Properties of Ti-xV Titanium Alloys 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 585 012012.

10. *Bran D.T., Elefterie C.F. and Ghiban B.* 2017 Aeronautical Industry Requirements for Titanium Alloys *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 209 012059.

11. *Максаров В.В., Ефимов А.Е., Важенин А.Ю.* Совершенствование технологии механической обработки титановых сплавов посредством применения предварительного пластического воздействия / Металлообработка, 2019. № 3(111). С. 20-26.

12. *Maksarov V., Khalimonenko A., Timofeev D.* 2014 Machining quality when lathing blanks with ceramic cutting tools *Agronomy Research* 12(1) 269-278.

13. *Zhukov E.L., Kozar I.I., Olodyazhniy D.Y.* 2016 Problems of ensuring quality of a surface layer when producing components from hard-to-process heat resistant alloys *Acta MetallurgicaSlovaca* 22(2) 128-132.

14. *Efimov A.E., Maksarov V.V., Timofeev D.Y.* 2018 Modeling dynamic processes at stage of formation of parts previously subjected to high-energy laser effects *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327(2) 22026.

15. *Drobintsev P., Kotlyarova L., Voinov N., Tolstoles A., Maslakov A., Khrustaleva I.*. 2019 Automating preparation of small-scale production for reliable net-centric IoT workshop *CEUR Workshop Proceedings Actual Problems of System and Software Engineering* 75-85.

16. *Kotlyarov V., Chernorutsky I., Drobintsev P., Tolstoles A., Khrustaleva I., Kotlyarova L.*.

2017 Net-centric Internet of Things for industrial machinery workshop *Proceedings of the 4th Ural Workshop on Parallel, Distributed, and Cloud Computing for Young Scientists* 112-122.
17. *Никитин А.В., Васильков Д.В., Кочина Т.Б.* Теплофизические и силовые характеристики в зоне резания при обработке жаропрочных сплавов / Металлообработка, 2018. №2(104). С. 2-11.

УДК 681.5

ЛЮБИЧ В.К.,
КУРМАШЕВ А.Д.,
ФРОЛОВ В.Я.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ, МИНИМИЗИРУЮЩИХ КОНТУРНУЮ ОШИБКУ ЧПУ СТАНКА ИСПОЛЬЗУЯ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

Аннотация. Традиционно системы управления электроприводами реализуются по разомкнутой в целом схеме. Примером такой системы управления может служить контурная система управления (КСУ), настроенная на симметричный оптимум. Данная система управления характеризуется относительно низкой добротностью отработки траектории (отношение контурной скорости к контурной ошибке). Для повышения добротности мы предлагаем использовать следующие алгоритмы: КСУ оптимальный по контурной ошибке (КСУ-К) и нейронный регулятор согласованного управления. Оба алгоритма настраивались для невыпуклого критерия оптимизации с использованием генетического алгоритма, который позволил за меньшее количество обучений получить более оптимальные значения критерия оптимизации, по сравнению с методом градиентного спуска. Эксперименты проводились на математической модели ЧПУ станка, построенной на основе реальных сервоприводов и винтовых передач. Результаты численного эксперимента показали, что предложенные алгоритмы позволяют значительно повысить добротность отработки траектории ЧПУ станком, что положительно сказывается на производительности: нейронный регулятор согласованного управления лучше использует свободные ресурсы системы, так при уменьшение начальной контурной ошибки, уменьшении радиуса окружности и при повышении контурной скорости нейронный регулятор имеет большую добротность. КСУ-К кроме повышения добротности хорошо справляется с поддержанием контурной скорости.

Ключевые слова: генетический алгоритм, нейронная сеть, согласованное управление, контурная система, ПИД, ЧПУ, контурная ошибка.

LYUBICH V.K.,
KURMASHEV A.D.,
FROLOV V.Y.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

SYNTHESIS OF THE CNC MACHINE CONTROL ALGORITHMSOPTIMAL BY COUNTOUR ERRORUSING GENETIC ALGORITHM

Abstract. Traditionally control systems of electro motors have uncoupled structure, e.g. uncoupled system (US), tuned on symmetrical optimum. Such systems have relatively small contouring quality factor –ratio of contour speed to contour error. We propose using US tuned on contour error optimum (US-K) and the neural coordinated control algorithm (NCC). Both algorithms were tuned on non-convex criterion using genetic algorithm, which allowed us to reduce tuning time and acquire more optimal values of the criterion in comparison to gradient descent method. The experiments were conducted using a mathematical model of CNC machine based on real servo motors and lead screws. The results of the experiments showed that usage of proposed algorithms led to significant increase in quality factor, which has a positive effect on overall productivity of the CNC machine. Furthermore, NCC use available resources better than

other algorithms, which could be seen in experiments with lower initial contour error, lower radius of the circle and higher contour speed. In addition, US-K does a good job of maintaining contour speed.

Keywords: genetic algorithm, contour error, CNC, Neural network, coordinated control, US, PID.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей является повышение добротности (отношения контурной скорости к контурной ошибке) воспроизведения траектории станками и манипуляторами, т.к. системы с высокой добротностью позволяют производить технологические операции с большей точностью при той же контурной скорости [1-6].

Традиционно системы управления приводами реализуются по разомкнутой в целом схеме, с использованием ПИД регуляторов [1-4]. Примером такой системы управления может служить классическая контурная система управления (ККСУ), в которой контур скорости настроен на модульный оптимум, а контур положения на симметричный оптимум. Данная система управления оптимальна по координатной ошибке, и имеет ряд недостатков: контурная ошибка минимизируется косвенно, за счет минимизации координатной ошибки, а из-за малого количества параметров регулятора, практически невозможно выбрать желаемый приоритет управления [1-6].

Цель работы. Повышение добротности отработки круговой траектории за счет настройки контурной системы управления и нейронного регулятора согласованного управления генетическим алгоритмом на оптимум по контурной ошибке.

Для достижения этой цели были предложены два алгоритма управления: первый алгоритм это КСУ, настроенная на оптимум по контурной ошибке (КСУ-К); второй алгоритм нейронный регулятор согласованного управления (НРСУ) [1], лишенный недостатков в общем разомкнутых систем, за счет использования в общем замкнутой структуры [1-4], более того использование нейронной сети позволяет настраивать алгоритм для работы с конкретным оборудованием, внешними воздействиями и задачами управления используя относительно малое количество информации об объекте управления (ОУ) [7-9].

Существует ряд методов обучения нейронной сети, в предыдущей работе [1] мы уже рассматривали метод градиентного спуска, который требовал большого количества переобучений при работе с невыпуклыми критериями оптимизации. В данной работе для обучения было решено использовать генетический алгоритм, который за счет мутации и скрещивания способен выходить из неоптимальных локальных минимумов в более оптимальные, что позволят за меньшее количество обучений получать более оптимальные значения критерия оптимизации [10].

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ

Алгоритмы разрабатывались для модели ЧПУ станка, состоящего из двух сервоприводов постоянного тока (ЭП) и двух винтовых передач. Математически модель ЧПУ станка может быть представлена в виде структурной схемы (рис. 1).

Модель состоит из двух осей x и y. K_e, T_{e1}, T_{e2} – параметры электрической части ЭП; K_m, T_m – параметры механической части ЭП; K_{LS} – передаточное отношение винтовой передачи; PI_S – ПИ регулятор скорости; U_x, U_y – напряжения на статорах ЭП; M_x, M_y – крутящие момент ЭП; ω_x, ω_y – угловые скорости ЭП; $\dot{x}^*$, $\dot{y}^*$ – задания линейной скорости ЧПУ станка; $\dot{x}$, $\dot{y}$ – фактические значения линейной скорости ЧПУ станка; x, y – положения исполнительного механизма ЧПУ станка.

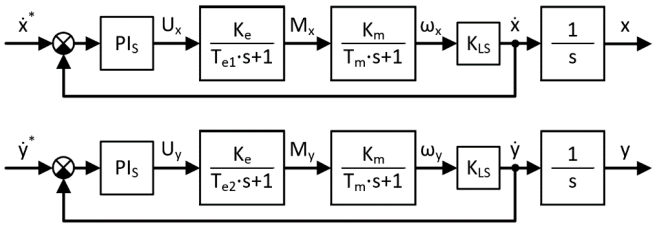


Рисунок 1 – Структурная схема ОУ

В роли ЭП ЧПУ станка был выбран привод MT-3353-B от BALDOR, винтовая передача была выбрана равной 63 мм/об.

В качестве эталонных систем управления (рис. 2 , лево), с которыми сравниваются разработанные алгоритмы, были выбраны классическая контурная система, настроенная на симметричный оптимум и оптимизированная генетическим алгоритмом контурная система на минимальную координатную ошибку.

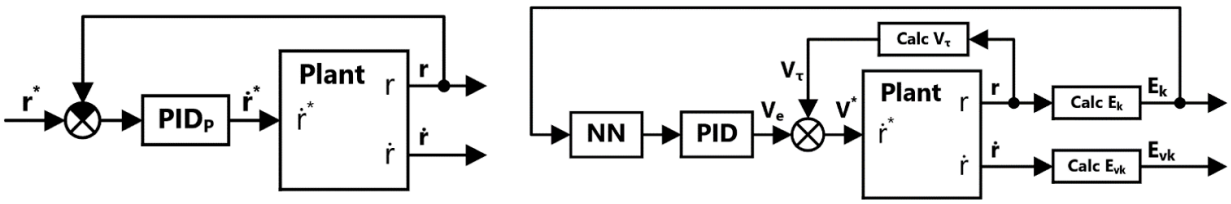


Рисунок 2 – Структурны схему КСУ (лево) и НРСУ (право):
r*, r – задание вектора положения и фактический вектор положения ЧПУ станка;
ṙ*, ṙ – задание вектора скорости и фактический вектор скорости ЧПУ станка

Настройка алгоритмов проводилась для траектории дуга окружности ($x^2 + y^2 = R^2$).

Генетический алгоритм — это эвристический метод оптимизации критерия за счет использования механизмов аналогичных механизмам естественного отбора (рис. 3) [11]: репликация и элитизм (полный перенос генома в следующее поколение), мутация (случайное изменение генома индивида), скрещивание (случайное скрещивание геномов двух индивидов). Вероятность размножения индивида тем выше, чем ниже значение критерия оптимизации. В случае КСУ геномом являются коэффициенты ПИД регулятора положения, в случае НРСУ геном представляется параметрами нейронной сети и параметрами регулятора.

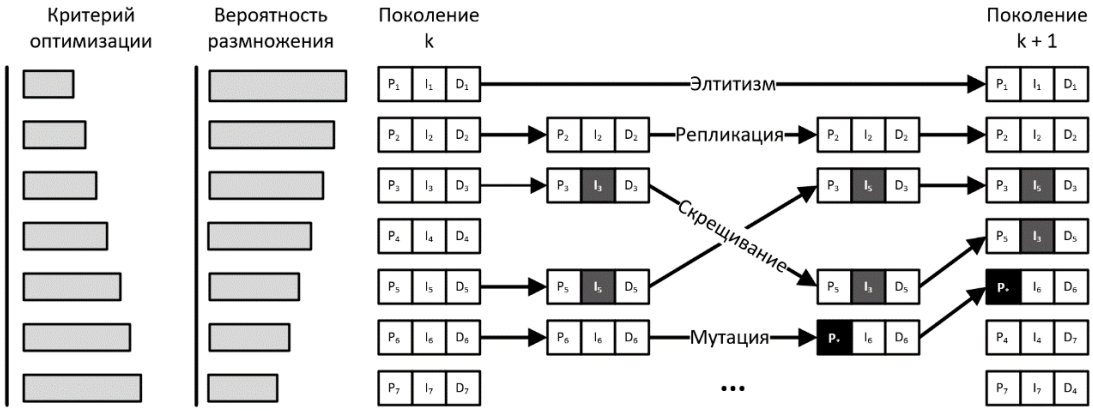


Рисунок 3 – Пример работы генетического алгоритма

КСУ-К была настроена на оптимум по контурной ошибке (минимальное расстояние от исполнительного механизма до траектории движения) (1).

$$e_k = \sqrt{x^2 + y^2} - R^2$$
$$\boldsymbol{e_k} = \left[e_k \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} \quad e_k \cdot \sqrt{\right.} \tag{1}$$

$$\langle e_k \rangle = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T e_k^2\, dt}$$

Так же на оптимум по контурной ошибки была настроена нейронная контурная система согласованного управления с нейронным регулятором траектории (рис. 2, право). Основная идея контурной системы согласованного управления, это формирование задания по скорости из двух компонент: скорость движения по траектории (V_τ), которая задает движение по траектории, и скорость возврата на траекторию (V_e), которая минимизирует контурную ошибку (рис. 4).

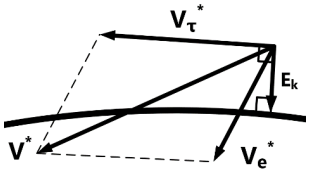


Рисунок 4 – Формирование задания по скорости в контурной системе согласованного управления

В качестве нейронной сети была выбрана сеть с двумя скрытыми слоями по 6 нейронов каждый. Т.к. задача нейронного регулятора — это элиминация контурной ошибки, на вход нейронной сети подается вектор контурной ошибки, а на выходе формируется скорость возврата на траекторию. Скорость движения по траектории формируется исходя из текущего положения исполнительного механизма.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Предложенные системы управления обучались генетическим алгоритмом для параметров эксперимента N 1. В экспериментах N 2-10 исследовались влияния начальной контурной ошибки, радиуса дуги окружности, контурной скорости и несимметричности каналов на добротность и абсолютную ошибку контурной скорости. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты экспериментов.<v> – среднеквадратичная добротность, E_{vk} – абсолютная среднеквадратичная ошибка по контурной скорости.

N	Параметры эксперимента				ККСУ		КСУ-С		КСУ-К		НРСУ	
	E_{k0}, m	R, m	V_k, m/s	T_{e1}/T_{e2}	<v>, 1/s	E_{vk}, %	<v>, 1/s	E_{vk}, %	<v>, 1/s	E_{vk}, %	<v>, 1/s	E_{vk}, %
1	0.2	1	0.1	1.00	195.03	11.8	222.72	6.8	355.80	2.0	332.55	3.2
2	0.3	1	0.1	1.00	90.38	37.4	95.16	15.4	175.69	4.3	130.73	5.0
3	0.1	1	0.1	1.00	390.07	3.2	405.85	1.7	489.02	0.6	827.09	1.5
4	-0.2	1	0.1	1.00	195.00	11.9	218.07	6.8	350.10	2.0	331.63	3.3
5	0.2	2	0.1	1.00	195.02	11.8	228.96	6.8	420.45	2.0	332.68	3.2
6	0.2	0.5	0.1	1.00	195.04	11.8	201.79	6.8	244.43	2.0	330.09	3.2
7	0.2	1	0.05	1.00	97.51	41.3	115.16	25.3	221.23	7.6	166.35	12.3
8	0.2	1	0.2	1.00	390.08	3.18	304.73	1.6	275.72	0.6	622.07	0.8
9	0.2	1	0.1	1.10	195.03	11.9	222.73	6.8	355.80	2.0	332.39	3.2
10	0.2	1	0.1	0.91	184.10	13.0	219.25	6.8	351.88	2.0	326.49	3.3

ИТОГ

КСУ-К и НРСУ имеют лучшие показатели добротности (рис. 5), кроме того НРСУ оказался парето оптимальным по добротности по сравнению с эталонными системами, а

КСУ-К парето оптимальным по ошибке контурной скорости (табл. 1).

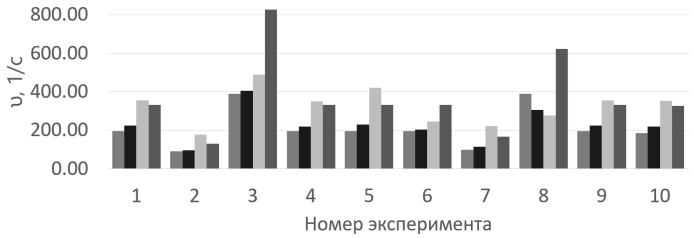


Рисунок 5 – Сравнение добротностей ККСУ, КСУ-С, КСУ-К и НРСУ

ВЫВОД

Предложенные алгоритмы позволили значительно повысить добротность отработки траектории моделью ЧПУ станка, что положительно сказывается на производительности. Использование генетического алгоритма позволило сэкономить временя на настройку регуляторов, по сравнению с обучением методом градиентного спуска, т.к. не требовало большого количества переобучений. НССУ лучше использует свободные ресурсы системы, так при уменьшение начальной контурной ошибки, уменьшении радиуса окружности и при повышении контурной скорости НССУ имеет большую добротность. КСУ-К кроме повышения добротности хорошо справляется с поддержанием контурной скорости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lyubich V., Frolov V. and Beliaev V.* 2019 Synthesis of the neural coordinated control algorithm for the model of CNC machine *E3S Web of Conferences* 140 02015.
2. *Lyubich V. and Kurmashev A.* 2019 Synthesis of the Coordinated Control Algorithms for a Biaxial Manipulator *International Conference Cyber-Physical Systems and Control Springer, Cham* 315-325
3. *Lyubich V.K., Kurmashev A.D.* 2017 SOGLASOVANNOE UPRAVLENIE PROGRAMMNYM DVIZHENIEM MANIPULYATORA PO TRAEKTORII, ZADANNOJ KUBICHESKIM SPLAJNOM (The coordinated control of the manipulator program movement along a cubic spline trajectory) *Week of science'17, ICST*.
4. *Shapovalov A.A., Kurmashev A.D.* 2012 Contouring system of coordinated control of an industrial robot *TUSUR* 1(25) part 2.
5. *Tang L., Landers R.G.* 2012 Multiaxis contour control – the state of the art *IEEE transactions on control system technology*.
6. *Huo F., Poo A.* 2013 Precision contouring control of machine tools *Int. J. Adv. Manuf. Technol*.
7. *Yang H., Liu J.* 2018 An Adaptive RBF Neural Network Control Method for a Class of Nonlinear Systems *IEEE/CAA JOURNAL OF AUTOMATICA SINICA* 2(5) 457-462.
8. *Gao H., He W., Zhou C., Sun C.* 2018 Neural Network Control of a Two-Link Flexible Robotic Manipulator Using Assumed Mode Method *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 15.2 755-765.
9. *Sun W., Hong J.* 2016 Neural Network Control of a Flexible Robotic Manipulator Using the Lumped Spring-Mass Model *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 47.8 1863-1874.
10. *Zeng, Guo-Qiang et al.* 2019 Adaptive population extremal optimization-based PID neural network for multivariable nonlinear control systems *Swarm and evolutionary computation* 44 320-334.
11. *Brunton S.L., Kutz J.N.* 2018 Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control. Cambridge.

УДК 621.09

МАКСАРОВ В.В.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения
ОЛЬТ Ю.
Эстонский университет естественных наук,
г. Тарту, Эстония

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕНИЯ В НАПРАВЛЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАНИЧНОГО СЛОЯ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация. В статье рассматривается знакопеременное силовое воздействие, которое сопровождается «скачкообразным» поведением и оказывает влияние на динамическое поведение технологической системы при обработке ступенчатых валов. Доминирующим фактором в этом процессе приобретает трение между исполнительными механизмами технологической системы, которое влияет на устойчивость процесса резания и соответственно на качество обрабатываемого изделия, а также на надежность, долговечность машин и механизмов, которые содержат фрикционные соединения.

Ключевые слова: обработка **с**тупенчатых валов; система суппорта; трение в направляющих; фрикционные соединения; сила трения; динамическая модель.

MAKSAROV V.V.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of mechanical engineering
OLT J.
Estonian University of Life Sciences,
Tartu, Estonia

SIMULATION OF FRICTION IN PROCESS EQUIPMENT GUIDES IN THE PRESENCE OF A BOUNDARY LAYER OF LUBRICANT

Abstract. The article deals with alternating force action, which is accompanied by«jump-like» behavior and affects the dynamic behavior of the technological system when processing step shafts. The dominant factor in this process is the friction between the actuators of the technological system, which affects the stability of the cutting process and, accordingly, the quality of the processed product, as well as the reliability and durability of machines and mechanisms that contain friction joints.

Keywords: processing of step shafts; caliper system; friction in guides; friction joints; friction force; dynamic model.

При токарной обработке ступенчатых валов с различными сложными переходами наблюдается большое число переходных процессов, при которых изменяется направление перемещения инструмента, что сопровождается остановкой привода по одной из осей перемещения инструмента, а дальше включается в работу другой привод или как это часто бывает совместное взаимодействие приводов. Система суппортов станка вследствие знакопеременного силового воздействия сопровождается «скачкообразным» поведением, оказывая влияние динамику технологической системы. Трение в направляющих оказывает значительное влияние на устойчивость процесса резания и соответственно на качество

обрабатываемого изделия, а также на надежность, долговечность машин и механизмов, которые содержат фрикционные соединения. Для понимания процессов, которые протекают в исполнительных механизмах станка, важным является рассмотрение основных теорий и представлений, описывающих процесс трения с учетом динамических явлений, связанных, в том числе и с проблемой развития фрикционных автоколебаний.

Большое число упругих систем с трением может быть представлено упрощенной динамической моделью, которая представлена на рис. 1 (где N– сила нормального давления;F – сила трения; m–приведенная масса парциальной системы; b – коэффициент сопротивления; c – коэффициент жесткости; V- скорость перемещения).

Исходя из исследований [1, 2] развитие фрикционных автоколебаний объясняется нелинейной падающей зависимостью силы трения от относительной скорости контактирующих поверхностей $V = \dot{y} = V_0 - \dot{x}$.

При срыве сила трения принимается постоянной, равной силе трения скольжения при нулевой скорости, выведена экспериментальным путем [1] и при условии отсутствия колебаний может рассматриваться как квазистатическая

$$V = V_0 = \text{const}\ F = F(V_0) = F(V), \quad (1)$$

что обеспечивается путем введения в систему большого демпфирования. Падающая зависимость силы трения от относительной скорости F(V):

$$F = f(V),\ Fcp = F(0) = \text{const}. \quad (2)$$

В таком случае дифференциальное уравнение движения системы принимает вид

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + c \cdot x + F(V_0 - \dot{x}) = 0. \quad (3)$$

С учетом падающего характера функции $F(V_0 - \dot{x})$ данное уравнение описывает свойства мягкого возбуждения автоколебаний при скорости привода V_0,меньшей некоторого критического значения $V_к$. При этом могут иметь место автоколебания двух видов: релаксационные [2] и близкие к гармоническим [3] колебания. При этом амплитуды фрикционных автоколебаний с ростом скорости привода V_0сначала возрастает, а затем резко убывает до нуля.

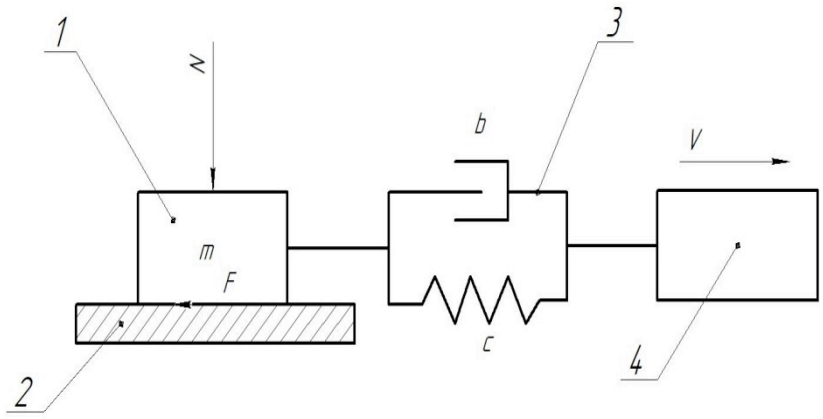


Рисунок 1 – Динамическая модель упругой системы процесса трения без смазочного материала в области контакта между направляющими станины и суппорта станка:
1 – ползун технологической системы; 2 – направляющая станины станка;
2 – механическая модель Фойхта; 3 – привод

Теория, изложенная в исследованиях [2] получила большое распространение в решении многих технических задач из области нелинейной механики. Падающая характеристика силы трения при росте скорости была зафиксирована во многих исследованиях [3-5]. Преимуществом данной теории является то, что она в достаточно простой форме объясняет возбуждение автоколебаний, различие характера колебаний при различных скоростях и позволяет рассчитывать их амплитуды и частоты. Тем не менее, падающая зависимость силы трения от относительной скорости скольжения получена в

квазистатических режимах при различных, по значению начальных скоростяхV$_0$. Применение квазистатической характеристики в случае протекающих быстро динамических процессов является неприемлемой по причине инерционности процессов трения. Еще одним недостатком данной теории является игнорирование области перехода от состояния покоя к состоянию скольжения.

В исследованиях [6] установлено, что сила в момент трогания с места F_τ не является постоянной величиной, а в значительной степени зависит от времени неподвижного контакта трущихсятелТи выражаетсяэмпирической формулой:

$$F_T = F_\infty - (F_\infty - F_0) \cdot e^{-\delta \cdot T}, \quad (4)$$

где F_∞, F_0, δ - постоянные.

В работах [7-9] приводятся теоретические обоснования в случае несмазанных поверхностей и расчеты автоколебаний. При принятии силы трения скольжения постоянной и равной значению F_T при нулевой продолжительности взаимодействия, учитывая последнее уточнение, характеристика трения принимает вид [7]:

$$F_T = F_T(0) = F_0 = \text{const};$$
$$F_{cp} = F_T = F_\infty - (F_\infty - F_0) \cdot e^{-\delta \cdot T}, \quad (5)$$

где F_{cp} - значение силы трения в момент срыва. Данное условие добавляет системе свойство жесткого возбуждения колебаний релаксационного характера из-за положительной разности ΔF силы трения скольжения и срыва. Подобные автоколебания наблюдаются при заданной скорости привода V_0 меньшей конкретного критического значения V_*.

В работах [10, 11] на основании экспериментальных данных обусловлено следующее предположение: при начале движения сила трения после небольшого смещения скачкообразно падает, и система из трения покоя переходит в трение движения. По причине того, время протекания скачка в практических условиях мало по сравнению со временем, необходимым для протекания переходных процессов, то скачок можно считать мгновенным. В процессе установившегося равномерного перемещения сила трения скольжения зависит от скорости и обладает падающей характеристикой. При условии неустановившегося колебательного движения значение силы трения также колеблется, но при этом зависимость изменения отличается от закона изменения неустановившейся скорости скольжения, между ними имеется значительный фазовый сдвиг. Сила трения F раскладывается на составляющие F_1 и F_2,характеризуемые скоростью и ускорением соответственно.

В исследования [11, 12] установлена критическая скорость V_*, которая характеризует переход от движения в условиях релаксационных автоколебаний к непрерывному скольжению, выведена формула для определения величины первого скачка. Разработанная методика получила применение в динамических расчетах колебаний в парах трения механизмов машин.

Фазовый сдвиг вызывает снижение частоты квазилинейных автоколебаний по сравнению с собственной частотой системы. Поэтому основным экспериментальным подтверждением корректности рассмотренной модели является отмеченное в работе [11] несовпадение частот.

В процессе изучении характера движения инструмента при обработке в основном рассматривались [13, 14] параметры самого процесса резания и не учитывалось влияние характера перемещения суппортов и привода подач.

Динамическая система станка является замкнутой [15, 16] и состоит из взаимодействующих элементов упругой системы, в качестве которых обычно рассматриваются суппорт - приспособление - инструмент - деталь, а также рабочих процессов: резания и трения.

В качестве еще одного элемента упругой системы следует выделить привод, по причине того, что его работа существенным образом оказывает влияние на характер движения суппорта, перемещение которого в результате чего может принимать

скачкообразный характер. Скачкообразное перемещение суппорта оказывает возмущающее воздействие на систему, характеризующую процесс резания. Иначе говоря, при перемещении инструмента могут возникать малоамплитудные отклонения формообразующего движения от заданного, вызванные процессами трения в направляющих.

Рабочие процессы трения и резания также оказывают некоторое влияние на характер перемещения инструмента [17-19]. По причине того, сила трения в направляющих, являясь нелинейной величиной, может приводить к скачкообразному перемещению суппорта на участках малых линейных скоростей движения.

В станках токарной группы наиболее часто применяются направляющие скольжения смешанного трения. Наибольший интерес представляет Кулоново трение, оно имеет нелинейный характер, по причине того, что является функцией скорости. Сила трения при переходе от покоя к движению мгновенно изменяет свое значение от F_n до F_d, т. е. двузначность силы трения соответствует значению скорости $v = 0$ (рис. 2). Мгновенное изменение величины силы трения характеризует скачок при начале движения суппорта.

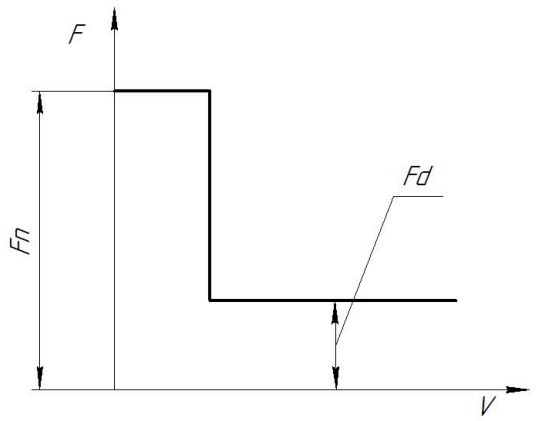


Рисунок 2 – Сила трения при начале движения суппорта

В процесс механической обработки металлов также наблюдаются различного рода нелинейности. Они являются сложным, протекающим при высоких скоростях, давлении и температурах процессом. Снимаемый слой материала сопровождается значительными упругими и пластическими деформациям как результат взаимодействия с рабочими поверхностями режущего инструмента. Возникающие при этом структурные изменения характеризуются течением и разрушением снимаемого слоя, трением на передней и задней поверхностях инструмента - с одной стороны, и стружкой и обрабатываемым материалом - с другой стороны, данный процесс имеет нелинейный характер и включает в себя молекулярные и механические составляющие.

Трение представляет собой сложное явление, характеризуемое совокупностью различных механических и физических процессов, обусловленных явлениями адгезии и диффузии [19, 20]. На начальных этапах моделирования процесса малоамплитудного трения в направляющих нелинейной характеристикой сил трения, имеющей место в процессе резания, будем пренебрегать, по причине того, что в большей степени нас интересует влияние процессов и явлений, происходящих в суппорте и приводе подач на этапе переходных режимов обработки ступенчатой траектории.

Сила резания зависит от многих факторов, она нелинейно зависит от скорости резания, подачи, толщины среза. Поэтому при составлении математической модели для определения величины силы резания будем использовать эмпирические зависимости, полученные ранее [21]. С дополнением, что в качестве величины подачи будет приниматься переменное значение, зависящее от времени.

Для того чтобы оценить влияние процессов малоамплитудного трения, проходящих

в суппорте и приводе, на характер перемещения инструмента, а как следствие на качество и точность изготавливаемой поверхности необходимо построить единую математическую модель. Решение данной задачи представляется возможным, если сначала рассмотреть влияние дискретного характера перемещения привода подач на характер движения суппорта, а затем, учтя полученную колебательную характеристику отклонения скорости перемещения суппорта от заданной, провести анализ характера движения инструмента на переходных режимах.

В процессе описании механической системы станка целесообразно использовать математическую модель, представленную в виде системы дифференциальных уравнений, характеризующих перемещения данной механической системы, а именно: работу привода подач, движение суппорта и инструмента в направления координат X и Z, помимо этого при составлении системы дифференциальных уравнений необходимо так же учитывать нелинейные характеристики элементов.

В процессе составления математической модели в качестве привода подач рассмотрим стандартный регулируемый привод с ПИ-регулятором скорости и тока, которые наиболее часто применяются в современных токарных станках с ЧПУ. По причине того, что проявление нелинейных характеристик в двигателях является существенным только в областях высоких нагрузок, то ими можно пренебречь.

Перемещение суппорта оказывает определенное возмущающее воздействие на процесс резания, приводящее к возникновению отклонений формообразующего движения режущего инструмента колебательного характера. В тот момент, когда процесс резания подвергается воздействию данных отклонений, в этом случае наблюдается изменение режимов резания. Таким образом, колебания инструмента в направлении оси перемещения инструмента OZ приводят к изменению подачи. Величину подачи в таком случае можно описать $[S \pm U_p(0, \tau)]$.

Если предположить, что подача в процессе механической обработки является величиной переменной, характеризующейся переменным перемещением суппорта, то ее можно представить в виде:

$$[S \pm U_p(0,\tau)] = \dot{z}_{суп}, \quad (6)$$

где $\dot{z}_{суп}$ - скорость перемещения суппорта, м/с.

Для определения величины силы резания при описании перемещения инструмента воспользуемся эмпирической зависимостью [23]. Тогда с учетом подачи силу резания можно представить следующим образом:

$$P_z = C_{pz} \cdot t^{x_p} \cdot \dot{y}_{суп}^{y_p} \cdot v^{-z_p}, \quad (7)$$

где C_{pz} - постоянная, соответствующая определенным условиям резания, материалам обрабатываемой детали и инструмента, определенной геометрии инструмента; t - глубина резания; V - скорость резания; x_p, y_p, z_p- соответствующие показатели степени.

Для описания движения суппорта применим математическую модель, предложенную в работе [16]. Для расчетов примем пропорциональные зависимости силы трения от нормальной нагрузки:

$$F_{тр} = N_{\Sigma} \cdot \mu$$
$$\mu = \mu_0 + f(\dot{y}), \quad (8)$$

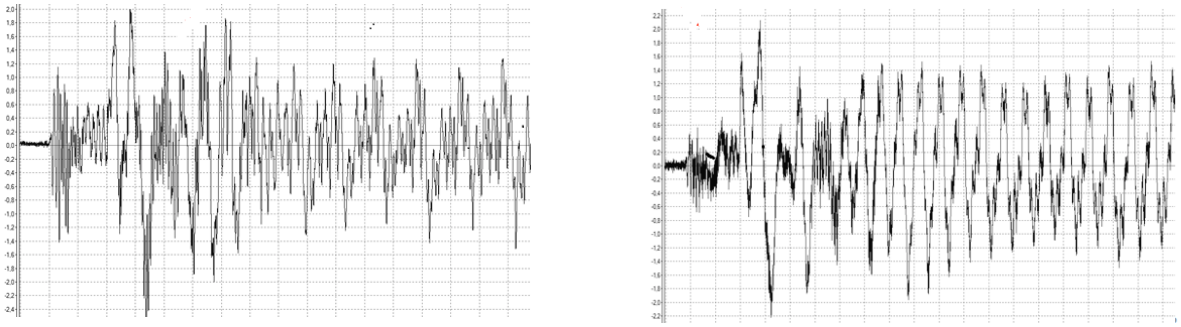
где N_{Σ} - результирующая сила, прилагаемая к суппорту по нормали к плоскости направляющих.

Система, после скачкообразного перехода к движению в момент срыва, снова переходит в фазу покоя. В данном случае за действующую силу трения заново принимается значение равное силе трения покоя, а скорость перемещения суппорта приравнивается к нулю.

Решение системы дифференциальных уравнений с достаточной степенью точности позволяет определить величины отклонений получаемой траектории перемещения

инструмента от заданной, вызванные малоамплитудными процессами из совокупности процессов трения и характера работы приводов подач [24].

На приведенных рис. 3наблюдается начальный скачок, обусловленный переходом системы от состояния трения покоя к трению скольжения, также процесс перехода от «скачкообразного» перемещения к движению с устоявшимися колебаниями в большей степени соответствует экспериментальным данным, полученным в ходе обработки заготовки из стали 40ХН на токарном станке ЧПУ с различными значениями заданной линейной скорости перемещения инструмента.



а) б)

Рисунок 3 – Сравнение колебаний значений скорости перемещения суппорта: расчетная (а) и экспериментальная (б) вдоль оси OZ при заданной скорости 1,67 мм/с

При малых скоростях скольжения, до 40 мм/мин на профилограммах отчетливо видны моменты «схватывания» трущихся поверхностей, колебательный процесс состоит из автоколебаний релаксационного характера, вызванных скачкообразным перемещением суппорта и колебаний, вызванных дискретным характером перемещения задающего звена, привода. С ростом скорости схватывания трущихся поверхностей больше не происходит, и колебательный процесс представляет собой совокупность автоколебаний, вызванных нелинейностью процесса трения и задающих сигналов привода, отличающихся более высокой собственной частотой. При скоростях перемещения свыше 100 мм/мин, неравномерности, вызванные характером перемещения задающего звена, почти полностью подавляются инерционностью системы, и установившиеся колебания принимают вид гармонических колебаний, характеризующихся лишь нелинейность процесса трения.

Анализ изменения характера перемещения суппортов по направляющим, а также полученные значения амплитуд виброускорений и виброперемещений позволяют выделить диапазон линейных скоростей подач, при которых уровень возмущающих воздействий технологической системы механической обработки со стороны процессов малоамплитудного трения в органах позиционирования инструмента не будет приводить к потере устойчивости динамической системы на переходных процессах.

В замкнутую систему вводятся режимные параметры обработки и характер перемещения внешних возмущений, описывающих отклонение перемещения инструмента от идеальной траектории, что фиксируется исполнительным кодом ЧПУ. На различных этапах обработки величины данных возмущений и границы области устойчивости имеют свою величину, исходя из чего, для каждого из участков технологического перехода обработки ступенчатого вала определяются режимные параметры и функциональные зависимости их изменения для обеспечения условий устойчивости процесса обработки на всем технологическом переходе контурной обработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кайдановский Н.Л.* Природа механических автоколебаний, возникающих при сухом трении // Техническая физика, 1949. Т.19. Вып. 9. С. 985-996.

2. *Кайдановский Н.Л.* Механические релаксационные колебания / Н.Л. Кайдановский, С.Э. Хайкин // Техническая физика, 1933. Т.3. Вып.1. С.91-109.
3. *Крагельский И.В.* Влияние шероховатости поверхности на трение. - М.: Изд-во АН СССР, 1947. - 247 с.
4. *Билик Ш.М.* Пары трения металл-пластмасс в машинах и механизмах. -М.: Машиностроение, 1965. - 311 с.
5. *Лурье Б.Г.* Коэффициенты трения материалов для направляющихстанков // Станки и инструмент, 1959. КчЗ. С. 17-19.
6. *Ишлинский А.Ю.*, *Крагельский И.В.* О скачках при трении / Техническая физика, 1944. Т.14. Вып. 5-6. С. 276-283.
7. *Костерин Ю.И.* Релаксационные колебания и природа изменения силы трения на фрикционном контакте / Труды III Всесоюзной конференциипо трению и износу в машинах. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т.2. С. 65-71.
8. *Костерин Ю.И.* Релаксационные колебания в упругих системах трения / Ю.И. Костерин, И.В. Крагельский // Трение и износ в машинах, 1958, Вып.12. С. 119-143.
9. *Костерин Ю.И.* Причины захватывания и вибрации в автомобильном сцеплении / Ю.И. Костерин, И.В. Крагельский // Конструирование исследование и испытание автомобилей. Вып. 2. - М.: Машгиз, 1956. - С. 64-76.
10. *Эльясберг М.Е.* Автоколебания металлорежущих станков / Теория и практика. – СПб.: Изд. ОКБС, 1993. – 180 с.
11. *Эльясберг М.Е.* Расчет механизмов подач металлорежущих станков на плавность и чувствительность перемещения / Станки и инструмент, 1951, №11-12. С.1-7, С. 6-9.
12. *Васильков Д.В., Вейц В.Л., Шевченко В.С.* Динамика технологической системы механической обработки.- СПб.: Инструмент, 1997. - 230 с.
13. *Огвоздин В.Ю.* Управление качеством. Основы теории и практики: Учеб. пособие. - М.: Дело и Сервис, 1999. - 160 с.
14. *Орликов М.Л.* Динамика станков. - Киев: Выщ. шк., 1989.
15. *Кудинов В.А.* Динамика станков. - М.: Машиностроение, 1967. - 359 с.
16. *Maksarov V., Olt J.* 2016 Cutting process simulation on the basis of Rheological properties of metals *26TH DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation* 1 229 - 237.
17. *Бармин Б.П.* Вибрации и режимы резания. - М.: Машиностроение, 1979. – 72 с.
18. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. - 127 с.
19. *Борцов Ю.А.* Тиристорные системы электропривода с упругими связями. / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский - Л.: Энергия, 1979. – 160 с.
20. *Михайлов О.П.* Динамика электромеханического привода металлорежущих станков. - М.: Машиностроение, 1989. - 224 с.
21. *Вульф А.М.* Резание металлов. - Изд. 2-е. Л.: Машиностроение, 1973. - 496 с.
22. *Глудкин О.П.* Всеобщее управление качеством / О.П. Глудкин, Н.М. Горбунов, А.И. Гуров, Ю.В. Зорин. Под ред. О.П. Глудкина. - М.: Радио и связь, 1999. – 600 с.
23. *Дерягин Б.В.* Поверхностные силы / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер. - М.: Наука, 1987. - 399 с.
24. *Васильков Д.В.* Моделирование контактных взаимодействий с учетом реологии в зоне резания при высокоскоростной обработке изделий из жаропрочных сплавов / Д.В. Васильков, Т.Б. Кочина // Металлообработка, №4(76). 2013. С. 2-10.

УДК 621.01, 621.08, 62-52

МАЦКО О.Н.,
ВОЛКОВ Н.А.,
КОРНИЛОВА А.А.,
ПОДКОЛЬЗИНА Л.В.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

СТАТИЧЕСКОЕ УРАВНОВЕШИВАНИЕ И ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования и оценки эффективности статического уравновешивания цикловых приводов промышленных роботов и технологического оборудования с целью снижения потребляемой мгновенной мощности. Эффективность зависит от закона движения и его параметров, а также динамичности машины. Затраты мощности на преодоление инерции противовеса могут превосходить затраты мощности на преодоление неуравновешенных вертикально движущихся частей. Разработаны и исследованы математические модели, количественно связывающие инерционные характеристики машины, закон движения и мгновенную мощность, что является основой методики проектирования высокоэффективных современных машин.

Ключевые слова: цикловые приводы; эффективность статического уравновешивания; мгновенная мощность; математические модели; методика проектирования.

MATSKO O.N.,
VOLKOV N.A.,
KORNILOVA A.A.,
PODKOLZINA L.V.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic
University

STATIC BALANCING AND POWER CONSUMPTION FOR INDUSTRIAL ROBOTS AND PROCESS MACHINES FOR VARIOUS PURPOSES

Abstract. The paper presents the results of research and evaluation of the effectiveness of static balancing of cyclic drives of industrial robots and process equipment in order to reduce the instantaneous power consumption. Efficiency depends on the motion law and its parameters, as well as the machine dynamics. The power consumption to overcome the inertia of the counterweight may exceed the power consumption to overcome unbalanced vertically moving parts. Mathematical models that quantitatively link the machine inertia characteristics, the motion law and instantaneous power are developed and studied being the basis of the design methodology for modern high-performance machines.

Keywords: cyclic drives; static balancing efficiency; instantaneous power; mathematical models; design methodology.

Цикловые приводы широко применяются в робототехнике, технологических машинах и подъемно-транспортном оборудовании. Мощность таких приводов может составлять от десятков ватт в минироботах до десятков киловатт в приводах станков-качалок штанговых глубинных насосов для добычи нефти. Часто работа таких приводов

связана с нагрузками, обусловленными силами тяжести вертикально перемещающихся масс. Проектировщик обычно, не задумываясь о последствиях, при создании таких приводов широко применяет статическое уравновешивание, которое, на первый взгляд, позволяет легко и эффективно решить проблемы энергосбережения и снижения потребляемой мощности за счет увеличения массогабаритных характеристик машины. Такое решение целесообразно в двух случаях. Во-первых, при наличии системы рекуперации энергии при торможении и, во-вторых, при работе машины в колебательном режиме, когда функция привода заключается в компенсации потерь на трение. Во всех остальных случаях увеличение массы подвижных частей за счет противовеса приводит к росту сил инерции на участках разгона и, следовательно, потребляемой мощности, которая может превосходить затраты мощности, необходимой на преодоление сил тяжести. Увеличение массогабаритных характеристик оборудования сопровождается ростом мгновенной потребляемой мощности и требует более мощных и дорогих моторов и преобразователей.

В работах [1, 2] исследованы возможности энергосбережения для мобильных роботов и роботов, предназначенных для паллетирования, путем оптимизации траектории и применения пружинного уравновешивания. В работах [3, 4] исследованы возможности энергосбережения и снижения мощности за счет выбора оптимизации закона движения или синтеза специального закона средствами мехатроники. Полученные в этих работах результаты не позволяют решить вопрос о целесообразности уравновешивания приводов машин.

Цель работы: разработка и исследование математической модели привода со статически уравновешенными вертикально перемещающимися массами для создания научно-обоснованной методики проектирования высокоэффективных машин.

В работе рассмотрен наиболее распространенный тип закона движения, обеспечивающий изменение скорости по трапецеидальному закону. Закон изменения безразмерной мощности $\eta_1(\alpha\,\zeta\,k\,p)$ от относительного времени $\alpha = t / T$ имеет вид:

$$\eta_1(\alpha,\zeta,k,p) = \rho'(\alpha,\zeta)\cdot\left[\rho''(\alpha,\zeta)\cdot(p+1+k)+(1-k)\cdot K_g\right],$$

где $\zeta = \tau / T$ – относительное время разгона (торможения), τ и T – времена разгона (торможения) и цикла, k – коэффициент статического уравновешивания, равный отношению приведенных масс противовеса и вертикально перемещающихся частей, p - коэффициент приведения момента инерции ротора электрического мотора, $K_g = g \cdot T^2 / q_0$ – коэффициент приведения массы вертикально перемещающихся частей, q_0 – перемещение, $\rho'(\alpha, \zeta)$ и $\rho''(\alpha, \zeta)$ – безразмерные скорость и ускорение.

На рисунке 1 представлена зависимость относительной мгновенной мощности η_1 $(\alpha\ \zeta\ k\ p)$ от относительного времени α при различных значениях относительного безразмерного времени разгона (торможения) ζ (0,33; 0,5; 0,13).

Зависимость максимального значения относительной мгновенной мощности от времени разгона (торможения) записывается в виде:

$$\eta_m(\zeta,k,p) = \frac{1}{1-\zeta}\cdot\left[\frac{1}{\zeta(1-\zeta)}\cdot(p+1+k)+(1-k)\cdot K_g\right].$$

На рис. 2 представлена зависимость максимального значения безразмерной мощности от безразмерного времени разгона и торможения. Графики, представленные на рисунках 1 и 2, иллюстрируют существование минимума потребляемой мощности при правильно выбранном времени разгона торможения.

На рис. 3 представлены зависимости максимальной мгновенной мощности от коэффициента статического уравновешивания k при различных значениях коэффициента приведения масс вертикально движущихся частей машины K_g .

Характер зависимости определяется массой движущихся частей, а величина мощности пропорциональна степени уравновешивания машины. При полном уравновешивании максимальная мгновенная мощность составляет 42 безразмерных

единицы и не зависит от массы вертикально движущихся частей. При K_g = 10 (при малых ускорениях) уравновешивание приводит к уменьшению мгновенной мощности на 7%, а при K_g = 0.5 (при больших ускорениях) уравновешивание сопровождается ростом мгновенной мощности на 7%. При K_g = 5 уравновешивание бессмысленно.

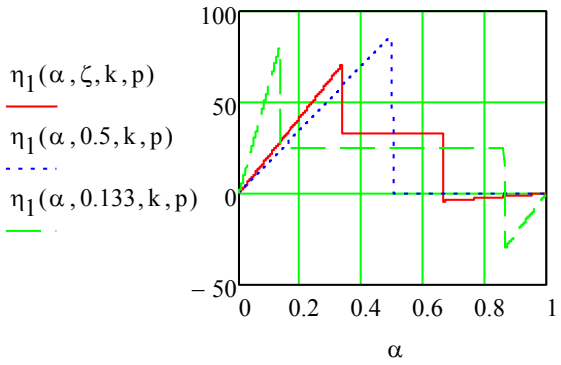


Рисунок 1 - Зависимость мощности η_1 (α ζ k p) от времени при ζ (0,25; 0,5; 0,133)

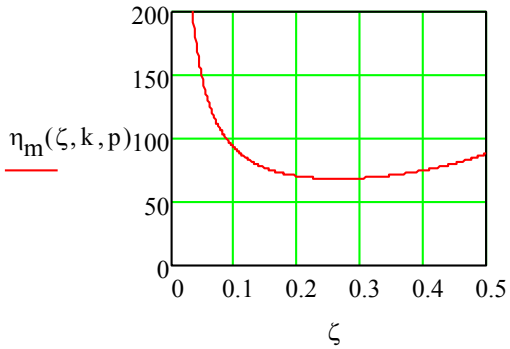


Рисунок 2 - Зависимость максимального значения мгновенной мощности от ζ

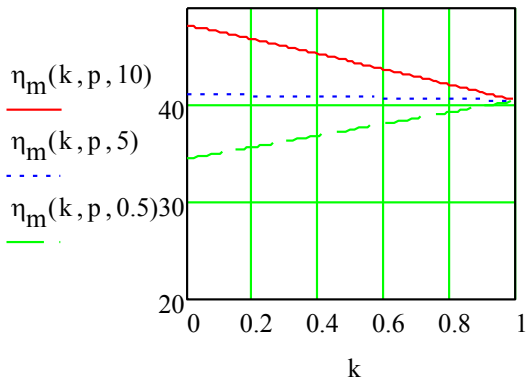


Рисунок 3 - Зависимости минимального значения максимальной мгновенной мощности от коэффициента k при различных K_g (10, 5 и 0,5)

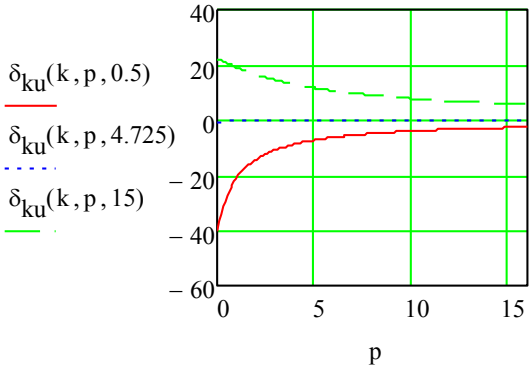


Рисунок 4 - Зависимости эффективности уравновешивания от коэффициента K_g

при различных K_g (10, 5 и 0,5)

На рис. 4 представлены зависимости эффективности уравновешивания (относительного снижения мощности) от коэффициента приведения инерции ротора. Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, как и в предыдущем случае, характер зависимости (возрастающая или убывающая) определяется динамичностью системы. Во-вторых, по мере увеличения коэффициента приведения эффективность уравновешивания стремится к нулю, и мгновенная мощность определяется исключительно инерционностью якоря мотора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность статического уравновешивания машин зависит от динамичности системы, момента инерции ротора электромотора и коэффициента приведения этого момента, который зависит от передаточной функции механизма машины. Полученные результаты позволяют создать методику проектирования высокоэффективных приводов промышленных роботов и технологических машин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ying He, Jiangping Mei, Zhiwei Fang, Fan Zhang, and Yanqin Zhao* 2018 Minimum Energy Trajectory Optimization for Driving Systems of Palletizing Robot Joints *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*.
2. *Paryanto, Brossog M., Bornschlegl M., and J. Franke* 2015 Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 78 1315–1328.
3. *Волков А.Н., Андреев И.Д., Мацко О.Н., Мосалова А.В.* Пути понижения установленной мощности мехатронных модулей с цикловым приводом // Неделя науки СПбПУ: м-лы научн. конференции с междунар. участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч.2. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 30-32.
4. *Волков А.Н., Корнилова А.А., Мацко О.Н.* Синтез оптимальных законов управления цикловыми приводами // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2018: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12-13 апреля 2018 г. - СПб.: РИЦ Горного университета, 2018. С. 22.
5. *Волков Н.А., Мацко О.Н., Мосалова А.В.* Автоматизированный адаптивный привод штангового глубинного насоса // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2018: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12-13 апреля 2018 г. - СПб.: РИЦ Горного университета, 2018. С. 34.
6. *Жавнер В.Л., Чжао Вэнь, Мацко О.Н.* Пружинные приводы с рекуперацией энергии для цикловых перемещений с технологической нагрузкой // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2018: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12-13 апреля 2018 г. - СПб.: РИЦ Горного университета, 2018. С. 42.
7. *Андреев И.Д., Мацко О.Н., Мосалова А.В.* Оптимизация законов движения мехатронных модулей с цикловым приводом // Неделя науки СПбПУ: м-лы научн. конференции с междунар. участием. Лучшие доклады. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 71-74.
8. *Лазарев Р.А., Мацко О.Н., Волков Н.А.* Повышение энергоэффективности мехатронных цикловых приводов // Неделя науки СПбПУ: м-лы научн. конференции с междунар. участием. Лучшие доклады. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 79-82.
9. *Мацко О.Н., Волков А.Н., Мосалова А.В.* Выбор энергосберегающих законов движения мехатронных приводов технологических машин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. Т. 24. №4 С.141-149.
10. *Volkov A.N., Matsko O.N., Mosalova A.V.* 2018 Automated adaptive drive for the sucker rod pump *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 194 022023.
11. *Zhavner V.L., Matsko O.N., Zhavner M.V.* 2018 Comparative Analysis of Mechatronic Drives for Reciprocal Motion *International Review of Mechanical Engineering* 12(9) 784-789.
12. *Головин М.А., Мацко О.Н., Жавнер В.Л.* Способ уменьшения габаритных размеров системы уравновешивания на базе нелинейного пружинного аккумулятора // Неделя науки СПбПУ: м-лы научн. конференции с междунар. участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч.2. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 12-14.
13. *Волков Н.А., Мацко О.Н., Ларин М.Ю.* Вопросы ресурсосбережения при добыче нефти штанговыми глубинными насосами // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения: материалы междунар. науч.-техн. конф. Севастополь, 11-15 сентября 2017 г. - Севастополь: СевГУ, 2017. С.45-46.
14. *Волков А.Н., Мацко О.Н., Мосалова А.В.* Оптимизация циклограмм приводов по критерию энергопотребления // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения: материалы междунар. науч. - техн. конф. Севастополь, 11-15 сентября 2017 г. -

Севастополь: СевГУ, 2017. С.88.
15. *Лазарев Р.А., Мацко О.Н., Волков Н.А.* Анализ способов повышения энергоэффективности цикловых приводов // Неделя науки СПбПУ: м-лы научн. конференции с междунар. участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч.2. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 25-27.

УДК 621.833; 621.83.053

МЕДУНЕЦКИЙ В.М.
Университет ИТМО
ЗИНКОВ В.А.
Университет ИТМО,
АО НПФ «Меридиан»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОНУСООБРАЗНЫХ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В работе предложено использование специальных эвольвентных зубчатых колёс для уменьшения мёртвого хода передачи при изменении направления её вращения. Это обеспечивается конусообразной формой эвольвентных зубьев, которые позволяют регулировать зазор в зоне зацепления при сборке передачи. Рассмотрены варианты изготовления таких беззазорных передач из конструкционных полимерных материалов.

Ключевые слова: конусообразные эвольвентные зубчатые передачи, беззазорные зубчатые зацепления, конструкционные полимерные материалы, аддитивные технологии.

MEDUNETSKIY V.
ITMO University
ZINKOV V.
ITMO University
«Meridian» JSC

DESIGN AND MANUFACTURE OF CONE-SHAPED INVOLUTE GEARS FROM STRUCTURAL POLYMERIC MATERIALS

Abstract. The paper proposes the use of special involute gears to reduce the dead movement of the transmission when changing the direction of its rotation. This is ensured by the conical shape of the involute teeth, which allow you to adjust the clearance in the engagement area during gear assembly. Variants of manufacturing such gapless gears from structural polymer materials are considered.

Key words: cone-shaped involute gears, gapless gears, structural polymeric materials, additive technologies.

В современных устройствах достаточно часто имеется необходимость в использовании зубчатых передач в устройствах различного назначения.

При этом в настоящее время существует устойчивая тенденция использования конструкционных полимерных материалов (КПМ) для изготовления зубчатых передач в механизмах, где воспроизводятся относительно небольшие крутящие моменты [1-3]. Можно выделить следующие основные преимущества зубчатых передач из КПМ: уменьшенный вес и более низкая инерция из-за меньшей плотности материала, способность поглощать удар и вибрацию из-за эластичности материала, сниженный шум, низкий коэффициент трения, возможность использования во влажных средах. Это позволяет использовать такие зубчатые колеса в механических узлах современных малогабаритных автономных мобильных диагностических устройствах, исполнительных механизмах приборов в условиях, малогабаритных мехатронных устройствах, транспортно-технологических системах, где важна небольшая масса и малые

геометрические параметры передачи [4].

Можно отметить, что есть механизмы, где зубчатые передачи используются с периодическим реверсом. В таких передачах возникает мертвый ход из-за наличия зазоров в соединениях и упругих деформаций [5]. Известно, что для уменьшения кинематического мертвого хода в некоторых вариантах передач используют так называемые разводные зубчатые колёса [6]. Разводное зубчатое колёсо представляют собой составное зубчатое колесо, известное также как разрезное. Существуют несколько вариантов конструкции такого зубчатого колеса, суть работы, которого сводится к тому, чтобы непрерывно устранять боковой зазор в зацеплении в процессе работы.

К недостаткам составных колес относятся относительное их усложнение, увеличение габаритов и массы конструкции, увеличение потерь на трение. В ряде случаев небольшие размеры зубчатых передач не позволяют применять рассмотренные выше зазоровыбирающие устройства [7, 8].

Однако, для зубчатых передач из современных видов пластмасс и полимерных композиционных материалов конструкции зубчатых передач с разводными зубчатыми колёсами не желательны, так как такое усложнение приводит к существенному снижению их надёжности.

Авторы данной работы предлагают для обеспечения беззазорного зубчатого зацепления использовать конусообразные эвольвентные зубчатые венцы. Фрагмент такого зубчатого венца представлен на рис. 1.

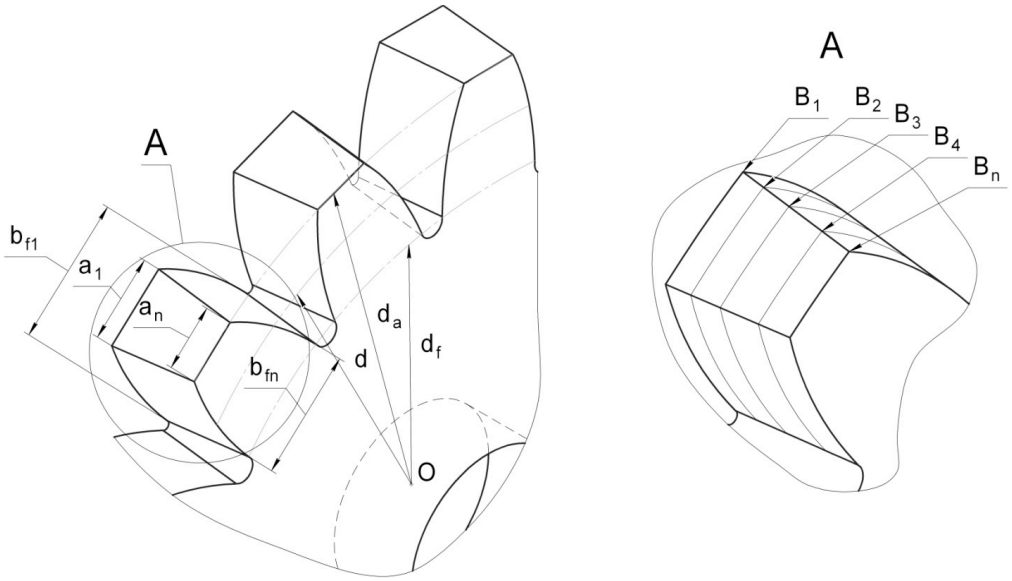


Рисунок 1 – Фрагмент конусообразного эвольвентного зубчатого венца

Конусообразные зубчатые венцы обеспечивают возможность менять путём осевого смещения зубчатых колёс в передаче вдоль осей их вращения величину бокового зазора между зацепляющимися зубьями, что позволяет при определённых условиях сборки передачи выбрать его оптимальную величину. Характерной особенностью таких зубчатых колёс является параллельность эвольвент зуба в указанных сечениях (B1…Bn) [9]. В результате в зоне зацепления при смене направления вращения зубчатых звеньев можно практически обеспечить отсутствие бокового зазора.

Указанные зубчатые колеса можно изготовить с использованием 3D-печати и литья в силиконовые формы.

Для формирования зубчатых колес подходит моделирование методом послойного наплавления (Fusing Deposition Modeling, FDM). В частности экструзионная методика позволяет использовать для работы термопластики, включая полилактиды [10]. При изготовлении зубчатых колёс путём литья в силиконовые формы мастер-модель целесообразно изготовить на 3D-принтере с последующей окантовкой металлической

лентой с задаваемой шероховатостью внешней поверхности [11] с целью обеспечения требуемой внутренней поверхности силиконовой формы.

Исследования показали, что для обеспечения качественной рабочей поверхности зубчатых колёс целесообразно изготавливать их путём литья в оболочковые формообразующие матрицы [12-15]. Их следует изготовлять из современных видов реактопластов с внутренней металлической оболочкой с заранее заданным микрорельефом, что позволит получить качественную поверхность изделия (зубчатого колеса). Соответственно мастер-модели для формирования таких матриц можно также изготовить на 3D-принтере.

Таким образом, предложенные конусообразные зубчатые колёса позволяют в зубчатой передаче практически устранить «мёртвый ход» при смене направления вращения без усложнения её конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bartosch G.* 2015 Polymers outperform metals in precision gearing *Intech Power Core*.
2. *Ulrich A.* 2012 Exploiting the Potential of Plastic Gears *GEARSolutions*.
3. *Dengel B.* 2017 Plastic gears are the future *Machine Design*.
4 *Медунецкий В.М., Горбунов С.А.* Вопросы изготовления малогабаритных зубчатых передач с нестандартными параметрами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. №44.
5. *Dong Y., Yang X.* 2006 Experimental Application of Gapless Gear Pairs to Noise Reduction of an Automobile Engine [J] *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)* 3.
6. Конструкторско-технологическое обеспечение качества приборных зубчатых передач // Технология проектирования и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / под ред. В.Е. Старжинского и М.М. Кане. СПб.: Профессия, 2007.
7. Элементы привода приборов: расчет, конструирование, технологии / В.Е. Старжинский, Е.В. Шалобаев, С.В. Шилько и др. Под ред. Ю.М. Плескачевского. – Минск: Беларус. навука. 2012. – 769 с.
8. *Медунецкий В.М., Шалобаев Е.В., Резников С.С., Старжинский В.Е.* Условия эксплуатации, критерии качества и методы повышения качественных показателей мелкомодульных зубчатых передач // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. №12-1.
9. *Зинков В.А., Медунецкий В.М., Ожиганов А.А*. Усовершенствование электромеханического прибора для измерения угла поворота // Известия высших учебных заведений. Приборостроение - 2019. Т. 62, № 4.
10. *Холодов И.* Технологии 3D-печати, 2014.
11. *Медунецкий В. М.* Технологический синтез оболочковых конструкций зубчатых венцов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2001. №3.
12. *Медунецкий В.М.* Формообразование модифицированных зубчатых венцов комбинированных цилиндрических передач, автореферат. 05.11.14: СПб., 2003. - 386 с.
13. *Старжинский В.Е., Шилько С.В., Шалобаев Е.В.* Технологии производства зубчатых колес из термопластичных полимерных материалов (Обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2018. №2.
14. *Старжинский В.Е., Шалобаев Е.В*. Проектирование пресс-форм для точных пластмассовых колес с использованием технологии быстрого прототипирования // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении. Нижний Новгород; Арзамас: НГТУ-АПИ, 2005.
15. *Медунецкий В.М.* Обеспечение качественных показателей комбинированных цилиндрических передач - СПб: Политехника, 2002. - 160 с.

УДК 681.51: 681.518.3

МИХАЙЛОВ А.Б.,
ТРЕТЬЯКОВ С.Д.,
АНДРЕЕВ Ю.С.,
АУНГ ТХИН КО
Университет ИТМО

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ПЛАТФОРМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Аннотация. Представлены результаты работы по интеграции платформы промышленного интернета вещей с производством в единую цифровую среду. Показана архитектура системы сбора данных, для внедрения её на базе производственной площадки ПАО «Техприбор» и лаборатории Университета ИТМО. Подготовлены методики работы со средой платформы промышленного интернета вещей (IIoT) Winnum: создания трёхмерных сцен и формирования моделей данных производственного оборудования.

Ключевые слова: промышленный интернет вещей, технология производства, Индустрия 4.0, модель данных, брандмауэр, шаблоны устройств, интерфейс управления, сигналы, станок с ЧПУ, промышленные сети, трёхмерная сцена.

MIKHAILOV A.,
TRETIAKOV S.,
ANDREEV I.,
AUNG THINN KO
ITMO University

DEVELOPMENT OF THE PRODUCTION MONITORING SYSTEM BASED ON THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS PLATFORM

Abstract. Here the results of integrating the industrial Internet of things platform and industrial production into a single digital environment. The architecture of a data collection system is shown and ready for its implementation on the PJSC Techpribor and the laboratory of ITMO University. Wehave been prepared methodologies for the Winnum Industrial Internet of Things (IIoT) platform: for creating three-dimensional scenes and for generating production equipment data models.

Keywords: Industrial Internet of Things, manufacturing technology, Industry 4.0, data model, firewall, device templates, management interface, signals, CNC machine, fieldbus, 3D scene.

Применение инструментария платформы IIoT реализует идею динамического отслеживания изделия в процессе производства, а также сбора актуальных данных в режиме реального времени, что определяет прозрачность всех этапов производства с точки зрения контроля происходящих процессов [1]. Современные программные комплексы управления производством позволяют в режиме реального времени контролировать процессы в цехах, своевременно корректировать технологию производства. Достигаемые вследствие этого эффективность производства и точность на производственных линиях определяют оптимальную реализацию имеющихся ресурсов [2]. Отталкиваясь от текущего уровня развития исследуемого вопроса, заметим: общее определение рассматриваемой концепции обрело конкретные черты и, согласно ряду уже опубликованных идей, представляет собой производство, опирающееся на постоянный

анализ получаемых данных с целью формирования закономерностей наиболее оптимального и экономически эффективного функционирования, основанного на принятых решениях, базирующихся на информации, предоставляемой средствами промышленного интернета вещей (IIoT) [3]. Очевидно, что производство в совокупности с концепцией «Индустрии 4.0» – это новый способ выпуска продукции, объединяющий технологию IIoT с базовой технологией производства, способный реализовать комплексную поддержку на протяжении всего жизненного цикла продукта.

В контексте исследования системы мониторинга производственных процессов с применением технологии промышленного интернета вещей подготовлена единая информационная среда, которая объединяет станки и оборудование лаборатории технологии цифрового производства Университета ИТМО, расположенные на факультете систем управления и робототехники – оборудование Schneider Electric, и на территории завода ПАО «Техприбор» – контрольно-измерительная машина и станки с ЧПУ. В качестве всеобъемлющей единой среды применяем платформу промышленного интернета вещей Winnum.

Предложенная система– важный инструмент, как для участников производства, так и для руководства. Платформа Winnum предназначена для удаленного мониторинга, диагностики и оптимизации режимов работы промышленного оборудования (в нашем случае станков и др. устройств на производстве) и процессов их эксплуатации. Всё это последовательно сокращает сроки, расходы и риски, связанные с поломками оборудования, непредвиденными и плановыми простоями, появлением брака, человеческим фактором и прочими проблемами, свойственными промышленному производству. Сбор данных происходит на каждом этапе в режиме реального времени без участия человека. Далее полученная информация подвергается анализу на основе, в том числе, методологии общей эффективности оборудования (OEE). В конечном итоге на основе проведённого мониторинга происходит переосмысление технологии и процессов производства, более рациональное использование материальных и человеческих ресурсов.

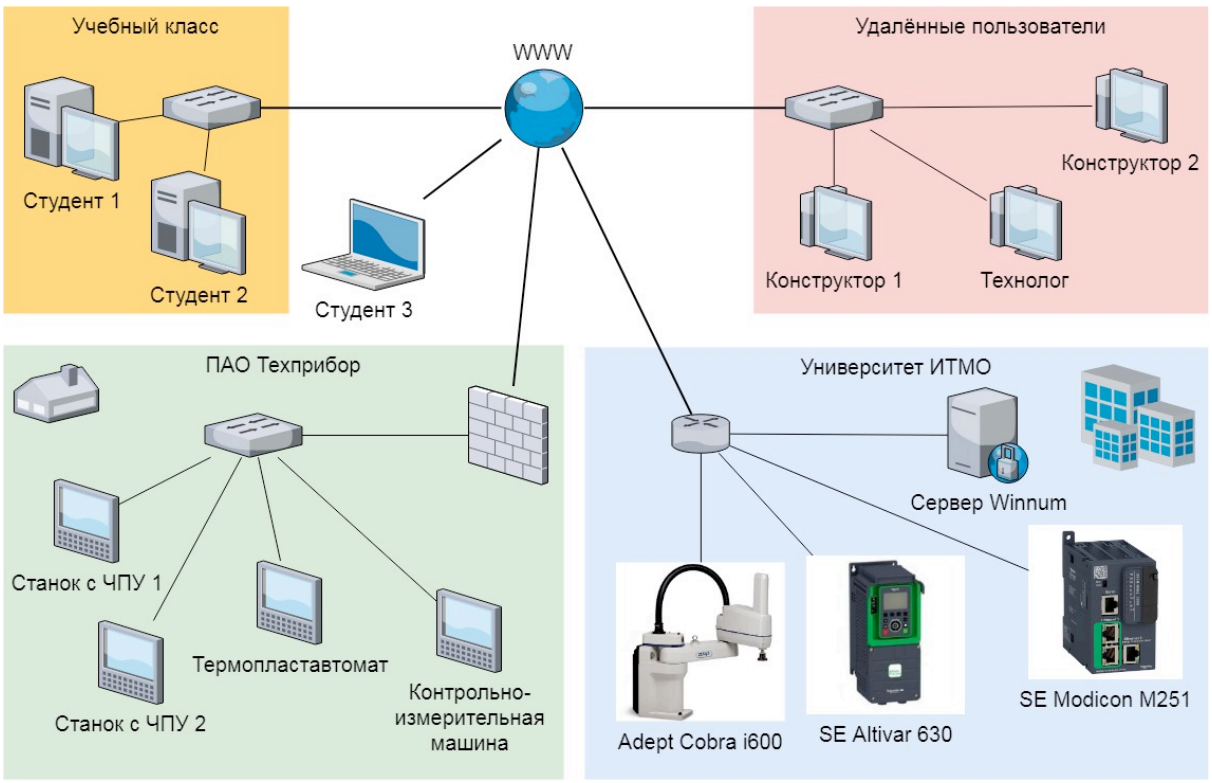


Рисунок 1 – Архитектура среды IIoT на базе лаборатории технологии цифрового производства Университета ИТМО и ПАО «Техприбор»

Базовая архитектура единой информационной среды, предлагаемая нами в рамках текущего исследования, представлена на рис. 1. Основное приложение Winnum Platform мы размещаем на сервере лаборатории цифрового производства Университета ИТМО. Также там развёрнуты ресурсы для хранения получаемых данных: приложение Winnum Cloud на основе СУБД Cassandra. Клиентская часть управления платформой через браузер позволяет работать с данными удалённо, что открывает широкие возможности, в том числе и для дистанционного обучения работе с платформой и имеющимся оборудованием. Студенты могут работать с оборудованием лаборатории Университета ИТМО: роботом Adept Cobra i600 и компонентами стенда Schneider Electric. В то же время только специалисты с соответствующим уровнем допуска проходят верификацию платформой и допускаются к работе с оборудованием университета, расположенным на территории предприятия ПАО «Техприбор», поскольку имеющийся внутренний брандмауэр и прописанные политики безопасности чётко разграничивают полномочия пользователей. На заводе к платформе подключаем станки HAAS, термопластавтомат и контрольно-измерительная машина.

Предложена и прошла апробацию методика формирования трёхмерных сцен в Winnum для 3D визуализации производственных площадок [16-17]. Также подготовлена методика формирования моделей данных промышленного оборудования. Для того чтобы сигналы, поступающие от устройств, обрабатывались и отображались платформой, необходимо предоставить платформе данные об оборудовании, выраженные в моделях данных. Имеющаяся библиотека моделей не способна описать всё имеющееся действующее оборудование, поэтому возникла необходимость в разработке методики, позволяющей упростить и формализовать процесс создания шаблонов оборудования для платформы Winnum.

На текущий момент на основе предложенных методик уже разработаны трёхмерные сцены цехов механообработки двух приборостроительных предприятий, функционирует развёрнутая информационная среда на основе Winnum, включающая в себя оборудование лаборатории в стенах Университета ИМТО и на территории ПАО «Техприбор».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Colombo A.W., Bangemann T., Karnouskos S., Delsing J., Stluka P., Harrison R., Jammes F., Martinez L., Jose L.* 2014 *Industrial Cloud – Based Cyber – Physical Systems: The IMC – AESOP Approach. Springer* 245.
2. *Iuvshin A.M., Tretyakov S.D., Gibadullin I.N., Andreev Y.S.* 2019 Thermoplastic Polymer Composites Production by Automated Fiber Placement Method *Mining Idustry: Innovations and Prospects for the Development of Materials Science 7th International Scientific Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering (IPDME)* 78-83.
3. Edge computing in the industrial internet of things environment: Software-defined-networks-based edge-cloud interplay 2018 *IEEE Commun. Mag.* 56 (2) 44-51.
4. *Camarinha-Matos L.M., Tomic S., Graça P.* 2016 Technological innovation for the internet of things *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol* 25(2) 617-622.
5. *Кулагин М., Волков И.* Промышленный интернет на практике: удаленная диагностика станков с ЧПУ с помощью технологии Winnum / Приложение к журналу Control Engineering.- октябрь, 2016. С. 74-77.
6. *Третьяков С.Д., Андреев Ю.С., Абрамян К.В., Горбенко А.А., Юрьева Р.А.* Разработка информационно-технологической платформы цифрового производства / Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2020. Т. 63(2) С. 149-156.
7. *Martinez B., Montón M., Vilajosana I., et al.* 2017 Early scavenger dimensioning in wireless industrial monitoring applications *IEEE Internet Things J* 3(2) 170-178.

8. Signum Winnum CNC 2.4. Удаленный мониторинг изделий. Учебный курс. 2017. с 1-50.
9. *Куркова Ю., Васильев А., Ловыгин А., Степанов В.* Системы мониторинга станков с ЧПУ в России. Обзор технологий и рынка за 2016 г. // Планета CAM – Ноябрь 2017. С. 62-104.
10. *Gaj P., Jasperneite J., Felser M.* 2013 Computer communication within industrial distributed environment - a survey *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 9(1) 182-189.
11. *Диммлер Г., Фритц Х., Фрешль Д., Хеглингер В., Керн А.* «Умные» заводы на платформе UPCUA / Полимерные материалы. – 2017. №3. С.18-23.
12. *Patel P., Ali M.I., Sheth A.* 2018 From raw data to smart manufacturing: AI and semantic web of things for industry 4.0 *IEEE Intell. Syst.* 33 (4) 79-86.
13. *Росляков А.В.* Интернет вещей / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин, А.Ю. Гребешков. – Самара: ПГУТИ, 2015. – 200 с.
14. Козлецов А.П., Решетников И.С. Сбор данных в MES-системах. Основные подходы. – Автоматизация производства / Рациональное управление предприятием. No 1. 2013. С.74–76.
15. Интеграция данных об изделии на основе ИПИ / CALS-технологий в промышленности. - М.: НИЦ CALS «Прикладная логистика», 2012. – 140 с.
16. *Михайлов А.Б., Третьяков С.Д., Аунг Т.К., Самко М.Л.* Применение платформы промышленного интернета вещей для создания цифровых моделей производства / Наука и бизнес: пути развития, 2019. № 11(101). С. 79-82.
17. *Михайлов А.Б.* Разработка трёхмерных сцен цехов механической обработки в среде платформы промышленного интернета вещей / XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодежная научная конференция (Казань, 7-8 ноября 2019 г.), 2019. Т. IV. С. 47-50.

УДК 621.9

МИХАЙЛОВ С.В.,
КОВЕЛЕНОВ Н.Ю.,
МИХАЙЛОВ А.С.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
Костромской государственный университет,
ООО «Вириал», Санкт-Петербург

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Аннотация. Разработана методика оптимизационного проектирования СМП, позволяющая оценивать эффективность различных форм задних поверхностей инструмента и обосновывать их рациональные геометрические параметры. Предложены новые конструкции твердосплавных режущих пластин с криволинейной формой задней поверхности, позволяющая существенно увеличить ресурс инструмента. Проведены производственные испытания нового инструмента, подтвердившие высокую практическую значимость совершенствования СМП за счет создания видоизмененной формы задней поверхности.

Ключевые слова: резание материалов; проектирование инструмента; моделирование износа; модификация задней поверхности инструмента; режущие пластины с укороченной задней поверхностью.

MIKHAYLOV S.V.,
KOVELENOV N.YU.,
MIKHAYLOV A.S.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Kostroma State University

OPTIMIZATION OF COMPLEX PROFILE CUTTING PLATES GEOMETRY WITH A MODIFIED BACK SURFACE

Abstract. A method of optimization design of the SMP has been developed that allows evaluating the effectiveness of various forms of the tool 's back surfaces and justifying their rational geometric parameters. New designs of hard-alloy cutting plates with a curved shape of the back surface are proposed, which allows to significantly increase the tool life. Production tests of the new tool were carried out, which confirmed the high practical significance of improving the SMP by creating a modified shape of the back surface.

Keywords: cutting materials; tool design; wear modeling; modification of the back surface of the tool; cutting plates with a shortened back surface.

Расширение технологических возможностей инструментального производства повышает актуальность работ по созданию нового сложнопрофильного инструмента с модифицированной задней поверхностью, обладающего повышенной работоспособностью. В условиях скоростного резания современных труднообрабатываемых материалов ресурс инструмента в основном ограничен величиной износа его задней поверхности. В соответствии с энергетической теорией изнашивания инструмента объемный расход Q изнашиваемого материала можно представить как

функцию, зависящую от мощности резания и прочности твердого сплава.

Принимая во внимание пропорциональный характер влияния износа задней поверхности инструмента $h_з$ на тангенциальную составляющую силы резания P_Z и незначительное изменение твердости инструмента HV до момента его катастрофического износа, объемный расход Q ($м^3/с$) изнашиваемого материала можно принять неизменным во времени для конкретных пар трения и условий эксплуатации. Возможность такого упрощения подтверждается прямолинейным характером изменения нормального износа пластины от времени резания и постоянство скорости нарастания износа на этом участке [1, 2].

Связь между величиной износа задней поверхности и временем работы инструмента можно установить из отношения объема изношенной части лезвия V ($м^3$) к объемному расходу Q ($м^3/с$). Учитывая, что до момента катастрофического износа инструмента наблюдается относительно слабое влияние ширины фаски износа $h_з$ на интенсивность износа J и, следовательно, на объемный расход изнашиваемого материала Q, то для стандартных пластин с прямолинейной задней гранью износ задней грани можно представить в виде уравнений

$$h_з = C_h \cdot \sqrt{\frac{T \cdot \cos(\alpha + \gamma)}{\sin\alpha \cos\gamma}}, \tag{1}$$

$$h_n = C_h \cdot \sqrt{\frac{T \cdot \sin\alpha \cos\gamma}{\cos(\alpha + \gamma)}}, \tag{2}$$

где $h_з$ – фаска износа; h_n – размерный износ; T - стойкость инструмента; α и γ – соответственно, задний и передний углы инструмента.

C_h – коэффициент, зависящий от условий резания и свойств обрабатываемого и инструментального материалов. Этот коэффициент может быть определен по одной из точек экспериментальной кривой износа.

Полученные зависимости позволяют определить характер и степень влияния геометрических параметров лезвия инструмента на интенсивность изнашивания. Расчеты показывают, что влияние заднего угла на износостойкость режущей пластины наиболее сильно проявляется в диапазоне малых значений задних углов. При увеличении заднего угла от 5° до 9° период достижения критерия оптимального износа увеличивается почти в 2 раза. Вместе с тем, уменьшение интенсивности роста $h_з$ сопровождается ростом скорости размерного износа плстины h_n, что необходимо учитывать на чистовых операциях механообработки.

Существенное влияние заднего угла на износостойкость инструмента указывает на актуальность и практическую значимость методов управления динамикой износа инструмента путем изменения геометрической формы его задней поверхности. Так например наличие выпуклой формы задней поверхности позволяет существенно повысить период стойкости инструмента до момента достижения предельно допустимой величины фаски износа по задней поверхности $h_з$. Стойкость пластины с радиусом кривизны поверхности R = 3мм и начальным задним углом α = 10° увеличивается в 2 раза по сравнению со стандартной геометрией пластины. Чем меньше радиус кривизны поверхности, тем выше период стойкости пластины. Вместе с тем необходимо учитывать, что уменьшение интенсивности износа $h_з$ сопровождается ростом скорости размерного износа пластины h_n. Поэтому для чистовых операций пластины с плоской задней поверхностью и малыми задними углами могут сохранять свою технологическую стойкость более длительное время

В ряде случаев эффективной является форма задней поверхности, состоящая из набора элементарных поверхностей с различной геометрией. Например, применительно к сборным фрезам, оснащенным негативными тангенциальными пластинами, может быть рекомендована геометрия задней поверхности, состоящая из прямолинейного участка длиной l, выпуклой и вогнутой поверхностей с R_1 и R_2, отстоящих от режущей кромки на

расстоянии, не превышающим величину критического износа $h_{кр}$ (рис. 1). Такую форму задней поверхности пластины можно назвать комбинированной поверхностью. Темп изнашивания $dh_з/dT$ инструмента с комбинированной задней поверхностью зависит от формы и размеров элементарных поверхностей.

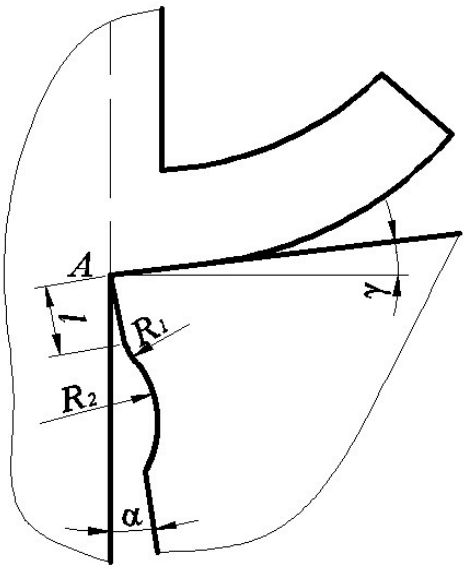
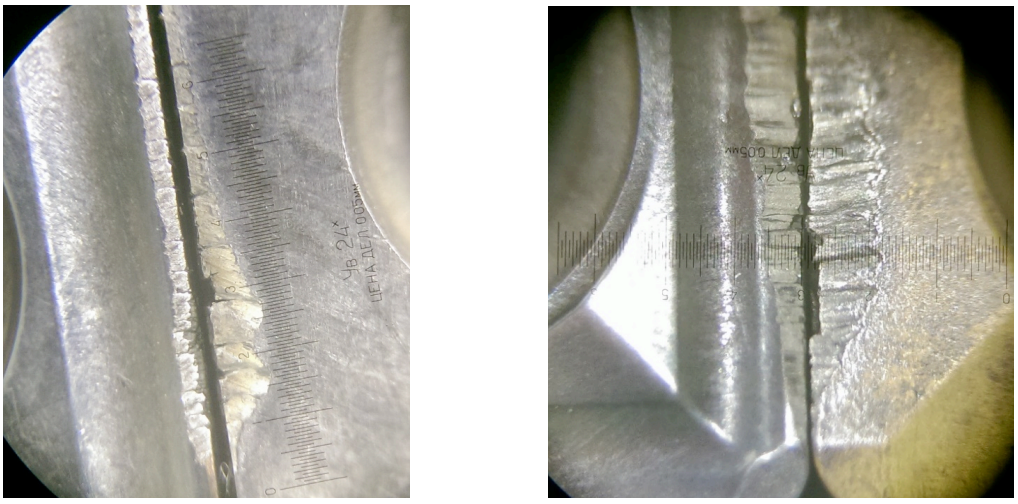


Рисунок 1 – Схема резания пластиной с комбинированной задней поверхностью

Расчеты показывают, что применение фрезерных пластин с комбинированной задней поверхностью позволяет увеличить стойкость инструмента в несколько раз. Ограничивающим фактором при выборе формы и размеров геометрических параметров задней поверхности является прочность режущего лезвия пластины. Поэтому алгоритм расчета СМП должен включать оценку прочности предлагаемых конструкций. С целью обеспечения максимального ресурса инструмента с учетом прочности пластин разработана методика автоматизированного проектирования и оптимизации расчета геометрических параметров сложнопрофильной задней поверхности в среде ProEngineer. Методика включает следующие этапы: 1) создание расчетной модели пластины; 2) моделирование износа задней поверхности; 3) прочностной расчет режущих пластины с усложненной задней поверхностью; 4) оптимизационный анализ по критерию максимальной стойкости с учетом прочности режущей пластины. Оптимизационное проектирование начинается с моделирования участка лезвия инструмента шириной 1 мм с криволинейным профилем задней поверхности, состоящим из нескольких элементарных поверхностей. Далее создается плоскость, моделирующая фаску износа по задней поверхности пластины. Точки пересечения этой плоскости с лезвием инструмента используются для расчета объема изношенной части инструмента. Прочностной расчет модели пластины ведется в приложении Mechanica, которое вызывается непосредственно из сеанса работы над 3*D*-моделью пластины. Расчет включает разбиение модели пластины на конечные элементы, задание контактных нагрузок на передней и задней поверхности пластины, определение напряженно-деформированного состояния пластины и сравнение его с критерием разрушения. Сетка конечных элементов создается с использованием инструмента AutoGEM. Величина максимального размера элемента сетка подбираться опытным путем по результатам пробных расчетов. В качестве критерия разрушения может быть выбран модифицированный критерий Мора. После расчета прочности пластины из приложения «Механика» возвращаемся в стандартное приложение и переходим в обычное окно моделирования ProEngineer. Таким образом, в результате итерационного изменения геометрических параметров подбирается оптимальная конструкция пластин.

Изложенный алгоритм проектирования был использован для разработки новых конструкций пластин с комбинированными и выпуклыми задними поверхностями, предназначенными для получистовой и черновой обработки материалов. В результате оптимизационного проектирования предложены новые конструкции пластин, которые имеют криволинейные передние и задние поверхности, образующие в главной секущей плоскости пластин лезвие с уменьшающимися по мере удаления от режущей кромки передними углами и увеличивающимися задними углами, причем интенсивность увеличения задних углов меньше или равна интенсивности уменьшения передних углов [3]. Применение таких пластин позволяет увеличить не только износостойкость, но и прочность инструмента. Повышение прочности режущей пластины происходит за счет уменьшения и более благоприятного распределения напряжений в лезвии инструмента, возникающих под действием сил резания. Эффект повышения прочности возрастает при увеличении радиуса кривизны задней поверхности $R_з$ и уменьшении радиуса кривизны передней поверхности $R_п$. Например, при результирующей силе резания равной 548 Н напряжения в лезвии инструмента с криволинейными рабочими поверхностями $R_з = R_п =$ 10 мм, $\gamma_0 = 0$ и $\alpha_0 = 10°$ снижается на 30 % по сравнению с напряжениями в режущем клине с плоскими рабочими гранями. Снижение напряжений увеличивает запас прочности инструмента, что позволяет работать им в условиях повышенных подач и глубин резания.



а б в г

Рисунок 2 – Сопоставление износа новых пластин (*а*, *в*)
со стандартными пластинами (*б*, *г*):
а – SNEX 1207AN-TL, *б* – SNEX 1207AN, *в* – SNEX 1207AN-15TL, *г* – SNEX 1207AN-15,
количество обработанных рельсов новыми пластинами 15 шт., стандартными 10 шт

Для практического использования предложенного метода повышения износостойкости инструмента разработаны новые конструкции тангенциальных режущих пластин SNEX 1207AN и SNEX 1207AN-15, на задних поверхностях которых вдоль режущих кромок выполнены канавки, уменьшающие площадь задней поверхности лезвия инструмента, контактирующей в процессе резания с поверхностью обрабатываемой заготовки [4]. Производственные испытания пластин SNEX 1207 AN и SNEX 1207 AN-15 проводились на Рельсосварочном предприятии № 18 РЖД. Условия проведения испытаний: материал обрабатываемых рельсов – рельсы Р65 из специальной стали, бывшие в эксплуатации; оборудование – рельсофрезерный станок РФС 6992М; инструмент – профилирующая фреза диаметром 560 мм производства «СКИФ-М». Режимы резания: скорость $v = 180$ м/мин, глубина $t = 0{,}3…0{,}6$ мм, подача $s = 3…8$ м/мин, фрезерование без охлаждения. Стойкость оценивалась по количеству обработанных рельсов длиной 25 м. Критерий затупления пластины – появление прижогов и рисок (задиров) на обработанной поверхности рельсов. Работоспособность пластин

сравнивалась с пластинами стандартной конструкции. В результате испытаний выявлено, что в процессе эксплуатации режущих пластин с комбинированной задней поверхностью при выходе износа на поверхность канавки температура трения и износ пластины $h_з$ стабилизируются. Уменьшение температуры резания благоприятно сказывается на качестве рельсов, что проявляется в устранении прижогов на обработанной поверхности. Рост фаски износа в процессе резания уменьшается, а время работы инструмента до величины критического износа продлевается. Эффект от оптимизации конструкции задней поверхности иллюстрируют сравнительные фотографии изношенных стандартных и новых пластин (рис. 2).

Хорошо видно, что на пластинах с видоизмененной задней поверхностью SNEX 1207AN-TL и SNEX 1207AN-15TL износ распределен более равномерно вдоль активного участка режущей кромки, а величина фаски износа существенно ниже, чем у стандартных пластин SNEX 1207AN и SNEX 1207AN-15, изготовленных из одного и того же твердого сплава. Стойкость новых пластин SNEX 1207AN-TL и SNEX 1207 AN-15 TL превышает стойкость стандартных пластин более чем в 2 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Михайлов С.В.* Разработка сменных режущих пластин с комбинированной задней поверхностью / С.В. Михайлов, А.С. Михайлов // Брянск: Вестник БГТУ. – 2016. №1(49).
2. *Ковеленов Н.Ю.* Исследование износостойкости твердосплавных дисковых фрез с различной геометрией задней поверхности / Н.Ю. Ковеленов, С.В. Болотских, С.В. Михайлов, А.С. Михайлов // СТИН. 2016. №8. С. 12-16.
3. Патент № 185740 RU, МПК B27/00, B23C 5/20. Сменная режущая пластина / С.В. Михайлов, Н.Ю. Ковеленов, А.С. Михайлов, А.М. Беляков. – № 2018120971, заявл.01.06.2018; опубл. 17.12.2018, Бюл. № 35.
4. Патент № 154601 РФ, МПК B23C 5/20. Сменная тангенциальная многогранная режущая пластина / С.В. Михайлов, А.С. Михайлов, В.И. Сильченко. – № 2014142404/02, заявл.21.10.2014; опубл. 27.08.2015, Бюл. №24.

УДК 622.236.22

НАЗАРОВА М. Н.,
Национальная Ассоциация СПГ
КОРОБКОВ Г. Е.
Уфимский государственный нефтяной технический университет

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ НА РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ

Аннотация. Вертикальные стальные резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов, работающие в условиях малоцикловых деформаций, находятся в эксплуатации более 30-50 лет и большинство из них исчерпало свой ресурс. В работе представлены результаты исследования макроструктуры и микроструктуры низко-углеродистых сталей, вырезанных из первого пояса стенки резервуара, после 35 лет эксплуатации. Выявлены два основных этапа формирования структуры стали, предшествующей зарождению микротрещины. Предложено решение по проведению мониторинга особо опасных участков корпуса резервуара с помощью специальных методов диагностического обследования, с целью предупреждения образования микротрещин и как следствие предотвращения аварий в резервуарных парках.

Ключевые слова: вертикальный стальной резервуар, деформация, малоцикловая деформация, дефект, микроструктура, электронная микроскопия, фрактографический анализ, разрушение, безопасная эксплуатация.

NAZAROVA M. N.,
National Association LNG
KOROBKOV G. E.
Ufa State Petroleum Technological University

VERTICAL STEEL TANKS LONG-TERM OPERATION INFLUENCE ON THE DESTRUCTION PROCESSES DEVELOPMENT

Abstract. Vertical steel tanks for storing oil and petroleum products, low-cycle deformations operating conditions, have been in operation for more than 30-50 years, and most of them have exhausted their resource. The research presents the macrostructure and microstructure study results of low-carbon steels cut from the first tank wall zone after operation 35 years. Steel structure formation has two main stages that precede the micro-cracks origin are identified. A solution is proposed for monitoring particularly dangerous areas of the tank body using special diagnostic methods to micro-cracks formation early detection, and, as a result, prevent accidents in tank farms.

Keywords: vertical steel tank, deformation, low-cycle deformation, defect, microstructure, electron microscopy, fractographic analysis, destruction, safe operation.

Длительная эксплуатация вертикальных стальных резервуаров (РВС) без своевременного обслуживания и без проведения диагностического контроля может привести к аварийному разрушению [1-6]. Для того, чтобы предотвратить возможное разрушение необходимо исследовать и проанализировать процессы, происходящие в металле в процессе эксплуатации, определить закономерности изменения структуры и как все это влияет на механические свойства [2, 7-11]. В этой связи результаты данной работы основаны на эксперименте, проведенном на образцах из низко-углеродистых сталей, вырезанных в двух направлениях основного металла послойно по 1 мм и сварных

швов из первого пояса РВС-5000 ДТ-З-КЗ после 35 лет и 42 лет эксплуатации соответственно [12 - 14]. Исследование определенно иллюстрирует распределение дислокационных структур при малоцикловой деформации с последующей трансформацией структуры сталей во времени при стандартных условиях эксплуатации Т=293,16 К (+20 °С), Р=101,325 МПа. Испытания образцов проводились на лабораторном оборудовании «Instron», результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Механические свойства Ст3 сп по толщине стенки резервуара

Место вырезки образца	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	ψ, %
Поверхностный слой, контактирующий с ДТ-З-КЗ	373	245	21	26
Первый средний слой	412	255	29	41
Второй средний слой	417	255	27	40
Третий средний слой	417	255	28	47
Слой, контактирующий с внешней средой	432	280	26	40
По ГОСТ 380-2005, не менее	373	245	26	-

Для проведения анализа макро- и микроструктуры сталей были взяты образцы контрольных заготовок для механических испытаний основного металла и сварных соединений. Согласно полученным данным при анализе макроструктуры образцов стали после травления на оптическом микроскопе МИМ-10 (х40), поверхность содержит поры и поверхностные макротрещины, что существенно снижает прочность стенки резервуара и повышает вероятность хрупкого разрушения. Микроскопический анализ проводили на микроскопе «Neophot-32», который показал феррито-перлитную структуру сталей с выраженным поверхностным коррозионным слоем со стороны границы контакта с продуктом. Электронно-микроскопический анализ показал изменения тонкой структуры и концентрацию дислокаций на границах зерен, что неизбежно привело к зарождению микротрещины. Результаты фрактографического анализа показали наличие сульфидов FeS и MnS, что сигнализирует о наличии охрупчивания в металле стенки РВС [15].

При диагностическом X-Ray освидетельствовании наиболее опасных зон стенки РВС по поясам, можно выявить характерную структуру феррито-перлитных резервуарных сталей в соответствии накопленными и распределенными дислокациями в структуре, приведенную в данном исследовании, что позволит спрогнозировать или безопасную эксплуатацию или вывести на ремонт.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса сварных вертикальных резервуаров. РД 112 РСФСР - 029 - 90 / Бабин Л.А., Каравайченко М.Г., Ценев Н.К. и др. // Госкомнефтепродукт РСФСР. - Уфа, Изд. УфНИ, 1990. -46 с.
2. *Назарова М.Н.* Исследование механизмов релаксации внутренних напряжений в стенке резервуара и их влияние на развитие процессов разрушения. диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Уфа, 2000.
3. *Кондрашова О.Г., Назарова М.Н.* Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров. Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2004. № 2. С. 19.
4. *Sultanbekov, R.R., Terekhin, R.D., Nazarova, M.N.* Effect of temperature fields and bottom sediments of oil products on the stress-strain state of the design of a vertical steel tank. 2020. Journal of Physics: Conference Series.
5. *Sultanbekov, R.R., Nazarova, M.N.* The influence of total sediment of petroleum products on the corrosiveness of the metal of the tanks during storage 2019. E3S Web of Conferences.
6. *Ценев Н.К., Митрофанов О.А., Ценев А.Н., Кудояров Р.У.* Влияние дефектов на разрушение

резервуаров и магистральных трубопроводов. В сборнике: Обеспечение промышленной безопасности при эксплуатации резервуаров и резервуарных парков. Ассоциация "Башкирская Ассоциация Экспертов"; ОАО "Газпром нефтехим Салават"; ФБГОУ ВПО "Уфимский государственный нефтяной технический университет". 2011. С. 143-152.
7. *Шаммазов А.М., Ценев Н.К., Акчурин Х.И., Назарова М.Н., Исмаков Р.А., Лебедич С.П., Суханов В.Д., Чудинов Б.А., Кришталл М.М.* Сверхмелкозернистые материалы и перспективы их использования в горном деле и трубопроводном транспорте. В сборнике: Горный вестник Уфа, 2000. С. 33-36.
8. *Nosov V. V.* On the Principles of Optimizing the Technologies of Acoustic-Emission Strength Control of Industrial Objects// Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016, 2016, Vol. 52, No. 7, pp. 386–399.
9. *Shipachev A.M., Nazarova M.N.* Phenomenon of low-alloy steel parametrization transformation at cyclic loading in low-cyclic area. В сборнике: International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2017, IPDME 2017 Сер. "IOP Conference Series: Earth and Environmental Science" 2017. С. 092017.
10. *Самигуллин Г.Х., Воронов В.А., Назарова М.Н.* Обеспечение безопасности сверхнормативной эксплуатации зданий и сооружений нефтегазовых предприятий. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S7. С. 701-709.
11. *Самигуллин Г.Х., Назарова М.Н., Самигуллина Л.Г., Юсупов Г.А.* Оценка поврежденности металлических элементов нефтегазовых объектов микрообразцовым методом. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 6. С. 311-320.
12. ГОСТ 31385-2016 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия (с Поправкой). Дата введения 2017-03-01.
13. ГОСТ 380-2005 Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки (с Изменением N 1). Дата введения 2008-07-01.
14. ГОСТ 5640-68 Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты. Дата введения 1970-01-01.
15. *Нобукадзу О.* Хрупкое разрушение резервуаров, рассчитанных на высокое давление, и меры защиты от этого разрушения: Пер. с англ. Ж. Никон. Эзосан Таккей Си, т. 46, № 510. - С.152-156.

УДК 622.236.22

НАЗАРОВА М. Н.,
Национальная Ассоциация СПГ
КОРОБКОВ Г. Е.
Уфимский государственный нефтяной технический университет

ФОРМИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ФАКТОРОВ

Аннотация. Магистральные газопроводы в процессе эксплуатации подвергаются воздействию как внутренних, так и внешних факторов, в следствие чего образуются дефекты как определённых видов так и смешанных видов дефекты. Наиболее опасным из них является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН), по результатам расследований отказов участков магистральных газопроводов, именно КРН является причиной до 50% выхода из строя участков магистральных трубопроводов. В данной работе представлен анализ отказов магистральных газопроводов по причине КРН под влиянием внутренних и внешних факторов. Выявлено влияние таких факторов как постоянные и переменные нагрузки, снижение эффективности работы электрохимической защиты, состав грунта, влияние температуры, химический состав трубопроводной стали, состояние металла стенки трубы.

Ключевые слова: магистральный газопровод, коррозия, коррозионное растрескивание под напряжением, отказ, дефект, электрохимическая защита от коррозии, постоянные и переменные нагрузки, разрушение, безопасная эксплуатация.

NAZAROVA M. N.,
National Association LNG
KOROBKOV G. E.
Ufa State Petroleum Technological University

STRESS CORROSION CRACKING FORMATION ON MAIN GAS PIPELINES UNDER THE EXTERNAL AND INTERNAL FACTORS INFLUENCE

Abstract. Main gas pipelines are exposed to both internal and external factors during operation, both certain types resulting in defects and mixed types of defects. The most dangerous of them is stress corrosion cracking (SCC). according to the results of investigations of failures of sections of main gas pipelines, SCC is the cause of up to 50% of the failure of sections of main pipelines. This paper presents an analysis of failures of main gas pipelines due to SCC under the influence of internal and external factors. The influence of such factors as constant and variable loads, reduced efficiency of electrochemical protection, soil composition, temperature influence, the chemical composition of pipeline steel, the state of the metal of the pipe wall was revealed.

Keywords: main gas pipeline, corrosion, stress corrosion cracking, failure, defect, electrochemical corrosion protection, constant and variable loads, failure, safe operation.

В процессе эксплуатации магистральные газопроводы (МГ) подвергаются различного рода постоянным и переменным нагрузкам. Кроме этого на стенке трубопровода, под влиянием внешних и внутренних факторов, таких как состав грунта, температура, величина защитного тока и т.д. образуются различные дефекты как одного вида, так смешанного вида дефекты [1 - 4, 6 - 8]. Один из наиболее опасных дефектов на МГ является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) [12]. Причем, согласно проведенному анализу отказов при множественных

диагностических обследованиях участков МГ, колонии трещин КРН в трубных сталях встречаются в любых природно-климатических зонах, на трубах различных производителей, независимо от конструкции и размера труб. Макроструктурный анализ стали Х65 представлен на Рисунке 1, проводится на оптическом микроскопе МИМ-10 (х40).

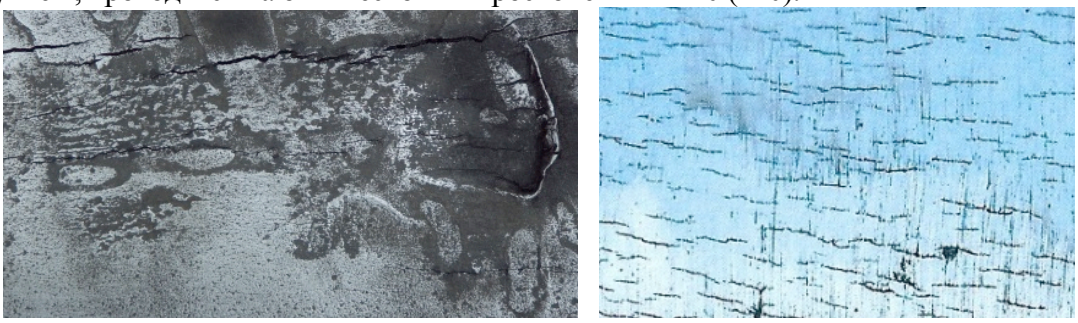


Рисунок 1 – Макроструктурный анализ поверхности стали Х65 (х40).

Образование КРН начинается на поверхности трубы участка МГ под изоляционным покрытием в контакте с грунтовым электролитом (подпленочным электролитом) при потере свойств адгезионного слоя пассивной защиты [5, 8-10]. В трубных сталях выделяют два основных типа КРН – межкристаллитное растрескивание КРН в бикарбонатных электролитах с высоким значением pH>9,3, где происходит локальное анодное растворение металла, и транскристаллитное КРН с близким к нейтральному pH, где КРН образуется под действием механической нагрузки и наводораживания с локальным растворением поверхности металла. На примере результатов отчетов аварийных разрушений участков МГ ООО «Севергазпром» построены графики зависимостей аварий по причине КРН в зимние и летние периоды, где выявлен положительный рост колоний КРН при росте температуры. Длина участка МГ: 115 км, диапазон температур эксплуатации: от +60 $^{\circ}C$ до +25 $^{\circ}C$ в летний период, от +30 $^{\circ}C$ до -30 $^{\circ}C$ в зимний период. По результатам Slow strain rate testing выявлено влияние температуры на развитие колоний КРН. Согласно первому графику, при изменении температуры от 25 до 50 градусов по Цельсию, КРН составил от 0.85 до 0.87 для труб из Х65 и до 0.9 для труб из Х60. Анализируя второй график было обнаружено, что при возрастании температуры от 25 до 50 $^{\circ}C$ повышается способность металла к поглощению водорода в два раза для сталей марки Х65 и для сталей марки Х60 в 2,5 раза, а с ростом концентрации водорода повышается риск возникновения КРН.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арабей А.Б.* Коррозионное растрескивание под напряжением труб магистральных газопроводов: атлас/А.Б. Арабей, З. Кношински. – М.: Наука, 2006. – 105 с.
2. *Song F.M.* Predicting the mechanisms and crack growth rates of pipelines undergoing SCC at high pH / F.M. Song // Corrosion Science. – 2009. – V. 51. – P. 2563–2657.
3. *Baker M.* Stress corrosion cracking study: final report for OPS TTO8. Integrity Management Program / M. Baker; Department of Transportation. – Calgary, Canada: Office of Pipeline Safety, 2005.
4. *Nazarova M.N., Akhmetov R.R., Krainov S.A.* Temperature factors effect on occurrence of stress corrosion cracking of main gas pipeline. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Сер. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Transportation of Mineral Resources" 2017. С. 062011.
5. *Ценев А.Н., Носов В.В.* Формирование устойчивого адгезионного слоя за счет химического взаимодействия изоляционного покрытия с металлом стенки магистрального газопровода для предотвращения коррозионных повреждений. В сборнике: НЕФТЕХИМИЯ - 2019 материалы II Международного научно-технического и инвестиционного форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. 2019. С. 133-136.
6. *Ilinykh M.V., Nazarova M.N., Akimova E.V., Palaev A.G.* Assessment of technical condition of

underwater transitions of main pipelines in real//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. DOI: 10.1088/1755-1315/194/7/072003. – 2018. - Volume 194, Issue 7, 15 November. – 072003. – ISSN: 17551307.
7. *Хафизов А.Р., Назарова М.Н., Ценев А.Н., Ценев Н.К.* О роли строительных и металлургических дефектов в разрушении магистральных трубопроводов//Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. -2017. -№ 3. - С. 24-31. – ISSN: 2221-2701.
8. *Ценев Н.К., Митрофанов О.А., Ценев А.Н., Кудояров Р.У.* Влияние дефектов на разрушение резервуаров и магистральных трубопроводов. Обеспечение промышленной безопасности при эксплуатации резервуаров и резервуарных парков. ФБГОУ ВПО "Уфимский государственный нефтяной технический университет". 2011. С. 143-152.
9. *Ценев А.Н., Назарова М.Н., Носов В.В., Шарнина Г.С.* Мониторинг технического состояния изоляционных покрытий МГП в зоне постоянного действия блуждающих токов. Деловой журнал Neftegaz.RU. 2018. № 12. С. 58-60.
10. *Ценев А.Н., Носов В.В., Назарова М.Н.* Поиск повреждений изоляционных покрытий магистральных газопроводов без вскрытия в зоне постоянного действия блуждающих токов. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S5-2. С. 430-438.
11. *Contreras A., Salazar M., Albiter A., Galván R., Vega O.* Assessment of Stress Corrosion Cracking on Pipeline Steels Weldments Used in the Petroleum Industry by Slow Strain Rate Tests, Arc Welding, Prof. Wladislav Sudnik (Ed.), 2011, 143-144 pp., ISBN: 978-953-307-642-3
12. NEB. 1996. Stress Corrosion Cracking on Canadian Oil and Gas Pipelines. Report of the Inquiry. National Energy Board. MH-2-95. December, 16 p.
13. *Чучкалов М.В.* Разработка методов выявления, торможения и предотвращения коррозионного растрескивания под напряжением на магистральных газопроводах: дис. д-ра техн. наук: 25.00.19. Уфа, 2015. 97-99 с.
14. *Zhang C.* Synergistic effects of hydrogen and stress on corrosion of X100 pipeline steel in a near-neutral pH solution /C. Zhang, Y.F. Cheng // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2010. V. 19. No 9. P. 1284–1289.
15. *Egbewande A.* Transgranular crack growth in the pipeline steels exposed to near-neutral pH soil aqueous solutions: discontinuous crack growth mechanism / A. Egbewande, W. Chen, R. Eadie // Corrosion Science. 2014. V. 83. P. 343–354.

УДК 621.9.025.728.78:621.914.22:621.9-05:621.9.08

НИКОЛАЕВ А.Д.
Университет ИТМО

ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТИ СТЕНОК КОРПУСА ЛАЗЕРНОЙ ГОЛОВКИ В CAE-СИСТЕМЕ

Аннотация. В работе рассматривается возможный способ расширения технологических возможностей станков с числовым программным управлением, за счет модернизации и интеграции в их состав волоконной лазерной системы. Важной задачей является облегчение деталей корпуса лазерной головки с сохранением их параметров жесткости.

Ключевые слова: лазерная обработка, лазерная головка, CAE-система, анализ жесткости, станки с ЧПУ, интеграция.

NIKOLAEV A.D.
ITMO University

ENGINEERING ANALYSIS OF THE RIGIDITY OF THE WALLS OF THE HOUSING OF THE LASER HEAD IN THE CAE-SYSTEM

Annotation. The paper considers a possible way to expand the technological capabilities of numerically controlled machines by upgrading and integrating a fiber laser system into their composition. An important task is to facilitate the details of the laser head housing while maintaining their stiffness parameters.

Keywords: laser processing, laser head, CAE-system, rigidity analysis, CNC machines, integration.

Основной целью работы является проведение инженерного анализа деталей корпуса лазерной головки в CAE-системе Patran Nastran после формирования их топологии.

Объединение лазерных технологий и технологий механической обработки позволит дополнить традиционные процессы фрезерования материалов технологиями маркировки, гравировки, микроструктурирования [1] и другими процессами лазерной обработки поверхностей материалов. Использование сконцентрированного потока энергии лазерного излучения в качестве рабочего инструмента позволит не только сократить расходы, связанные с износом механического контактного инструмента, но и перейти на принципиально новые диапазоны микрообработки различных изделий.

На одном и том же обрабатывающем центре наряду с традиционными способами обработки заготовок из различных материалов методом резания станет возможным применение таких видов лазерной обработки, как маркирование, создание градиентной структуры поверхности посредством лазерного излучения, создание различной сложноконтурной регулярной микротопологии поверхности, доводка поверхности, гравирование 3D-рельефов, обработка керамических поверхностей [2, 3], макро- и микроструктурирование поверхностного слоя, резка сплавов углепластика, локальное оксидирование поверхности (декорирование), локальное термоупрочнение, перфорация, сварка листовогоматериала [4], обеспечение хранения информации на поверхности заготовок за счет нанесения микроразмерных штрих- и QR-кодов, используемых в информационных технологиях, цифровом производстве [5, 6, 7, 8, 9, 10], металлизация и

так далее. Лазерная головка может быть использована для нанесения локального физического воздействия [11], что существенно облегчает съем материала с заготовки инструментом, оснащенным режущей керамикой [12, 13, 14].

Для реализации возможности использования лазерной системы на станке с ЧПУ необходимо частично или полностью модернизировать корпус лазерной головки и адаптировать его под ручную установку в шпиндель станка оператором или наладчиком [15, 16].

Корпус лазерной головки должен быть перепроектирован таким образом, чтобы его можно было легко отсоединить от коллиматора после завершения работы. Ранее из-за своей конструкции и габаритных размеров лазерную головку невозможно было использовать для установки в шпиндель станка вручную. Для обеспечения такой возможности, необходимо не только сделать корпус лазерной головки более компактным, но и более легким за счёт изменения топологии большинства деталей корпуса (рис. 1).

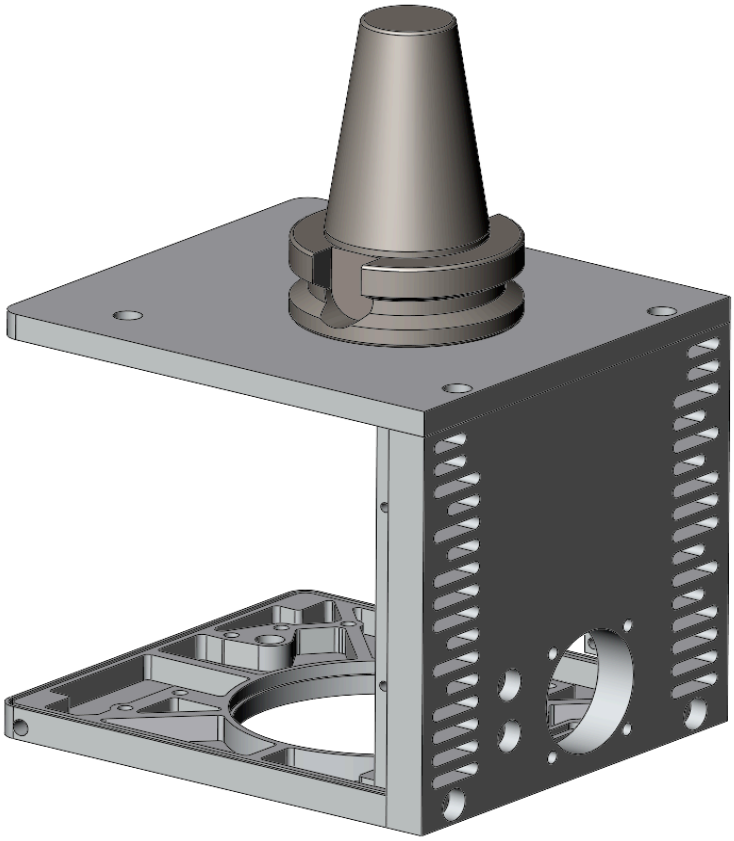


Рисунок 1 – Адаптированный корпус лазерной головки

Изменяя топологию деталей корпуса, большое внимание уделяется верхней стенке, так как к ней крепятся все элементы, включая инструментальный конус. Стенка должна удерживать всю массу конструкции в одной центральной точке, что в свою очередь подразумевает наличие большого количества ребер жесткости для уменьшения деформации стенки. Сформировав топологию верхней стенки, ее вес снизился на 59%. Исходный вес составлял 640 гр., а после оптимизации он стал равен 260 гр. Наличие ребер жесткости в верхней стенке позволило максимально сохранить, прочностные характеристики. Результатом изменения конструкции всех стенок лазерной головки стало снижение общего веса корпуса и уменьшение количества деталей.

Примером служит задняя стенка, изменив которую, удалось объединить несколько элементов в один. Таким образом, радиаторы из общей конструкции перешли на стенку и стали с ней единым элементом (рис. 2), а за счет дополнительного кармана удалось снизать вес элемента на 16%. Так же стоит отметить, что наличие ребер охлаждения

снижают общий вес элемента на 24%.

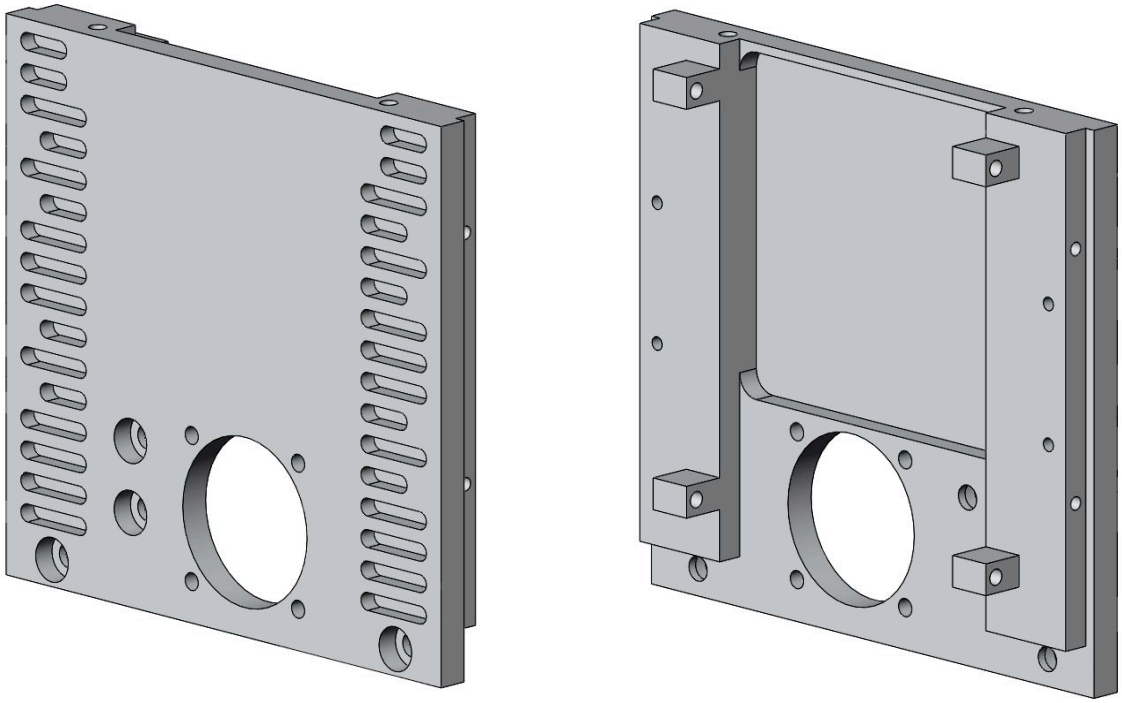
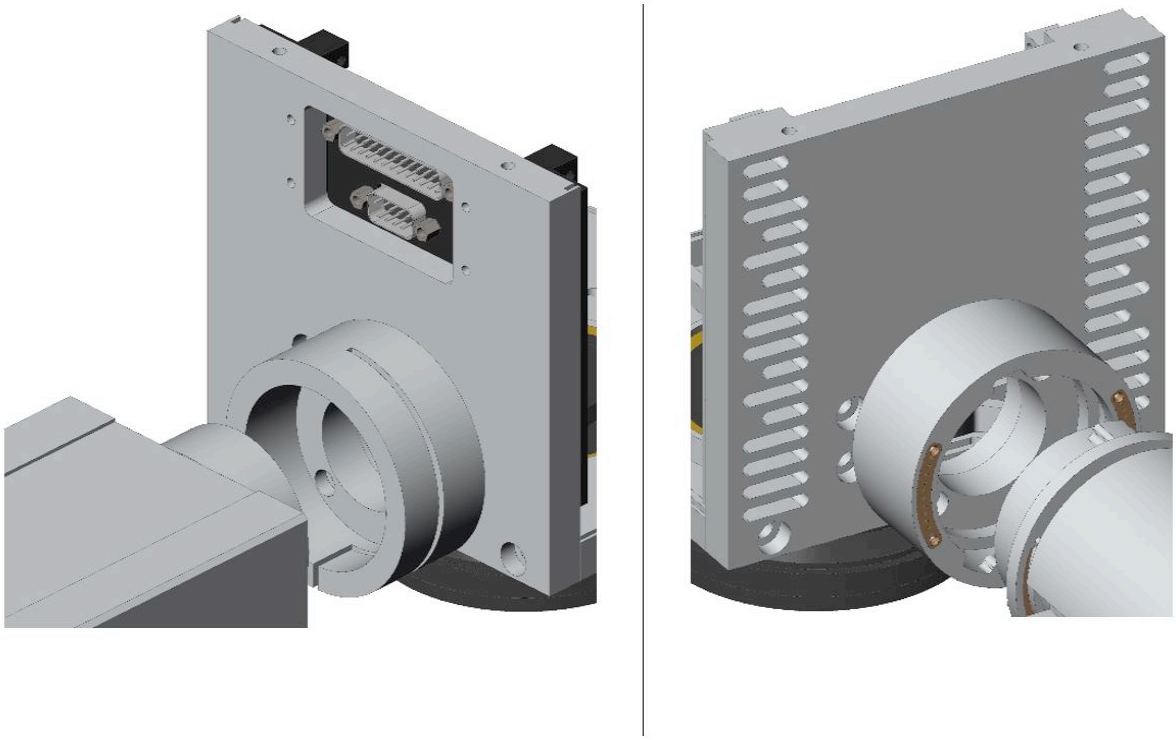


Рисунок 2 – Два вида задней стенки корпуса лазерной головки после изменения конструкции

Объединение нескольких элементов в один привело не только к снижению их общего количества, но и к более жесткой конструкции задней стенки. Анализ задней стенки показал, что ее прочностные характеристики не изменились как в сборке, так и отдельно. Задняя стенка в сборке держит на себе коллиматор и нижнюю стенку. Нижняя стенка корпуса лишилась значительного количества материала, общий объем которого составил 48,5%. Этот элемент конструкции требует большого внимания при оптимизации топологии, так как он является несущим для всей оптической схемы. Необходимо расположить ребра жесткости таким образом, чтобы они объединялись между собой и объединяли элементы оптической схемы, создавая единый каркас. Такой подход позволит избежать деформаций не только нижней стенки, но и всей лазерной головки. Оптимизация топологии коллиматора была достаточно сложной задачей, так как этот элемент корпуса изначально выполнял не только функцию фиксирования оптического волокна внутри корпуса лазерной головки, но и функцию фиксирования всей лазерной головки. Необходимо было полностью перепроектировать коллиматор таким образом, чтобы сохранить функцию фиксирования оптического волокна, и убрать функцию фиксирования на станине, так как новый корпус лазерной головки предназначен для ее установки в шпиндель станка с ЧПУ. Изменение конструкции коллиматора привело к снижению его веса на 46%. На рис. 3 представлен пример (а) исходного варианта крепления коллиматора к задней стенке в сравнении с (б) измененным вариантом.



а б

Рисунок 3 – Пример измененного крепления коллиматора:
а – Исходный вариант; б – Измененный вариант

В дальнейшем необходимо провести комплекс испытаний измененной конструкции корпуса лазерной головки в CAE-системе на климатические в вибрационные воздействия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zeng Jie Ma, Yigang Wang, Yukun Li* 2016 Processing of Three-Dimensional Models for the Crystal Laser Engraving *Nicograph International (NicoInt)*.
2. *Andreev A.O., Kosenko M.S., Petrovskiy V.N., Mironov V.D.* 2016 Prototyping of Dental Structures Using Laser Milling *Journal of Physics: Conference Series* 691(1) 012007.
3. *Przestacki D., Jankowiak M.* 2014 Surface roughness analysis after laser assisted machining of hard to cut materials *Journal of Physics: Conference Series* 483(1) 012019.
4. *Nasedkin Yu.V., Khmelnitsky A.K.*. 2018 Laser cutting of carbon fiber-reinforced plastic thin sheets *Journal of Physics: Conference Series* 1109(1) 012041.
5. *Larin M.V., Pevzner Y.B., Grinin O.I., Lasota I.T.* 2018 The use of single-mode fiber laser for welding of stainless steel thin thickness *Journal of Physics: Conference Series* 1109(1) 012036.
6. *Petkova A.P., Ganzulenko O.Yu.* 2014 Technological aspects of the marking of engineering products by a precision pulsed laser *Modern engineering Science and education: materials of the 4th International Scientific and Practical Conference. Ed. M.M. Radkevich and A.N. Evgrafova. - SPb.: Polytechnic Publishing House. University* 1177-1187.
7. *Vasilev O.S., Ruzankina J.S.* 2016 Laser forming micro geometric structures on the surface of roller rolling mill *Journal of Physics: Conference Series* 735(1) 012046.
8. *Vasilev O.S., Veiko V.P., Gorny S.G., Ruzankina J.S.* 2015 Laser device for microstructuring a metal surface using a fiber laser *Optical journal* 82(12) 70–77.
9. *Vasilev O.S., Gornyi S.G.* 2016 Technology for creating surface microstructures on sheet materials using a fiber laser *Metalworking, Politekhnika Publishing House* 3(93) 2016. 20–25.
10. *Olt J., Maksarov V.V., Efimov A.E.* 2018 Impacts of gradient structure on the dynamic characteristics of machining process system *29TH DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION* 1(1) 190-196.

11. *Mohd Noor Firdaus Bin Haron, Fadlur Rahman Bin Mohd Romlay.* 2019 Parametric study of laser engraving process of AISI 304 Stainless Steel by utilizing fiber laser system *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 469(1) 012124.
12. *Efimov A.E., Maksarov V.V., Timofeev D.Y.* 2018 Modeling dynamic processes at stage of formation of parts previously subjected to high-energy laser effects *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327(2) 22026.
13. *Maksarov V.V., Khalimonenko A.D*. 2018 Quality assurance during milling of precision elements of machines components with ceramic cutting tools *International Review of Mechanical Engineering* 12(5) 437-441.
14. *Maksarov V.V., Khalimonenko A.D*. 2017 Forecasting performance of ceramic cutting tool *Key Engineering Materials* 736 86-90.
15. *Nikolaev A.D., Phyo A.P., Pompeev K.P., Vasilyev O.S.* 2019 Laser processing systems in machines with numerical control *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 378(1) 012066
16. *Николаев А.Д.* Внедрение систем лазерной обработки в состав многооперационных обрабатывающих центров / А.Д. Николаев, К.П. Помпеев, П.А. Пьяе, О.С. Васильев, С.Г. Горный // Металлообработка, 2019. Т. 113(5). С. 26-33.

УДК 621:658.512:65.011.56

ПОМПЕЕВ К.П.
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники
ТИМОФЕЕВ Д.Ю.,
ХАЛИМОНЕНКО А.Д.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАЗМЕРНО-ТОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАЛОВ

Аннотация. В данной работе предложена методика проведения размерно-точностного анализа технологических процессов изготовления валов в центрах и рассматриваются особенности ее применения. Разработана методика составления схем биений при обработке валов, установленных в центрах токарных станков с учетом соблюдения принципа постоянства баз и наличия погрешности предварительной зацентровки исходных заготовок валов.

Ключевые слова: размерно-точностной анализ, изготовление валов в центрах, схема биений, принцип постоянства баз, погрешность центрирования заготовки.

POMPEEV K.P.
ITMO University,
Faculty of Control Systems and Robotics
TIMOFEEV D.Y.,
KHALIMONENKO A.D.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of mechanical engineering

METHOD OF CONDUCTING PRECISION DIMENSIONAL ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR MANUFACTURING SHAFTS

Abstract. In this paper, we propose a method for conducting a dimensional-precision analysis of technological processes for manufacturing shafts in centers and consider the features of its application . A method for drawing up runout diagrams for processing shafts installed in the centers of lathes is developed , taking into account the principle of constancy of bases and the presence of an error in pre-centering the initial shaft blanks.

Keywords: precision dimensional analysis, making shafts using bench centers, rotational errors diagram, basis constancy principle, the errors of centered blank.

Обеспечение качества изготовления деталей всегда было и будет актуальной проблемой, пока существует промышленное производство. Одними из основных показателей качества являются: точность размеров деталей; требования взаимного расположения, геометрическая точность и шероховатость поверхностей деталей [1, 2, 3, 4]. В условиях автоматизированного производства, при автоматизации технологической подготовки производства (ТПП) и при постоянном повышении требований к качеству проектных решений особенно актуальным становится решение задачи формализации и алгоритмизации процесса проектирования ТП механической обработки, что в свою очередь предполагает дальнейшее развитие теории и методологии

проектирования, предопределяющих дальнейшее развитие и совершенствование базы технических знаний [5].

Одним из важных этапов ТПП является проведение размерно-точностного анализа при проектировании маршрутных технологий [6], позволяющий оценить точность основных выходных параметров ТП, а также точность ТП в целом [7]. Проведение размерно-точностного анализа позволяет проектировать надежные технологии, гарантирующие при их реализации обеспечение заданной точности размеров и технических требований чертежа. От тщательности проведения размерно-точностного анализа значительно зависит снижение материальных и временных затрат на последующую отработку и внедрение спроектированных технологий в производство по результатам опытных и установочных партий [6, 8].

В основу размерно-точностного анализа (РТА) маршрутных ТП изготовления деталей типа тел вращения положена разработанная в СЗТУ методика, которая подробно изложена в [9] и [10]. При этом в [9] были уточнены некоторые формулировки, использованные в [10] для описания этой методики. Поэтому в своих дальнейших рассуждениях будем опираться на представленное в [9] описание методики РТА маршрутных ТП.

Целями проведения РТА являются: расчет (определение) всех операционных размеров и припусков на обработку; определение аналитическим путем возможности выполнения конструкторских размеров и технических требований взаимного расположения элементов с заданной точностью автоматически на выбранном технологическом оборудовании при установке заготовки либо с применением выверки либо без выверки.

Для деталей типа «тело вращения», к которым относятся валы, согласно методике, представленной в [9], проведение РТА ТП неразрывно связано с синтезом соответствующих схем линейных размеров и схем биений.

Схемы линейных размеров разрабатываются с целью определения аналитическим методом возможности обеспечения точности конструкторских размеров, расчета линейных операционных размеров и припусков на обработку. Целями разработки схем биений, возникающих при реализации ТП, являются: проверка возможности выполнения технических требований взаимного расположения (ТВР) элементов вращения; определение неравномерности припусков, которые в дальнейшем используются для расчета диаметральных операционных размеров и припусков на обработку.

Если проведение РТА ТП изготовления валов в центрах для линейных размеров ничем не отличается от описанной в [9] общей методики РТА, то для элементов вращения она имеет некоторые особенности, которые не освещены в указанной литературе. Проиллюстрируем это на примере ТП изготовления в центрах детали «Валик», чертеж и операционные комплексы (ОК) которого представлены на рис. 1. В предлагаемом ТП изготовления детали «Валик» на операции 010 проводится подготовка баз (центровых отверстий) для последующей обработки заготовки в центрах на операциях 015, 020, 025 и 030. При этом на обеспечение ТВР поверхностей (элементов) вращения, указанных на чертеже детали, оказывают влияние операции 010, 015, 020, 025 и 030, а операция 035 на это не влияет.

Сначала разработаем схему биений (рис. 2, а) в полном соответствии с представленной в [9] методикой, согласно которой все обрабатываемые элементы имеют свой уникальный номер. Его первая цифра (первые две цифры) соответствует номеру элемента в структуре Т-системы «Деталь» (ТСД), а последняя цифра обозначает его состояние в Т-системе «Заготовка» (ТСЗ). В этой методике принято, что если последняя цифра номера элемента «ноль», то это соответствует его окончательному состоянию. Поэтому левое и правое центровые отверстия обозначены на схеме биений номерами 50 и 60 соответственно. Анализируя представленную схему биений, видим, что при смене стороны обработки происходит смена баз. Это также подтверждается уравнениями биений

обрабатываемых элементов вращения 12 и 42, возникающих на операциях 015 и 020 соответственно. Согласно представленной в [9] методике биение каждого обрабатываемого элемента вращения определяется способом геометрического суммирования допусков составляющих биений, так как искомое и составляющие биения являются векторами, а их номинальные значения равны нулю.

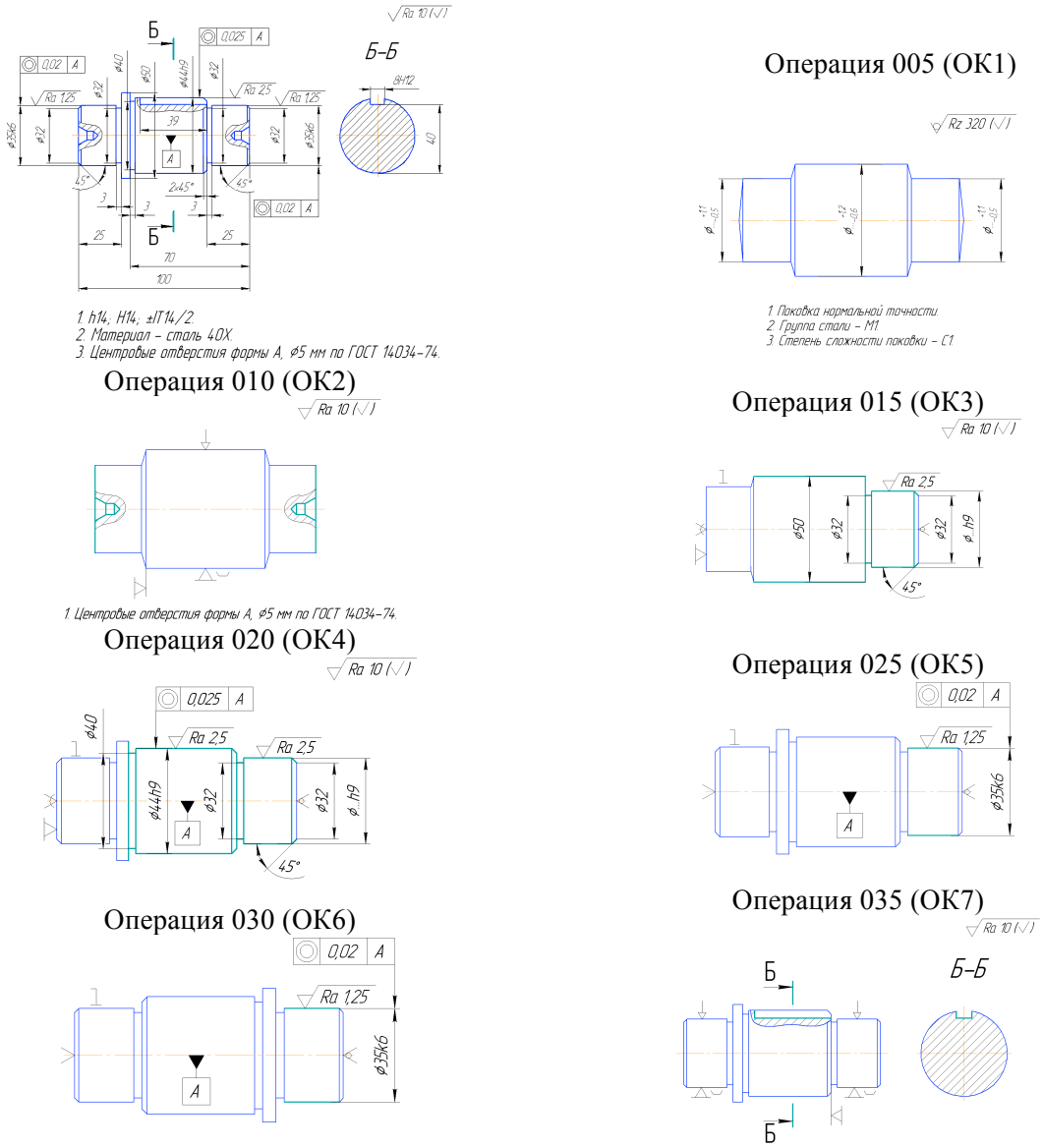


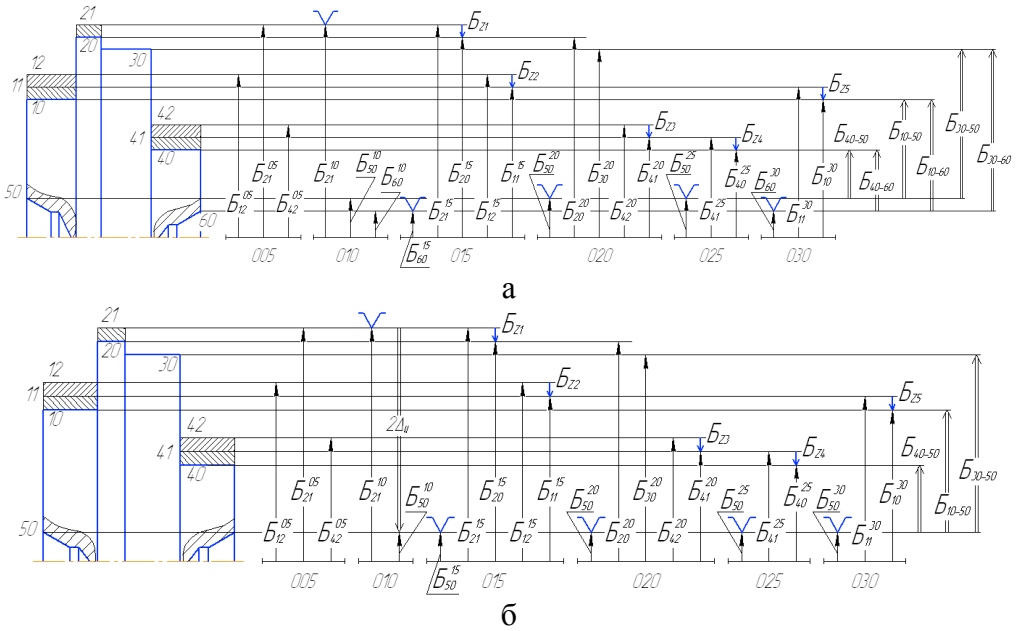
Рисунок 1 – Чертеж детали «Валик» и операционные комплексы его изготовления с использованием центров

Итак, уравнения биений обрабатываемых элементов вращения 12 и 42 соответственно на операциях 015 и 020 выглядят следующим образом:

$$Б_{12}^{15} = \sqrt{\left(Б_{60}^{15}\right)^2 + \left(Б_{60}^{10}\right)^2 + \left(Б_{21}^{10}\right)^2 + \left(Б_{21}^{05}\right)^2 + \left(Б_{12}^{05}\right)^2}, \quad (1)$$

$$Б_{42}^{20} = \sqrt{\left(Б_{50}^{20}\right)^2 + \left(Б_{50}^{10}\right)^2 + \left(Б_{21}^{10}\right)^2 + \left(Б_{21}^{05}\right)^2 + \left(Б_{42}^{05}\right)^2}. \quad (2)$$

В уравнении (1) в качестве одного из составляющих звеньев цепи биений используется биение базовой поверхности 60 (рис. 2, а), возникающее при установке заготовки на операции 015, а в уравнении (2) в качестве одного из составляющих звеньев цепи биений используется биение базовой поверхности 50, возникающее при установке заготовки на операции 020, то есть биение другой базовой поверхности, находящейся в структуре ТСЗ с другой стороны заготовки.



а

б

Рисунок 2 – Варианты схем биений:
а – исходный; б – окончательный

В действительности смена стороны обработки для элементов вращения не приводит к смене баз, так как базой обрабатываемой заготовки является ось центров, а центровые фаски при их одновременной подготовке на фрезерно-центровальном станке, по сути, имеют общую ось, то есть в случае изготовления валов в центрах соблюдается принцип постоянства баз [3].

Таким образом, возникает противоречие: формально имеется смена баз, а фактически ее нет. Устранить это противоречие можно, рассматривая центровые фаски (отверстия) как единый элемент (например, элемент номер 50) (рис. 2, б). При этом в два раза уменьшается количество векторов технических ТВР элементов вращения, по расчетным величинам которых проверяется возможность выполнения соответствующих технических требований чертежа.

Далее, анализируя структуру биений, возникающих на операции 010 (рис. 2, а), и перечень формул, приведенных [11] в разделе «Правила расчета припусков на обработку», а также используя известное из [12] соотношение биения поверхности вращения и смещения ее оси ($Б = 2e$), напрашивается вывод, что биения центровых отверстий (элементов 50 и 60) после их сверления могут быть определены единственным образом, а именно:

$$Б_i^j = 2\Delta_\Sigma . \qquad (4)$$

При этом суммарные отклонения Δ_Σ после сверления отверстия, согласно [11], определяются по следующей формуле:

$$\Delta_\Sigma = \sqrt{(\Delta_y l)^2 + C_O^2} . \qquad (5)$$

где: Δ_Y – значение увода оси сверла, мкм на 1 мм; l – длина просверливаемого отверстия, мм; C_O – смещение оси отверстия, мкм.

Увод оси сверла и смещение оси отверстия при обработке спиральными и специальными сверлами определяются по справочным данным, представленным в [11]. Однако если сравнить между собой центровочное сверло и спиральное сверло с цилиндрическим хвостовиком, имеющих одинаковый диаметр рабочей части, с точки зрения их конструкции, то становится очевидным, что центровочное сверло обладает большей жесткостью, так как длина его рабочей части значительно меньше, а диаметр хвостовика в несколько раз больше. Поэтому использование формул (4) и (5), а также

справочных данных, для этого случая некорректно. Исходя из этого, следует, что в рассматриваемом случае мы имеем тупиковую ситуацию. Однако это не так. Этот кажущийся тупик, во-первых косвенно подтверждает необходимость рассматривать центровые фаски как единый элемент, а во-вторых естественным образом приводит к мысли о необходимости учитывать погрешность зацентровки заготовки.

С учетом этого и был разработан окончательный вариант схемы биений, представленный на рис. 2, б. Поэтому на схеме биений появился вектор биения центровых фасок (единого элемента под номером 50) относительно базовой поверхности (элемент под номером 21), который обозначен как $2\Delta_{Ц}$. То есть в подобных случаях с учетом вышеупомянутого соотношения $Б = 2e$ этот вектор биения рассматривается как удвоенное смещение оси фасок в результате погрешности центрирования заготовки. Используя схему биений его можно определить следующим образом:

$$2\Delta_{Ц} = \sqrt{\left(Б_{50}^{10}\right)^2 + \left(Б_{21}^{10}\right)^2}\,. \tag{6}$$

Отсюда:

$$\left(2\Delta_{Ц}\right)^2 = \left(Б_{50}^{10}\right)^2 + \left(Б_{21}^{10}\right)^2. \tag{7}$$

При этом уравнения биений обрабатываемых элементов вращения 12 и 42 соответственно на операциях 015 и 020 будут выглядеть следующим образом:

$$Б_{12}^{15} = \sqrt{\left(Б_{50}^{15}\right)^2 + \left(Б_{50}^{10}\right)^2 + \left(Б_{21}^{10}\right)^2 + \left(Б_{21}^{05}\right)^2 + \left(Б_{12}^{05}\right)^2} = \sqrt{\left(Б_{50}^{15}\right)^2 + \left(2\Delta_{Ц}\right)^2 + \left(Б_{21}^{05}\right)^2 + \left(Б_{12}^{05}\right)^2}\,,$$

$$Б_{42}^{20} = \sqrt{\left(Б_{50}^{20}\right)^2 + \left(Б_{50}^{10}\right)^2 + \left(Б_{21}^{10}\right)^2 + \left(Б_{21}^{05}\right)^2 + \left(Б_{42}^{05}\right)^2} = \sqrt{\left(Б_{50}^{20}\right)^2 + \left(2\Delta_{Ц}\right)^2 + \left(Б_{21}^{05}\right)^2 + \left(Б_{42}^{05}\right)^2}\,.$$

Аналогично:

$$Б_{21}^{15} = \sqrt{\left(Б_{50}^{15}\right)^2 + \left(Б_{50}^{10}\right)^2 + \left(Б_{21}^{10}\right)^2} = \sqrt{\left(Б_{50}^{15}\right)^2 + \left(2\Delta_{Ц}\right)^2}\,.$$

Согласно [8] погрешность зацентровки $\Delta_{Ц}$ – смещение оси заготовки в результате погрешности центрирования относительно базы заготовки, использованной при центрировании, определяется по следующей формуле:

$$\Delta_{Ц} = 0{,}25\sqrt{T^2 + 1}\,, \tag{8}$$

где T – допуск на диаметральный размер базы заготовки, использованной при центрировании, мм.

Таким образом, при наличии связующего вектора биения $\Delta_{Ц}$ между векторами биений базовой поверхности и центровых отверстий на фрезерно-центровочной операции и возможности определения его величины по формуле (8) отпадает необходимость определения величин последних. То есть в рассматриваемом случае при определении состава цепей биений, замыкающими звеньями которых являются биения обрабатываемых поверхностей номеров 12 и 42 на операциях 015 и 020 соответственно, переход с операции 015 или 020 на операцию 005 через операцию 010 осуществляется непосредственно через связующий вектор биения $\Delta_{Ц}$.

Биения базовых поверхностей при установке заготовки в центрах определяют по формуле:

$$Б_i^j = 2\left(a_3\sqrt{D} + bL\right), \tag{9}$$

где: D – диаметр центровой фаски; L – общая длина заготовки; a_3 и b – коэффициенты, зависящие от точности установки: $a_3 = 0{,}006$ и $b = 0{,}00005$ – нормальная точность установки, $a_3 = 0{,}0018$ и $b = 0{,}000015$ – повышенная точность установки, $a_3 = 0{,}0009$ и $b = 0{,}000007$ – высокая точность установки.

Для рассматриваемого ТП изготовления детали «Валик» по формуле (9) определяются биения центровых фасок (единого элемента под номером 50) на операциях 015, 020, 025 и 030 (рис. 2, б).

В остальном расчет величин биений элементов исходной заготовки, биений обрабатываемых и обработанных элементов относительно базы обработки и между собой, расчет неравномерности припусков и проверка возможности выполнения технических ТВР элементов вращения при выбранных системах базирования и на выбранных приспособлениях, а также расчет промежуточных диаметральных размеров осуществляются в полном соответствии с методикой РТА маршрутных ТП, описанной в [9].

Указанные выше особенности составления схем биений и их расчета являются основой формализации процесса размерно-точностного анализа ТП изготовления валов в центрах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pompeev K.P, Timofeev D.Yu.* 2018 Precision dimensional analysis in CAD design of reliable technologies *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 194(2) 022028.
2. *Khalimonenko A.D., Pompeev K.P., Timofeev D.Y.* 2017 Method of Calculating Intermediate Diametral Sizes and Allowances for Designing Technology of Manufacture of Details *AER-Advances in Engineering Research* 133(1) 312–317.
3. *Маталин А.А.* Технология машиностроения: учебник для вузов. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 512 с.
4. *Халимоненко А.Д.* Точность обработки при точении заготовок режущим инструментом, оснащенным сменными керамическими пластинами / А.Д. Халимоненко, Р.В. Вьюшин // Записки горного института, 2014. Т. 209. С. 99-103.
5. *Клевцов В.А.* О роли методологии в развитии технических знаний и обучении // В.А. Клевцов, В.В. Максаров. Материалы 3-ей Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – СПб.: Изд-во Политехнического Университета, 2013. – С. 109-117.
6. *Помпеев К.П.* Размерно-точностной анализ при автоматизированном проектировании надежных технологий // Материалы 3-ей Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – СПб.: Изд-во Политехнического Университета, 2013. – С. 600-609.
7. САПР изделий и технологических процессов в машиностроении / Р.А. Аллик [и др.]; под общ. ред. Р.А. Аллика. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1986. – 319 с.
8. *Помпеев К.П.* Интерактивный синтез и расчет биений / К.П. Помпеев, Э.Е. Лазарев, Д.С. Пинаев // Труды десятой сессии Международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», посвященной памяти В.П. Булатова, VPB-11, 24-28 октября 2011 г. – СПб.: ИПМаш РАН, 2011. – С. 334-340.
9. *Валетов В.А.* Технология приборостроения. Учеб. пособие / В.А. Валетов, К.П. Помпеев. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 234 с.
10. Основы технологии машиностроения: Учеб. пособие / А.Е. Вороненко [и др.]. – СПб.: СЗТУ, 2010. – 210 с.
11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 912 с.
12. *Иващенко И.А.* Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.

УДК 62-213:681.7-1/-9:681.7.07:621.793.79:004.356.2

ПЬЯЕ П.А.
Университет ИТМО
ВАСИЛЬЕВ О.С.
ООО «Лазерный центр»

АНАЛИЗ И МОДИФИКАЦИЯ ТОПОЛОГИИ КОРПУСА ЛАЗЕРНОЙ ГОЛОВКИ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АДДИТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. Рассматривается вопрос совершенствования конструкции корпуса лазерной головки с целью обеспечения ее компактности и учетом возможностей аддитивного оборудования, позволяющего изготовить более сложные по конструкции детали корпуса из пластика, не нарушив при этом собираемости и ремонтопригодности корпуса лазерной головки.

Ключевые слова: модификация, конструкция, топология, корпус, лазерная головка, пластиковые детали, аддитивное оборудование, собираемость, ремонтопригодность.

PYAE P.A.
ITMO University
VASILEV O.S.
LLC Laser Center

ANALYSIS AND MODIFICATION OF THE CORPS TOPOLOGY OF THE LASER HEAD TAKING INTO ACCOUNT THE CAPABILITIES OF ADDITIVE EQUIPMENT

Abstract. The article considers the issue of improving the design of the laser head housing in order to ensure its compactness and take into account the capabilities of additive equipment that allows to make more complex plastic housing parts without violating the collectability and maintainability of the laser head housing.

Keywords: modification, design, topology, body, laser head, plastic parts, additive equipment, collectability, maintainability.

При сложившихся в последние десятилетия темпах развития производства, в условиях расширения номенклатуры изготавливаемых изделий и обеспечения их конкурентоспособности у промышленных предприятий появляется необходимость замены устаревшего оборудования на современные высокопроизводительные станки с ЧПУ, что позволяется повысить темпы производства и качество выпускаемой продукции. Однако, простое переоснащение производственных цепочек в механических цехах, в ряде случаев, является недостаточным. Появляется необходимость дополнения производственного процесса инновационным и комплексным оборудованием и соответствующей технологией обработки материалов. Известно, что одним из инструментов обработки поверхности металла является лазерное излучение. Соответственно развитие и внедрение различного рода интегральных систем в состав вертикальных обрабатывающих центров (ОЦ) позволит не только расширить технологические и функциональные возможности этого оборудования и сократить время изготовления продукции, но и улучшить технологические, точностные и функциональные характеристики производимого изделия [1].

При этом расширить технологические и функциональные возможности станков с ЧПУ можно как за счет совершенствования их систем управления [2], так и посредством

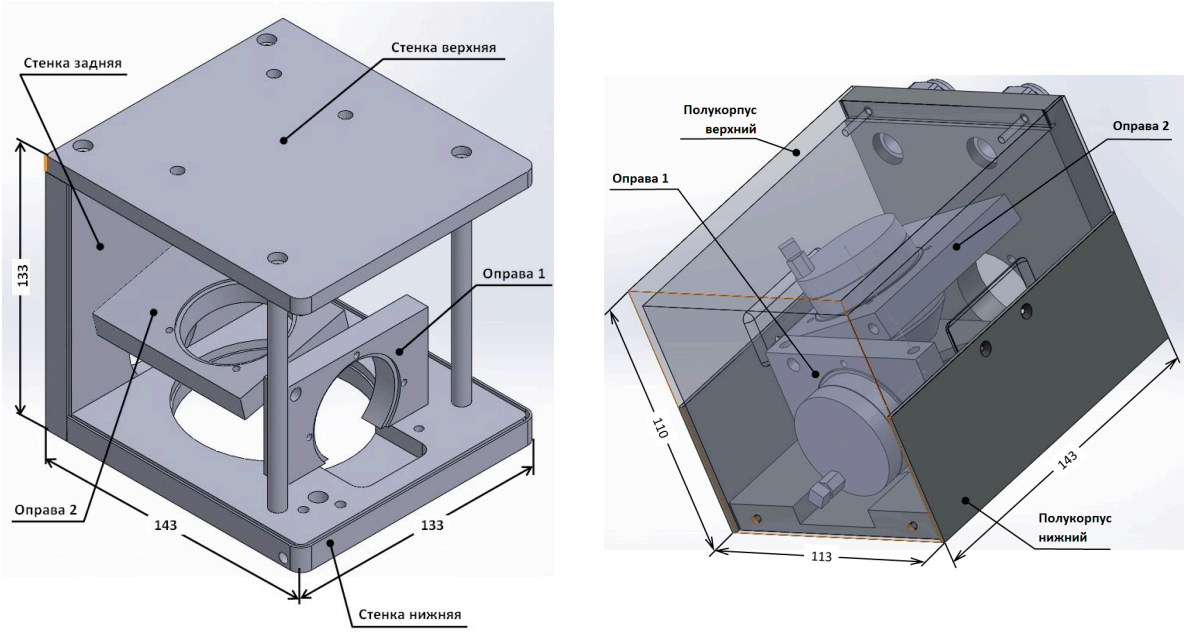
ввода в состав станков с ЧПУ новых технологических лазерных блоков, узлов и целых систем [3, 4]. По сути на одном и том же обрабатывающем центре наряду с традиционными способами обработки заготовок из различных материалов методом резания станут доступными такие виды лазерной обработки, как маркирование [5], доводка поверхности [6], создание градиентной структуры поверхности посредством лазерного излучения [7], создание различной сложноконтурной регулярной микротопологии поверхности, гравирование 3D-рельефов [8, 9], обработка керамики [10, 11], макро- и микроструктурирование поверхностного слоя [12, 13], резка углепластика [14], локальное оксидирование поверхности (декорирование), перфорация, локальное термоупрочнение, сварка листовой стали [15], металлизация, обеспечение хранения информации на поверхности заготовок за счет нанесения микроразмерных штрих- и QR-кодов [5], используемых в информационных технологиях, цифровом производстве и так далее. Лазерная головка может быть использована для нанесения локального физического воздействия [16], что существенно облегчает съем металла с заготовки инструментом, оснащенным режущей керамикой [17-19]. В дальнейшем возможен вариант применения лазерной системы для микроструктурирования сложных поверхностей, исключив процесс предварительной подготовки инструмента для чистовых переходов [20].

Современные промышленные лазерные установки также представляют собой оборудование с ЧПУ. В состав таких установок входят лазерные головки (ЛГ), например, на основе волоконных лазеров. В корпусах этих ЛГ размещаются оптическая система и система управления лазерным лучом. При этом, как уже было сказано ранее, имеется возможность внедрения ЛГ в металлообрабатывающие сверлильно-фрезерно-расточные станки с ЧПУ для выполнения соответствующих технологических операций. Корпусные детали таких ЛГ изготавливаются из алюминиевых сплавов. Одной из важных задач при разработке конструкции корпусов ЛГ является задача снижения их металлоемкости. Применительно к корпусам ЛГ этого можно добиться путем замены алюминиевых сплавов на пластик, имеющий похожие механические характеристики. Это позволяет кроме снижения их материалоемкость применить в качестве способа их получения печать на аддитивной установке. В этом случае, с одной стороны встает вопрос возможности изготовления меньшего количества более сложных по конструкции деталей, чтобы было меньшее количество их сопряжений между собой при сборке корпуса ЛГ, а с другой – было бы целесообразно одновременно с этим обеспечить компактность ЛГ.

Поэтому целью работы является совершенствование конструкции корпуса ЛГ для обеспечения ее компактности с учетом возможности изготовления деталей ее корпуса на аддитивной установке.

В настоящее время конструкция корпуса лазерной головки (ЛГ) представляет собой сборочную единицу, в состав которой входит значительные число простых деталей и несколько узлов. Анализ имеющейся конструкции корпуса ЛГ (см. рисунок 1, *а*) показал, что кроме замены материала Д16 на пластик можно часть узлов вывести за его пределы, что позволит сократить размеры корпуса ЛГ. Это так же дополнительно снизит его материалоёмкость и одновременно с этим сделает ЛГ более компактной. Изменения в конструкции деталей корпуса ЛГ коснулись следующих: стенка нижняя, стенка задняя, стенка верхняя и кожух.

В результате были получены более сложные по конструкции детали (рис. 1, *б*): полукорпус верхний и полукорпус нижний. Полукорпус верхний представляет собой комбинацию стенки верхней и части кожуха. Полукорпус нижний является комбинацией стенки задней, стенки нижней и боковых частей кожуха. Из конструкции ЛГ убрана управляющая плата. Это позволило уменьшить габаритные размеры корпуса ЛГ по его высоте и ширине.



а б

Рисунок 1 – Сравнение конструкции корпуса ЛГ по топологии
а – с исходной топологией; *б* – с модифицированной топологией

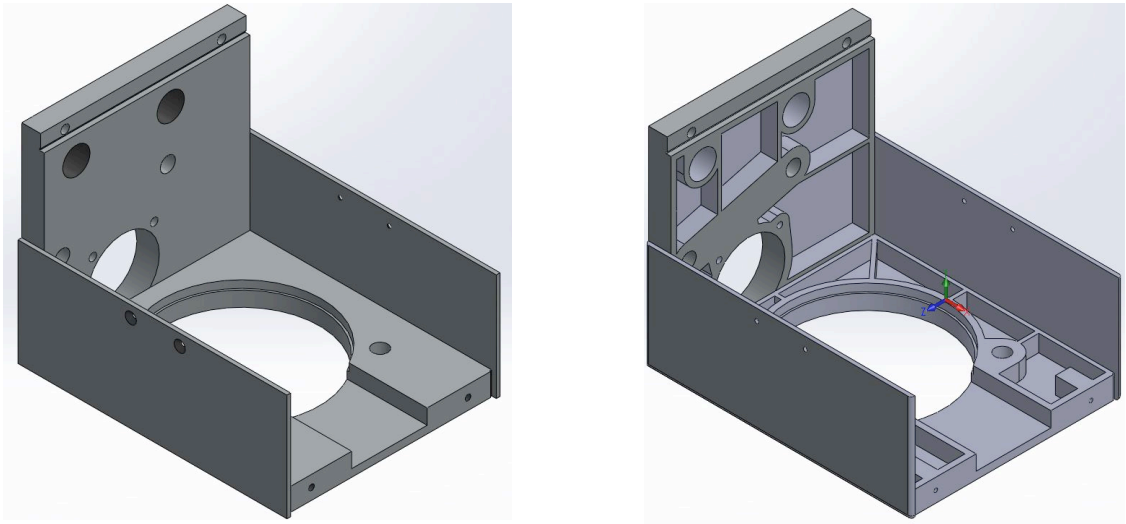
Так же были проведены незначительные изменения в конструкции опор сканаторов для обеспечения их креплений специальными шпильками вместо винтов, и в новой конструкции корпуса предусмотрен специальный вывод кабелей сканаторов для их внешнего подключения к управляющей плате, вынесенной за пределы корпуса ЛГ.

Использование пластика позволит существенно снизить расход материала и материалоемкость (так как пластик легче дюралюминия более чем в 2,5 раза), а 3D-печать позволит обойтись без традиционных режущих инструментов. При этом дополнительно снизить материалоемкость пластикового корпуса можно за счет введения в его конструкцию специальных выборок и ребер жесткости. В тоже время снижение материалоемкости и изменение конструкции корпуса не должны привести к потере его прочности и жесткости, что в свою очередь не должно привести к недопустимому отклонению лазерного луча от вертикали, то есть отразиться на функционировании ЛГ. Следовательно необходимо провести моделирование конструкции корпуса в CAE-системе.

Для проведения сравнительного анализа прочности и жесткости корпуса ЛГ в CAD-системе SolidWorks были разработаны варианты кострукции его деталей с выборками и ребрами жесткости и без них. На рис. 2, в качестве примера, представлены соответствующие варианты детали полукорпус нижний.

Сравнительный анализ прочности и жесткости вариантов конструкции корпуса ЛГ проводился в CAE-системе MSC Patran. При этом также было учтено изменение закрепления ЛГ при ее установке в шпинделе станка., то есть для каждого варианта конструкции корпуса ЛГ проверялась его прочность под действием силы тяжести, возникающей из-за собственного веса, так как ЛГ будет закрепляется в шпинделе вертикального ОЦ в «подвешенном» состоянии.

Предварительные расчеты для сравниваемых вариантов показали, что деформации корпуса ЛГ, получающиеся под действием силы тяжести несущественные, порядка нескольких нанометров. При этом возникающие напряжения по Мизесу также имеют малую величину.



а б

Рисунок 2 – Варианты конструкции полукорпуса нижнего
а – без выборок и ребер жесткости; *б* – с выборками и ребрами жесткости

Таким образом, выполненные изменения конструкции корпуса ЛГ, позволили сделать её более компактной и лёгкой. При этом не были нарушены её собираемость и ремонтопригодность.

Результаты моделирования процесса деформации вариантов корпуса ЛГ в CAE-системе MSC Patran убедительно показали, что имеется возможность замены материала деталей корпуса ЛГ с дюралюминия Д16 на пластик. Кроме того использование выборок и ребер жесткости в конструкции деталей корпуса ЛГ является очень эффективным. Тем самым можно существенно снизить (приблизительно в 2,7...5 раз) материалоемкость ЛГ.

В настоящее время ведутся работы по изготовлению деталей корпуса ЛГ на аддитивной установке, с последующей сборкой ЛГ и испытанием ее работы в составе лазерного маркировщика с ЧПУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Николаев А.Д.* Модернизация обрабатывающих центров посредством интерграции в их состав лазерных систем / А.Д. Николаев, П.А. Пьяе, К.П. Помпеев, О.С. Васильев // Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 7-й международной научно-практической конференции. Под ред. А.Н.Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 506-515.
2. *Картавцев И.С.* Расширение функциональных возможностей у ЧПУ токарного станка по расчету параметров процесса текущего контроля и подналадки оборудования / Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й Международной научно-практической конференции. Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С.905-914.
3. *Nikolaev A.D., Phyo A.P., Pompeev K.P., Vasilyev O.S.* 2019 Laser processing systems in machines with numerical control *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 378(1) 012066.
4. *Николаев А.Д.* Внедрение систем лазерной обработки в состав многооперационных обрабатывающих центров / А.Д. Николаев, К.П. Помпеев, П.А. Пьяе, О.С. Васильев, С.Г. Горный // Металлообработка. 2019. Т. 113, №5. С. 26-33.
5. *Петкова А.П.* Технологические аспекты маркировки изделий машиностроения прецизионным импульсным лазером / А.П. Петкова, О.Ю. Ганзуленко // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции. Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во

Политехн. ун-та, 2014. С.1177-1187.
6. *Vasilev O.S., Ruzankina J.S.*. 2016 Laser forming micro geometric structures on the surface of roller rolling mill *Journal of Physics: Conference Series* 735(1) 012046.
7. *Olt J., Maksarov V.V., Efimov A.E.* 2018 Impacts of gradient structure on the dynamic characteristics of machining process system *29TH DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION* 1(1) 190-196.
8. *Andreev A.O., Kosenko M.S., Petrovskiy V.N., Mironov V.D.* 2016 Prototyping of Dental Structures Using Laser Milling *Journal of Physics: Conference Series* 691(1) 012007.
9. *Mohd Noor Firdaus Bin Haron, Fadlur Rahman Bin Mohd Romlay.* 2019 Parametric study of laser engraving process of AISI 304 Stainless Steel by utilizing fiber laser system *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 469(1) 012124.
10. *Przestacki D., Jankowiak M.* 2014 Surface roughness analysis after laser assisted machining of hard to cut materials *Journal of Physics: Conference Series* 483(1) 012019.
11. *Zeng Jie Ma, Yigang Wang, Yukun Li.* 2016 Processing of Three-Dimensional Models for the Crystal Laser Engraving *Nicograph International (NicoInt)*.
12. *Васильев О.С.* Лазерная установка для микроструктурирования поверхности металла с использованием волоконного лазера / О.С. Васильев, В.П. Вейко, С.Г. Горный, Ю.С. Рузанкина // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 12. С. 70-77.
13. *Васильев О.С.* Технология создания поверхностных микроструктур на листовых материалах с использованием волоконного лазера / О.С. Васильев, С.Г. Горный // Металлообработка, Издательство «Политехника». 2016. № 3 (93), С. 20-25.
14. *Nasedkin Yu.V., Khmelnitsky A.K.* 2018 Laser cutting of carbon fiber-reinforced plastic thin sheets *Journal of Physics: Conference Series* 1109(1) 012041.
15. *Larin M.V., Pevzner Y.B., Grinin O.I., Lasota I.T.* 2018 The use of single-mode fiber laser for welding of stainless steel thin thickness *Journal of Physics: Conference Series* 1109(1) 012036.
16. *Efimov A.E., Maksarov V.V., Timofeev D.Y.* 2018 Modeling dynamic processes at stage of formation of parts previously subjected to high-energy laser effects *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327(2) 22026.
17. *Maksarov V.V., Khalimonenko A.D*. 2018 Quality assurance during milling of precision elements of machines components with ceramic cutting tools *International Review of Mechanical Engineering* 12(5) 437-441.
18. *Maksarov V.V., Khalimonenko A.D*. 2017 Forecasting performance of ceramic cutting tool *Key Engineering Materials* 736 86-90.
19. *Maksarov V.V., Timofeev D.Y., Khalimonenko A.D.* 2014 Machining quality when lathing blanks with ceramic cutting tools *Agronomy Research* 12 269-278.
20. *Maksarov V.*, *Keksin A.* 2018 Forming conditions of complex-geometry profiles in corrosion-resistant materials *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 194 062016.

УДК 622.236.22

САФРАЙДЕР А. И.,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
НАЗАРОВА М. Н.,
Национальная Ассоциация СПГ
ХАФИЗОВ А. Р.
Уфимский государственный нефтяной технический университет

МОДИФИКАЦИЯ ЛЕГКОСПЛАВНЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ ДЛЯ БУРЕНИЯ В ОСЛОЖНЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Бурение в осложненных геологических условиях подразумевает собой бурение в условиях аномально высокого давления пластов, большого содержания H_2S и CO_2, высоких температур, шоков и вибраций. Проекты для проведения таких работ составляются индивидуально, с учетом подбора специального бурового инструмента для компоновки бурильной колонны, одним из основных составляющих элементов которой являются бурильные трубы ЛБТ. В данной работе представлены бурильные трубы, модифицированные, изготовленные из высокопрочных легкосплавных материалов, обеспечивающих способность безотказно эксплуатироваться в сложных геологических условиях, имеющих высокую коррозионную стойкость к агрессивным буровым растворам.

Ключевые слова: бурение, бурильная колонна, бурильные трубы, осложненные геологические условия, заготовка, агрессивная среда, буровой раствор, коррозия, коррозионная стойкость, отказ, дефект, безопасная эксплуатация.

LIGHT-ALLOY DRILL PIPES MODIFICATION FOR DRILLING IN COMPLICATED GEOLOGICAL CONDITIONS

SAFRAIDER A. I.,
Ufa State Petroleum Technological University
NAZAROVA M. N.,
National Association LNG
KHAFIZOV A. R.
Ufa State Petroleum Technological University

Abstract. Drilling in complicated geological conditions involves drilling under conditions of abnormally high reservoir pressure, high content of H_2S and CO_2, high temperatures, shocks and vibrations. Projects for such works are made individually, taking into account the selection of a special drilling tool for the layout of the drill string, one of the main components of which are the LBT drill pipes. This paper presents modified drill pipes made of high-strength light-alloy materials that provide the ability to operate reliably in difficult geological

conditions with high corrosion resistance to aggressive drilling fluids.

Keywords: drilling, drill string, drill pipes, complicated geological conditions, billet, aggressive environment, drilling mud, corrosion, corrosion resistance, failure, defect, safe operation.

Осложненные геологические условия бурения часто обусловлены близкими предельными нагрузками, такими как высокие температуры, вибрации и суровая окружающая среда, где требуется высокопрочный буровой инструмент. Модификация легкосплавных бурильных труб (ЛБТ), как одного из составляющих бурильной колонны, будет способствовать не только продлению срока службы, но обеспечить безопасность работ при бурении [1-4, 6-8]. Применение высокопрочного сверхмелкозернистого алюминиевого сплава Д16Т, в качестве материала для бурильных труб, позволит использовать ЛБТ в условиях сверхнагрузок, снизить риск пластических деформаций и разрушений как по телу трубы, так и в части высаженных замках труб, а также увеличит их коррозионостойкость [12-15]. Резьбозамковые ЛБТ обычно ломаются по первому полному витку трубной резьбы, находящемуся в сопряжении с бурильным замком, в перпендикулярном направлении к оси трубы. Разрушению данного элемента трубы способствуют максимальные нагрузки в сочетании с концентрацией напряжений во впадинах резьбы и в переходной части [3, 5]. Упрочненная субмикрокристаллическая структура алюминиевого сплава, из которого изготавливаются ЛБТ, может быть получена на основе методов интенсивной пластической деформации (ИПД), равноканального углового прессования (РКУП) с образцами малого диаметра для экспериментальных и лабораторных испытаний и в промышленных масштабах методом локального сдвигового прессования (ЛСП) [8]. Оба метода представляют собой деформации сдвига, отличающиеся друг от друга тем, что равноканальное прессование требует повторного прессования, а ЛСП позволяет формировать деформации во всей формуемой детали (длина трубы 9-12 метров) (Рисунок 1 а, б) [5, 9-11].

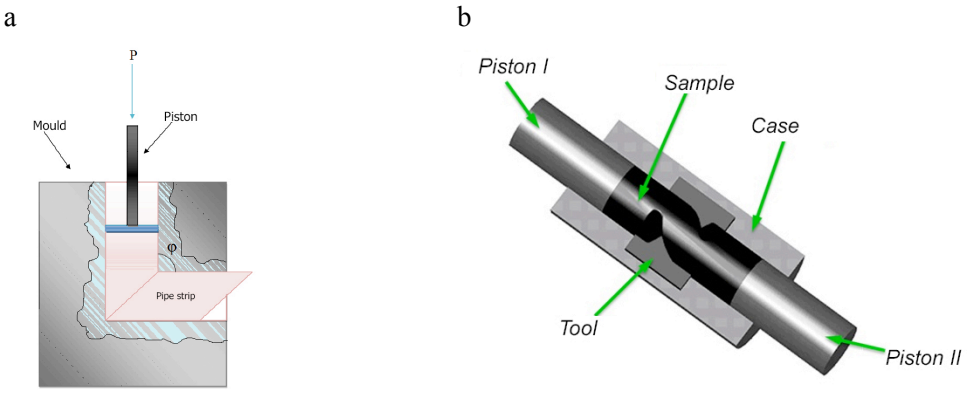


Рисунок 1 – Методы интенсивной пластической деформации:
a-равноканальное угловое прессование,
b-локальное сдвиговое прессование.

В ходе лабораторных испытаний были получены результаты скорости коррозии образцов из алюминиевого высокопрочного сплава Д16Т до и после

ЛСП. На основании полученных результатов скорость коррозии уменьшилась почти в 1,5 раза по сравнению с эталонным материалом со щелочной средой за 650 часов взаимодействия. Интенсивная пластическая деформация рекомендуется для возможного улучшения коррозионной стойкости алюминиевых сплавов в промышленных масштабах

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 53713-2009. Месторождения нефтяные и газонефтяные. Правила разработки.
2. ГОСТ 33006.2-2014 (ISO 10407-2:2008) Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование для роторного бурения. Часть 2. Контроль и классификация применяемых элементов бурового инструмента. Общие технические требования и методы контроля.
3. Методика проведения hеразрушающего ультразвукового контроля бурильных труб ЛБТ 1198-00.001МУ.
4. *Furukawa M., Berbon P., Horita Z., Nemoto M., Tsenev N.K., Valiev R.Z., Langdon T.G.* 2015. Production of Ultrafine-Grained Metallic Materials Using an Intense Plastic Straining Technique. Materials Science Forum. Volume: Towards Innovation in Superplasticity. 171-177.
5. *Tsenev, N.K., Perevezentsev, V.N., Shcherban', M.Y., Tsenev, A.N.* Structural changes during annealing of submicro- and nanocrystalline aluminum alloys. 2010. Technical Physics.
6. *Шаммазов А.М., Ценев Н.К., Акчурин Х.И., Назарова М.Н., Исмаков Р.А., Лебедич С.П., Суханов В.Д., Чудинов Б.А., Кришпал М.М.* Сверхмелкозернистые материалы и перспективы их использования в горном деле и трубопроводном транспорте. В сборнике: Горный вестник Уфа, 2000. С. 33-36.
7. *Шакирова А.И., Назарова М.Н., Исмаков Р.А., Хафизов А.Р., Ценев Н.К.* О перспективных направлениях совершенствования технологий изготовления алюминиевых бурильных труб для работы в условиях Арктики. В сборнике: Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике Сборник докладов конференции. ФГУП ВИАМ. 2015. С. 23.
8. *Сафрайдер А.И., Назарова М.Н., Исмаков Р.А., Ценев Н.К., Аглиуллин А.Х.* Улучшение показателей строительства скважин повышением работоспособности легкосплавных бурильных труб при эксплуатации в различных буровых промывочных жидкостях. Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 2 (78). С. 12-20.
9. *Бахтизин Р.Н., Ценев Н.К., Исмаков Р.А., Яхин А.Р., Назарова М.Н.* Причины и особенности разрушения элементов компоновки бурильной колонны в современных условиях геолого-технической эксплуатации. В сборнике: Сервисные услуги в добыче нефти Материалы II научно-технической конференции. Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2015. С. 25-37.
10. *Шакирова А.И., Назарова М.Н., Исмаков Р.А., Палаев А.Г.* Состояние материала элементов компоновки бурильной колонны при бурении в осложненных условиях В книге: Бурение скважин в осложненных условиях Тезисы докладов. Санкт-Петербургский горный университет. 2017. С. 68-69.
11. *Басович В.С., Буяновский И.Н., Сапунжи В.В.* Перспективы применения

легкосплавных бурильных труб с наружным спиральным оребрением для бурения горизонтальных скважин и боковых стволов//Бурение и нефть. -2014. -№ 5. -С. 42-46.
12. *Файн Г. М., Штамбург В. Ф., Данельянц С. М.* Нефтяные трубы из легких сплавов . Москва: Недра, 1990.
13. *Шакирова А.И., Исмаков Р.А., Аглиуллин А.Х.* Комплексное изучение материалов алюминиевых бурильных труб. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 2. С. 95-103.
14. *Jian L., SJianhua S., Xinmiao L., Yongqin Z., Li P.* Development and Application of Aluminium Alloy Drill Rod in Geological Drilling. IGEDTC, New International Convention Exposition Center: 23-25 May 2014. Chengdu Century City: China.
15. *Braham V.J.* Corrosion of Aluminium in Contact with Cutting Fluids/ Electrochemistry of Corrosion. Newcastle University Library. 1997.

УДК 65.011.56

ХРУСТАЛЕВА И.Н.,
ЛЮБОМУДРОВ С.А.,
ЧЕРНЫХ Л.Г.,
ЛАРИОНОВА Т.А.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЕДИНИЧНЫХ И МЕЛКОСЕРИЙНЫХ ПРОИЗВОДСТВ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье описана имитационная модель технологической подготовки производства для единичных и мелкосерийных производств. Описанная имитационная модель включает в себя три уровня: контроль работы отдельных элементов производственной системы и их взаимодействия, проектирование и моделирование различных вариантов технологических маршрутов обработки, выбор рациональных параметров резания, анализ узких мест производственной системы. Для определения рациональных режимов резания применяется расчет суммарной погрешности обработки и метода Тагути. Определение рационального варианта технологического процесса производится на основе многокритериального анализа.

Ключевые слова: имитационное моделирование; технологический маршрут обработки; режимы резания; точность обработки; многокритериальный анализ.

KHRUSTALEVA I.N.,
LYUBOMUDROV S.A.,
CHERNICH L.G.,
LARIONOVA T.A.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF SINGLE AND SMALL-SERIES PRODUCTIONON THE BASIS OF SIMULATION MODELING

Abstract. The article describes the simulation model of technological preparation of production for single and small-scale production.The described simulation model includes three levels: control of operation of individual elements of the production system and their interaction, design and modeling of various versions of technological processing routes, selection of rational cutting parameters, analysis of bottlenecks of the production system. The total processing error and Taguchi method calculation is used to determine rational cutting modes.The process plan rational variant is determined on the basis of a multi-criteria analysis.

Key words: imitating modeling; technological route of processing; cutting modes; Taguchi method; multicriteria analysis.

Введение. Для предприятий, работающих в условиях единичного и мелкосерийного типов производства, одним из наиболее трудоемких этапов производственного процесса является технологическая подготовка производства (ТПП). Для поддержания своей конкурентоспособности предприятия данного типа вынуждены сокращать длительность производственного цикла и трудоемкость выполняемых работ, что приводит к снижению степени детализации разрабатываемых технологических

процессов, и как следствие снижению качества выполняемых работ. Проблема повышения эффективности технологической подготовки производства широко освещена в научной литературе [1-19]. Наиболее эффективными методами оценки множества вариантов технологических процессов и выбора наиболее рационального технологического процесса является имитационное моделирование производственных процессов и многокритериальный анализ на основе выбранных критериев.

Описание модели. Для решения поставленной проблемы была разработана имитационная модель технологической подготовки производства (рис. 1), которая позволяет: производить контроль работы отдельных элементов производственной системы и их взаимодействия, проектировать и моделировать различные варианты технологических маршрутов обработки для каждой партии деталей, определять рациональные параметры резания, рассчитывать технические и экономические параметры производственной системы, проводить многокритериальный анализ и определять наиболее приемлемый вариант технологического процесса с учетом действующего производственного графика, производить анализ "узких мест" производственной системы, моделировать различные варианты производственных сценариев для устранения «узких мест» производственной системы [20].

Определение рационального варианта технологического процесса включает в себятри этапа.

Этап №1. Проектирование множества технологических маршрутов обработки для партии деталей. Проектирование технологических маршрутов обработки базируется на объединении двух методов проектирования технологических процессов: модульного технологического процесса и группового технологического процесса.

Этап №2. Определение рациональных параметров резания для каждого технологического перехода. Для выбора рациональных параметров резания вначале определяется интервалы допустимых значений для каждого параметра (скорость резания, подача, глубина резания) на основе расчета суммарной погрешности обработки. Далее, с учетом поставленных производственных задач, в пределах допустимых интервалов назначаются режимы резания на основе расчета функции потерь качества, предложенной японским инженером Г. Тагути.

Этап №3. Определение рационального варианта технологического процесса. Определение рационального варианта технологического процесса производится на основе многокритериального анализа по следующим критериям: длительность производственного цикла, величина переменных затрат, величина погрешности обработки. Оценка эффективности каждого варианта технологического процесса производится на основе расчета целевой функции:

$$F_{\text{ТП}} = \frac{(\text{Т}_{\text{ПЦ}})_i}{(\text{Т}_{\text{ПЦ}})_{min}} \cdot k_{\text{т}} + \frac{(\text{З}_{\text{пер}})_i}{(\text{З}_{\text{пер}})_{min}} \cdot k_{\text{З}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{(\Delta_{\Sigma})_i}{(\Delta_{\Sigma})_{min}} \cdot k_{\Delta} \quad (1)$$

$$_{T} + k_{\text{З}} + k_{\Delta} = 1, \quad (2)$$

где $(\text{Т}_{\text{ПЦ}})_i$ - длительность производственного цикла по *i*-ому варианту технологического процесса; $(\text{Т}_{\text{ПЦ}})_{min}$– минимальная длительность производственного цикла среди рассматриваемого множества технологических маршрутов обработки; $(\text{З}_{\text{пер}})_i$- величина переменных затрат на изготовление партии деталей по *i*-ому варианту технологического процесса; $(\text{З}_{\text{пер}})_{min}$- минимальная величина переменных затрат на изготовление партии деталей среди рассматриваемого множества технологических маршрутов обработки; $(\Delta_{\Sigma})_i$ - величина погрешности обработки, получаемого по *i*-ому варианту технологического процесса; $(\Delta_{\Sigma})_{min}$- минимальная величина погрешности обработки для оцениваемого параметра, среди рассматриваемого множества технологических маршрутов обработки; k_T, $k_{\text{З}}$, k_{Δ}- весовые коэффициенты.

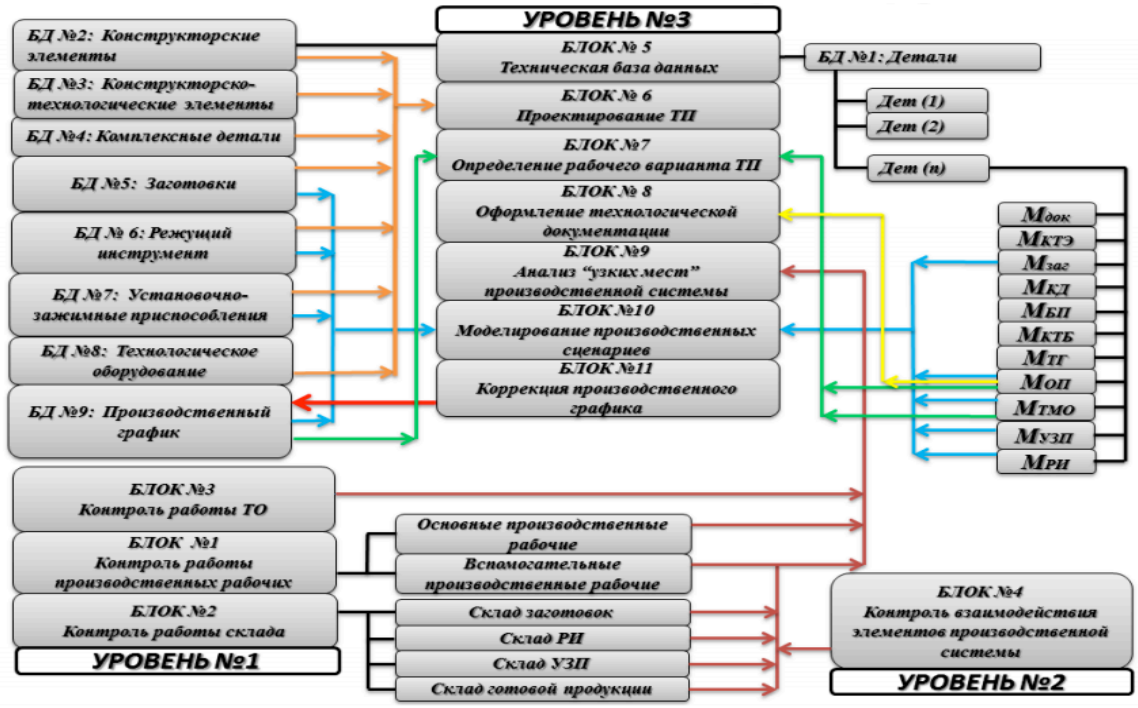


Рисунок 1 – Схема имитационной модели технологической подготовки производства

Практическое применение. Представленная имитационная модель была апробирована на ряде предприятий г. Санкт-Петербурга. В рамках эксперимента было проведено имитационное моделирования для 20 наименований деталей. Для рассматриваемой номенклатуры деталей были спроектированы допустимые варианты технологических маршрутов обработки, проведен анализ эффективности применения различных комплектов режущего инструмента для каждой технологической операции, рассчитаны рациональные параметры резания и определены рациональные варианты технологических процессов для каждой партии деталей.

Для рассматриваемой номенклатуры деталей был произведен сравнительный анализ результатов имитационного моделирования и фактических значений оценочных параметров, полученных по результатам реализации технологических процессов. Величина отклонений результатов имитационного моделирования и фактических значений оценочных параметров находятся в следующих пределах: величина погрешности обработки: 8,9-15%; длительность производственного цикла: 1,5-4,3%; величина переменных затрат: 4,2-8,1%.

Выводы. Величины отклонений для каждого параметра находятся в допустимых пределах для машиностроительной отросли, на основе чего можно сделать вывод об эффективности разработанной имитационной модели.

Применение разработанной имитационной модели на машиностроительных предприятиях позволит в значительной степени сократить длительность и трудоемкость технологической подготовки производства и повысить ее эффективность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максаров В.В. Моделирование динамических процессов механической обработки в среде NILabviewдля совершенствования технологии изготовления деталей горных машин / В.В. Максаров, А.Е. Ефимов, Д.А. Осминко // Металлообработка, 2018. №1(103). С. 6-13.

2. *Максаров В.В.* Технологические особенности магнитно-абразивной обработки в условиях цифровых технологий / В.В. Максаров, А.И. Кексин, И.А. Филипенко, И.А. Бригаднов // Металлообработка, 2019. №4(112). С. 3-10.

3. *Заморенов М.В.* Имитационное моделирование процесса функционирования технологической ячейки с обесценивающими отказами / М.В. Заморенов, В.Я. Копп, А.А. Селькин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2016. №5. С. 236-244.
4. *Хаймович И.Н.* Совершенствование технологического процесса многономенклатурного производства на основе имитационного моделирования гибких производственных линий в цехе / И.Н. Хаймович, М.А. Фролов, Н.О. Куралесова // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева, 2016. Т.2. №3. С. 208-213.
5. *Kuznetsov P., Blau P., Koriath H.-J., Richter M.* 2016 Criteria for Energy-efficiency of Technological Processes, Technological Machines and Production Engineering *Procedia CIRP* 46 340-343.
6. *Kikolski M.*. 2017 Study of Production Scenarios with the Use of Simulation Models *Procedia Engineering* 182 321-328.
7. *Guizzi G., Falcone D., De Felice F.* 2019 An integrated and parametric simulation model to improve production and maintenance processes: Towards a digital factory performance *Computers & Industrial Engineering* 137 106052.
8. *Butzer S., Schötz S., Kruse A., Freytag A.-S., Steinhilper R.* 2017 Simulation-based Assessment of Segmentation and Control Strategies within Multi-variant Productions *Procedia CIRP* 61 481-486.
9. *Rudometov S.V., Okolnishnikov V.V.* A System for computersimulation of technological processes 46 653-658.
10. *Savelyeva N.N.*. 2017 Creation of an automation system for engineering calculation of preparation for the production at high-technology enterprises of mechanical engineering. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 181 012029.
11. *Karpaev S.A.* 2019 Improving the process of designing route maps in production *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 537 032050.
12. *Gwiazda A., Sękala A. and Banaś W.* 2017 Modeling of a production system using the multi-agent approach *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 227 012052.
13. *Govorkov S., Fokin I.V., Lavrentyeva M.V. and Karlina Yu.I.* 2019 Methodology of the formalized approach of the automated construction of the manufacturing route of a mechanical engineering product *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 632 012093.
14. *Foit K., Banaś W., Gwiazda A. and Hryniewicz P.* 2017 The comparison of the use of holonic and agent-based methods in modelling of manufacturing systems *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 227 012046.
15. *Monica Z.* 2015 Optimization of the production process using virtual model of a workspace *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 95 012102.
16. *Polyanskov Yu., Lutoshkin I., Yardaeva M. and Lipatova S.* 2019 Model of production schedule modification assessment for digital production management systems *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 497 012082.
17. *Zakoldaev D.A., Gurjanov A.V., Shukalov A.V. and Zharinov I.O.* 2019 The application of Krone model to describe the production facilities of the Industry 4.0 smart factories *J. Phys.: Conf. Ser.* 1333 072031.
18. *Omelchenko I., Drogovoz P., Gorlacheva E., Shiboldenkov V. and Yusufova O.* 2019 The modeling of the efficiency in the new generation manufacturing-distributive systems based on the cognitive production factors *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 630 012020.
19. *Pavlov V.* 2018 Dynamic models of production planning with continuous time in projects of new products development *J. Phys.: Conf. Ser.* 1096 012180.
20. *Lyubomudrov S.A., Khrustaleva I.N., Tolstoles A.A., Maslakov A.P.* 2019 Improving the efficiency of technological preparation of single and small batch production based on simulation modeling *Journal of Mining Institute* 240 669-677.

УДК 681.7.022.2: 658.5.011

ЧУКИЧЕВ А.В.,
ТИМОФЕЕВА О.С.,
ЯБЛОЧНИКОВ Е.И.
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАЛЫХ СЕРИЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В статье описывается производственный процесс изготовления малых серий полимерных изделий литьем под давлением с точки зрения применения различных информационных технологий. Рассматриваются вопросы совершенствования производственных процессов за счет использования имитационного моделирования, мониторинга производственных объектов. Описана организация производства на основе концепции киберфизической системы.

Ключевые слова: литье под давлением; формообразующие детали; аддитивные технологии, промышленный интернет вещей, индустриальные киберфизические системы.

CHUKICHEV A.V.,
TIMOFEEVA O.S.,
YABLOCHNIKOV E.I.
ITMO University,
Faculty of Control Systems and Robotics

DIGITALIZATION OF PRODUCTION PROCESSES FOR SMALL SERIES MANUFACTURING OF POLYMER PARTS

Abstract. The article describes a process of small series production of polymer products using injection molding from a perspective of using various information technologies. The issues of improving physical production processes through the use of simulation modeling and monitoring of production objects are discussed. The organization of production based on the concept of a cyber-physical system is proposed.

Keywords: injection molding; forming parts; additive manufacturing; industrial internet of things, industrial cyber-physical system.

Технология литья под давлением изделий из полимерных материалов ориентирована, как правило, на массовое производство, вследствие высокой стоимости и трудоёмкости изготовления литьевых форм. Композиционные полимерные материалы широко применяются в машиностроении [1], а одной из самых распространенных технологий их переработки является литье под давлением.

Такие свойства производственных систем, как гибкость, скорость выполнения заказов, индивидуализация, неразрывно связаны с использованием современных производственных и информационных технологий. Производственным компаниям необходимо иметь возможность в кратчайшие сроки перестраивать процесс производства на новый тип (вид) выпускаемой продукции без увеличения себестоимости изготовления изделий, а это возможно только при высокой гибкости производственной системы, что является одним из ключевых свойств «Цифрового производства» [2-3].

Новые композиционные полимерные материалы позволяют рассматривать

возможность быстрого изготовления с применением аддитивных технологий формообразующих деталей (ФОД) переналаживаемых литьевых форм [4-6]. В данной работе рассматриваются процессы технологической подготовки производства (ТПП) малых серий полимерных изделий с использованием сменных ФОД. Этапы ТПП и применяемое программное обеспечение и оборудование представлено в табл. 1.

Таблица 1.

Этапы ТПП

№	Этапы ТПП	Программное обеспечение / Оборудование
1	Проектирование полимерного изделия	Cimatron
2	Анализ технологичности	MSC Software, Cimatron, Moldex3D R16
3	Проектирование отливки	Cimatron
4	Имитационное моделирование процесса литья	Moldex3D R16
5	Проектирование формообразующих деталей	Cimatron
6	Изготовление формообразующих деталей	3DEXPERIENCE Marketplace, Cimatron, HAAS Super Mini Mill,«КлиматикПро ТХ-300»
7	Контроль формообразующих деталей	PC-DMIS, КИМ Dea Global Perfomance 05.07.05, профилометр Hommel Tester T8000
8	Литье под давлением полимерных изделий	ТПА ELEKTRA Evolution 30
9	Контроль полимерных изделий	PC-DMIS, КИМ Dea Global Perfomance 05.07.05, профилометр Hommel Tester T8000
10	Хранение и управление данными	Winnum Cloud

На этапах проектирования полимерного изделия и ФОД переналаживаемой литьевой формы, а также для разработки управляющих программ для изготовления ФОД используется CAD/CAM-система Cimatron. С использованием этой системы на основе 3D-модели полимерного изделия были спроектированы 3D-модели отливки и сменных вставок литьевой формы.

Моделирование процессов литья в CAE-системе Moldex3D использовалось для определения величин остаточных напряжений, наличия пор в материале, распределения температур в конструкции, наличия и положения линий спая, циклограмма литья. При проведении исследований с использованием новых материалов, а также при организации мелкосерийного типа производства изделий литьем под давлением, применение CAE-систем для установления оптимальных параметров процесса литья еще на этапе его моделирования является крайне важным. Ресурс использования полимерной оснастки является ограниченным, и проведение пробных циклов может сократить количество полученных полимерных изделий требуемого качества [7-9].

Для создания имитационной модели на уровне производственного процесса использовалась система DELMIA 3DEXPERIENCE. Разработанная модель позволяет решать такие задачи, как синхронизация совместно работающих устройств на виртуальном уровне, оптимизация времени циклов автоматизированных линий, расчет производительности элементов технологической системы и т.д. Подробное описание модели приводилось в [10].

Имитационные модели могут быть использованы для создания цифровых двойников производственной системы. Для этого необходимо обеспечить сбор данных с датчиков и контроллеров, установленных непосредственно на оборудовании с целью измерения ключевых параметров его работы. Для этих целей всё технологическое оборудование, используемое в работе, было подключено к платформе индустриального интернета вещей (IIoT) Winnum.

Средствами платформы Winnum с применением различных устройств могут быть организованы электронная идентификация и отслеживание местонахождения и перемещений разнотипных объектов, в том числе и изделий. В данном случае для реализации процесса идентификации полимерных вставок использовались метки, использующие технологию Near Field Communication (NFC). Каждая метка содержит идентификатор вставки, номер производственного заказа, эксплуатационный ресурс вставки и ссылку на расположенный в облаке Winnum файл с историей создания и правилами эксплуатации вставки.

Для изготовления изделий из различных материалов используются разные технологии 3D печати, и соответствующие им специальные 3D принтеры. В связи с отсутствием и высокой стоимостью такого оборудования, появляется необходимость использования сервисов для заказа изготовления изделий. Актуальность и преимущества подобного взаимодействия с поставщиками производственных сервисов представлены в работе [11]. В данном исследовании использовался облачный сервис 3DEXPERIENCE Marketplace.

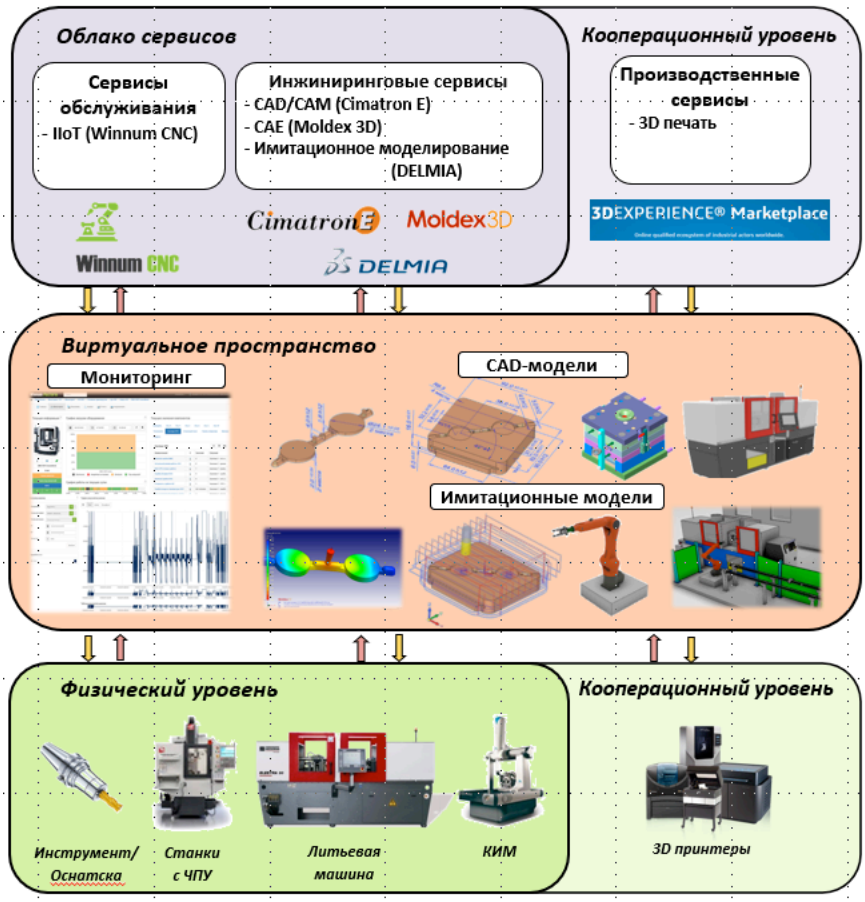


Рисунок 1 – Структура разрабатываемой индустриальной киберфизической системы

Комплекс взаимосвязанных и согласованных моделей изделий, технологических процессов и средств технологического оснащения на всех этапах ТПП литьевого производства малых серий изделий из полимерных материалов позволил сократить длительность ТПП [12]. Таким образом, на основе описанных процессов и различных

систем была сформирована цифровая производственная среда.

Применение различных современных технологий, таких как IIoT, облачные сервисы, технологии идентификации и отслеживания объектов, позволяет говорить о возможности организации на этой базе такой производственной системы как индустриальная киберфизическая система, которая укрупненно может быть представлена как показано на рис. 1.

Физический уровень такой системы представлен всеми физическими объектами, участвующими в производственных процессах. Виртуальное пространство состоит из взаимосвязанных цифровых двойников объектов. Подходы к созданию Виртуального пространства рассматриваются в работе [13]. Облако сервисов содержит различные программные приложения, предоставляемые производителями оборудования и поставщиками услуг [14].

Организация непрерывного процесса сбора производственных данных позволяет обеспечить системы управления производством (MES) актуальными данными. Для этого необходима интеграция разнородной информации относительно производственного процесса на уровне MES (3 уровень ISA-95) [15]. При этом необходимо обеспечить совместимость протоколов передачи данных (OPC UA, поддержка локальных протоколов, используемых на конкретном производственном участке), возможность представления производственного процесса в цифровом виде для организации прослеживаемости, возможность создания настраиваемой модели данных, а также ряда прочих критериев, определяемых непосредственно производственным процессом. Для построения такой модели производственных процессов используется Эталонная модель архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI4.0) [16].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krasnyy V.A., Maksarov V.V., Olt J.* 2015 The use of polymer composite materials in the friction nodes downhole oil pumps *JOURNAL OF MINING INSTITUTE* 211 71-79.
2. *Azaiez S., Boc M., Cudennec L., et al.* 2016 Towards Flexibility in Future Industrial Manufacturing: A Global Framework for Self-Organization of Production Cells *The 2nd Intern. Workshop on Recent Advances on Machine-to-Machine Communication. Proc. Computer Sci.* 83 1268-1273.
3. *Lopes Nunes M., Pereira A.C., Alves A.C.* 2017 Smart products development approaches for Industry 4.0 *Manufacturing Engineering Society Intern. Conf.. Proc. Manufacturing* 13 1215-1222.
4. *Vogeler F., Verspreet J.& Geyskens K.* 2018 Breakout analysis of plastic material jetted moulds for injection moulding *International Conference on Polymers and Moulds Innova*tions - *PMI2018*.
5. *Poehler F.M., Bauer S., Feucht T.* 2018 3D Printing Form-building Parts in Moulds for Small-scale Production *Gedruckte Spritzgiessformen für kleine Stueckzahlen Kunstoffe* 108(11) 4–9.
6. Kampker A., Triebs J., Alves B., Kawollek S. and Ayvaz P. 2018 Potential analysis of additive manufacturing technologies for fabrication of polymer tools for injection moulding – A comparative study *IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM), Yunlin* 49-52.
7. Mold Filling Simulation and Smart Manufacturing under Industry 4.0 (1): CAE Technology Development and Process Evolution
https://www.moldex3d.com/en/blog/top-story/mold-filling-simulation-and-smart-manufacturing-under-industry-1-cae-technology-development-and-process-evolution
8. Mold Filling Simulation and Smart Manufacturing under Industry 4.0 (2): Smart Injection Machines & Their Adjustment Principles
https://www.moldex3d.com/en/blog/top-story/mold-filling-simulation-and-smart-manufacturing-under-industry-4-0-2-smart-injection-machines-their-adjustment-principles/

9. *Kutin A., Dolgov V., Sedykh M., Ivashin S.* 2018 Integration of different computer-aided systems in product designing and process planning on digital manufacturing *11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering Procedia CIRP* 67 476–481.
10. *Demkovich N., Yablochnikov E., Abaev G.* 2018 Multiscale modeling and simulation for industrial cyber-physical systems *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)* 291-296.
11. *Dazhong Wua, David W. Rosena, Lihui Wangb, Dirk Schaefer*. 2015 Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation *Computer-Aided Design* 59 1-14.
12. *Timofeeva O., Andreev Y., Yablochnikov E.* 2019 Simulation of injection molding process and 3D-printing of forming parts for small-batch production *IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* 1631-1637.
13. *Kashevnik A., Teslya N., Yablochnikov E., Arckhipov V., Kipriianov K.* 2016 Development of a prototype Cyber Physical Production System with help of Smart-M3 *42nd Conference of the Industrial Electronics Society, IECON* 4890-4895.
14. *Colombo A.W., Bangemann T., Karnouskos S., Delsing J., Stluka P., Harrison R., Jammes F. and Lastra J.* 2014 Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems *Cham: Springer International Publishing*.
15. ANSI/ISA-95.00.01-2000. Enterprise-Control System Integration. Part 1: Models and Terminology.
16. *Hankel M., Rexroth B.* 2015 The Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). ZVEI, , 2 p.

УДК 620.1.052

ШТРЕКЕР Д.С.,
ПОПОВ А.Н.,
РЕШЕТОВ Д.В.,
УТКИН Г.А.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ФОРМИРОВАТЕЛЯ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА НА ПАРАМЕТРЫ УДАРА

Аннотация. Проведение ударных испытаний является важным этапом в разработке любого изделия: от микроэлектроники и часов до изделий горнодобывающей промышленности. Все эти изделия могут подвергаться влиянию различных ударных нагрузок. В частности, это могут быть горно-тектонические удары, горные удары с разрушением почвы пласта, внезапные выбросы газа и другие явления. Для подтверждения работоспособности изделий и их качества необходимо предварительно проводить испытания на ударное воздействие. Подобные испытания выполняются на специальном оборудовании – испытательных ударных машинах [1]. Каждое изделие, в соответствии со стандартами, должно выдерживать ударные импульсы определенной амплитуды, длительности и формы [2]. Актуальность проведения ударных испытаний, и исследования непосредственно ударных машин, обусловлены ростом требований к качеству техники, необходимостью выполнения стандартов и отсутствием достаточных теоретических рекомендаций по синтезу машин.

Ключевые слова: ударная машина, ударный импульс, формирователь импульса, характеристики формирователей импульса.

SHTREKER D.S.,
POPOV A.N.,
RESHETOV D.V.,
UTKIN G.A.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

SCIENTIFIC RESEARCH OF PULSE-SHAPING DEVICE DEFORMAION INFLUENCE ON IMPACT PARAMETERS

Abstract. Impact testing is an important step in the process of developing any product: from microelectronics and watches to products of mineral industry. All of these objects can be exposed to various impact loads. Including possible tectonical impacts, rock bumps with shelf destruction, unexpected gas blow-out and other phenomena. It is necessary to preliminary make impact-impulse loading tests for the confirmation of product durability and product quality. Such tests are performed with the help of specific testing equipment - shock-testing machines. [1]. Each object in order to meet the standards should withstand impact impulses of certain amplitude, duration and shape [2]. The relevance of impact testing as well as the relevance of shock-testing machines research are due to following reasons: the growth of production quality requirements, necessity of meeting the standards and lack of machine synthesis theoretical recommendations.

Keywords: shock machine, shock-pulse, pulse-shaping device, pulse-shaping device characteristics.

Ударные машины являются сложным оборудованием с высокой степенью автоматизации. Разработка и производство машин подобного типа требуют использования передовых наукоемких технологий и серьезных финансовых вложений. Поэтому очень важным является глубокое понимание принципов работы ударных машин, их возможностей, методов настройки на рабочие режимы, выбора оптимальных параметров.

На кафедре «Автоматы» СПбПУ Петра Великого был разработан макет ударной машины, который включает в себя все элементы промышленных машин и использует современную элементную базу, но при этом предполагает эксплуатацию в лабораторных условиях кафедры [3]. Структура макета ударной машины представлена на рис. 1.

Рисунок 1 – Макет ударной машины

Несущей частью макета является станина, на которую крепится исполнительный пневмоцилиндр. При подаче воздуха в штоковую полость исполнительного пневмоцилиндра, ударный стол поднимается в крайнее верхнее положение. При переключении пневмораспределителя, ударный стол, под действием силы тяжести, падает на формирователь ударного импульса, который закреплен на инерционном блоке. Инерционный блок жестко соединен с основанием. Демпфирование ударной машины осуществляется с помощью четырёх пневматических цилиндров, которые закрепляются на фундамент.

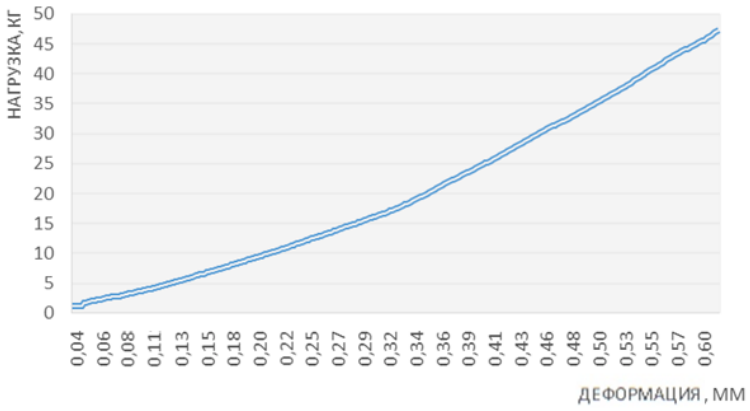
Основным требованием, предъявляемым к ударным машинам, является создание ударных импульсов требуемой формы, амплитуды и длительности. Наиболее распространенной формой импульса является полусинусоидальная. Удары подобной формы можно воспроизвести, используя упругие формирователи, которые располагают между столом и инерционным блоком. Формирователи изготавливаются из эластичного гиперупругого материала, например, полиуретана и имеют цилиндрическую форму. Верхняя (коническая) часть необходима, чтобы материал под действием ударной нагрузки деформировался постепенно, без искажения формы импульса [4].

Исследованию формирователей посвящен целый ряд научных публикаций [5-8]. Однако, до настоящего времени отсутствуют простые методики выбора формирователей, которые обеспечивают требуемые (задаваемые при испытаниях) параметры ударных импульсов (пиковые значения и длительности). Одной из причин, обусловливающих это является пренебрежение деформацией формирователя после удара.

Для оценки деформации формирователя во время удара необходимо оценить его коэффициент жёсткости. Эксперимент по деформации материала формирователя от

прикладываемой статической нагрузки проведен на стенде Instron 5965 (рис. 2, а). Зависимость представлена на рис. 2, б.

а)



б)

Рисунок 2 – Определение свойств материала формирователя:
а – стенд Instron 5965; *б* – график зависимости деформации материала формирователя от приложенной нагрузки

Аналитический расчёт параметров формирователей представлен в [4]. Зависимость деформации формирователя от высоты поднятия стола представлена на рис. 3.

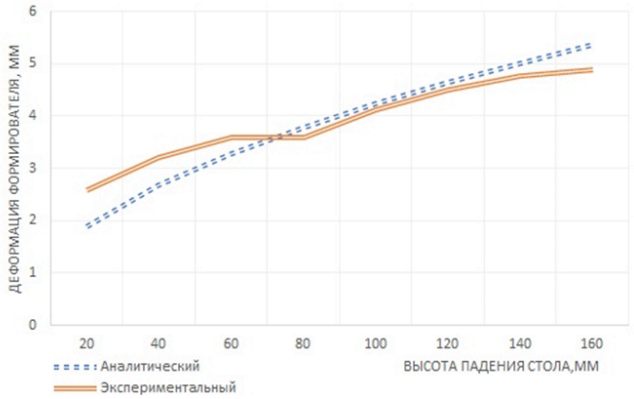


Рисунок 3 – Зависимости деформации формирователя от высоты поднятия стола

Экспериментальные исследования проведены на макете, представленном выше. Полученные зависимости позволяют оценить деформацию формирователя для корректировки входных экспериментальных данных. Результаты, полученные в результате представленной работы, позволяют оптимизировать временные затраты при синтезе желаемых ударных импульсов и могут быть использованы для дальнейших исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Попов А.Н., Полищук М.Н., Тимофеев А.Н.* Испытательные машины. – Екатеринбург: Изд-во «Уральский рабочий», 2017. – 217 с.
2. *Попов А.Н., Полищук М.Н., Пуленец Н.Е.* Моделирование импульса при ударных испытаниях / Современное машиностроение. Наука и образование. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. № 8. С. 513–526.
3. *Решетов Д.В., Попов А.Н.* Макет стенда для ударных испытаний / Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием, 2018. С. 33-36.

4. Mechanical shock: Mechanical Vibration and Shock Analysis, volume 2. Christian Lalanne. - Great Britain: ISTE Ltd, 2009. – 409 p.
5. *Попов А.Н., Полищук М.Н., Васильев А.К.* Выбор формирователя для получения ударного импульса требуемой формы / Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием, 2016. С. 3-6.
6. *Wen J., Liu Ch., Yao H., Wu B.* 2018 A nonlinear dynamic model and parameters identification method for predicting the shock pulse of rubber waveform generator *International Journal of Impact Engineering* 120 1–15.
7. *Полищук М.Н., Пуленец Н.Е., Штрекер Д.С.* Исследование формирователей ударного импульса / Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием, 2018. С. 27-30.
8. *Попов А.Н., Полищук М.Н., Пуленец Н.Е.* Определение характеристики силы упругости формирователя ударных импульсов / Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием, 2018. С. 3-6.

УДК 621.71

ЯМНИКОВ А.С.
Тульский государственный университет
РОДИОНОВА Е.Н.
Тульский государственный университет
Научно-производственное объединение СПЛАВ
МАТВЕЕВ И.А.
Научно-производственное объединение СПЛАВ

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СБОРКИ ПРОТЯЖЕННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОРПУСОВ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос конструкторско-технологического обеспечения сборки протяженных тонкостенных корпусов, в частности рассмотрена проблема обеспечения их вхождения в ответные детали, обеспечивающие функционирование собранных изделий. Предложен новый способ контроля размера вхождения корпусов. Задачей технического решения является снижение трудоемкости контроля корпусов при гарантированном обеспечении их вхождения в пусковые трубы. Способ заключается в том, что корпус устанавливают в двух призмах по крайним центрирующим утолщениям, снимают показания измерительного устройства, по которым судят о годности корпуса по диаметру прилегающего цилиндра, отличающийся тем, что индикатор устанавливают в плоскости, перпендикулярной к одной из граней призмы, настраивают по эталону при касании его наконечника среднего центрирующего утолщения эталона. В результате апробации в условиях действующего производства установлено, что время проверки изделия сокращается примерно в несколько раз.

Ключевые слова: вхождение корпуса; способ сборки; пусковая направляющая; контроль размера вхождения; центрирующие утолщения.

YAMNIKOV A.S.
Tula State University
RODIONOVA E.N.
Tula State University
Scientific-Production Association SPLAV
MATVEEV I.A.
Scientific-Production Association SPLAV

DESIGN AND TECHNOLOGICAL ASSURANCE OF ASSEMBLY OF EXTENDED THIN-WALLED HOUSINGS

Abstract. The article considers the issue of design and technological support for the assembly of extended thin-walled buildings, in particular, the problem of ensuring their entry into the reciprocal parts that ensure the functioning of the assembled products is considered. A new method for controlling the size of the entry of buildings is proposed. The objective of the technical solution is to reduce the complexity of control of the hulls while ensuring their entry into launch tubes. The method consists in the fact that the housing is installed in two prisms according to the extreme centering thickenings, the readings of the measuring device are taken, which judge the suitability of the housing by the diameter of the adjacent cylinder, characterized in that the indicator is installed in a plane perpendicular to one of the faces of the prism, it is adjusted according to the standard when touching the tip of the middle centering thickening of the standard. As a result of testing in the conditions of the current production, it was found that

the verification of the product is reduced by several times.

Keywords: case entry; assembly method; starting guide; entry size control; centering thickenings.

Существует ряд изделий со сборными цилиндрическими корпусами, отличающимися от большинства машиностроительных конструкций наличием в середине корпуса центрирующего утолщения, диаметр которого выполнен меньше, чем диаметры базовых крайних центрирующих утолщений. К таким корпусам неприменим общий принцип взаимозаменяемости на основе сопоставления диаметров прилегающих цилиндров (ГОСТ 31254-2004, ГОСТ 30893.2-2002), поэтому специально для таких случаев разработан способ непосредственного контроля годности сборного протяженного цилиндрического корпуса, например корпуса реактивного двигателя, по прилегающим контурам [1, 2].

Для обеспечения выполнения функционирования исследуемых изделий требуется гарантировать вхождение корпуса в пусковую направляющую. Свободное вхождение определяется наличием зазора между прилегающим цилиндром корпуса и прилегающим цилиндром пусковой направляющей.

В качестве обобщенных границ, охватываемых и охватывающих реальных элементов, принимают прилегающие поверхности и профили элементов. От прилегающих поверхностей и профилей производят отсчет отклонений формы поверхностей по направлению в тело детали. В связи с этим определяют условие вхождения простых геометрических тел, имеющих значительную протяженность, характеризуемую отношением длины к диаметру: $L/D > 10$. На рис. 1 изображена схема положения корпуса в пусковой направляющей.

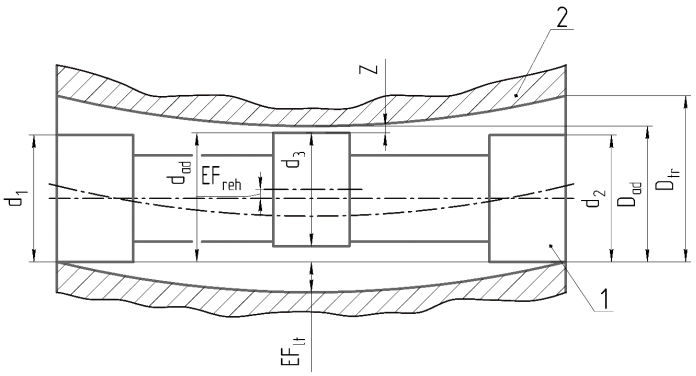


Рисунок 1 - Схема положения корпуса в пусковой направляющей: 1 – сборный протяженный цилиндрический корпус; 2 – пусковая направляющая

Из рисунка 1 видно, что для соблюдения принципа взаимозаменяемости корпуса и пусковой направляющей должно быть реализовано условие:

$$\begin{cases} d_1 < D_{pt\min} > d_2, \\ 0,25\left(d_1+d_2\right)+0,5d_3+EF_{reh}+EF_{ovreh\Sigma}=d_{0reh}\le D_{0d}=A_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где: $D_{lt\min}$ - минимальный диаметр пусковой направляющей,

d_1, d_2 - диаметры крайних центрирующих утолщений,

d_3 - диаметр среднего центрирующих утолщений,

A_0 - диаметр цилиндра нулевой кривизны пусковой направляющей;

d_{0reh} - размер вхождения ступенчатого корпуса;

EF_{reh} - кривизна оси корпуса;

$EF_{ovreh\Sigma}$ - сумма проекций овальностей центрирующих утолщений корпуса на вектор EF_{reh}.

Если в конструкцию в корпусе заложено одно критическое сечение, обеспечивающее гарантированное вхождение корпуса в пусковую направляющую, то способ контроля может быть легко реализован с помощью установки применяемой для контроля радиального биения в действующем производстве. В действующем производстве используют, как правило, роликовые призмы, так как они облегчают процесс контроля и не повреждают поверхности контролируемого изделия, так как отсутствует при этом скольжение поверхностей изделия относительно призм. Диаметр роликов подбирается таким образом, чтобы они имитировали 90° призму, чтобы проседание осей базовых поверхностей было бы минимальным. При контроле радиального биения корпус устанавливается в двух призмах по центрирующим утолщениям, а по индикатору, установленному в плоскости биссектрисы угла призм, среднему утолщению определяют радиальное биение среднего центрирующего утолщения [3].

Фактический размер вхождения корпуса можно выразить из второго уравнения системы (1), заменив диаметры центрирующих утолщений - d_1, d_2, d_3 на удвоенные размеры малых полуосей эллипсов соответствующих центрирующих утолщений - $b_{1.2.3}$:

$$d_{0rehf} = 0,5\left(b_1 + b_2\right) + b_3 + EF_{reh} + EF_{ovreh\Sigma}. \quad (2)$$

В уравнении (2) априори полагается, что вектор кривизны оси корпуса - EF_{reh} перпендикулярен измерительной базе, т.к. из опыта косвенной проверки размера вхождения путем измерения радиального биения среднего центрирующего утолщения, практически во всех случаях они совпадают.

Сложнее установить значение и направление суммарного вектора проекций овальностей центрирующих утолщений корпуса на вектор $EF_{reh} - EF_{ovreh\Sigma}$.

По правилам математики проекция суммы векторов на заданное направление (в рассматриваемом случае на ось *Y*) в соответствии с передаточными отношениями диаметров на размер вхождения определяют зависимостью:

$$EF_{ovreh\Sigma} = 0,5\left(EF_{ovreh1} \cdot \sin\varphi_1 + EF_{ovreh2} \cdot \sin\varphi_2\right) + EF_{ovreh3} \cdot \sin\varphi_3. \quad (3)$$

В правой части уравнения (3) расположены 6 независимых величин. Для овальностей центрирующих утолщений заданы допуски, обычно такие величины распределены по закону Релея. Фазовые углы наклона больших полуосей эллиптических сечений, соответственно центрирующих утолщений 1, 2, 3 относительно измерительной базы при контроле размера вхождения - $\varphi_{1.2.3}$, подчиняются закону равномерного распределения. Уравнение (3) показывает, что овальности центрирующих утолщений оказывают некоторое влияние на размер вхождения. Предсказать такое влияние сложно из-за сочетания влияния шести случайных величин. В таких случаях целесообразно использовать статистическое исследование влияния погрешностей или математическое моделирование этого влияния [4].

При косвенном контроле размера вхождения путем измерения радиального биения среднего центрирующего утолщения собранного корпуса на показания влияет только овальность центрирующего утолщения 3, а влияние овальностей центрирующего утолщения 1 и центрирующего утолщения 2 скрыто путем использования особых свойств призм с углом 90°.

Если датчик линейных перемещений 3 установить под углом в 45° к биссектрисе угла призмы 1, то есть перпендикулярно одной из граней призмы, то будет измерен непосредственно фактический размер вхождения корпуса - d_{0rehf}. Для настройки индикатора используют эталон 2, который изготавливают близко к номинальным размерам корпуса (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что способ непосредственного контроля диаметра прилегающего контура корпуса прямо учитывает влияние всех шести случайных составляющих уравнения (3), поэтому погрешность формы всех центрирующих утолщений корпуса и их

фазовые углы не создают погрешностей определения размера вхождения по исследуемому способу.

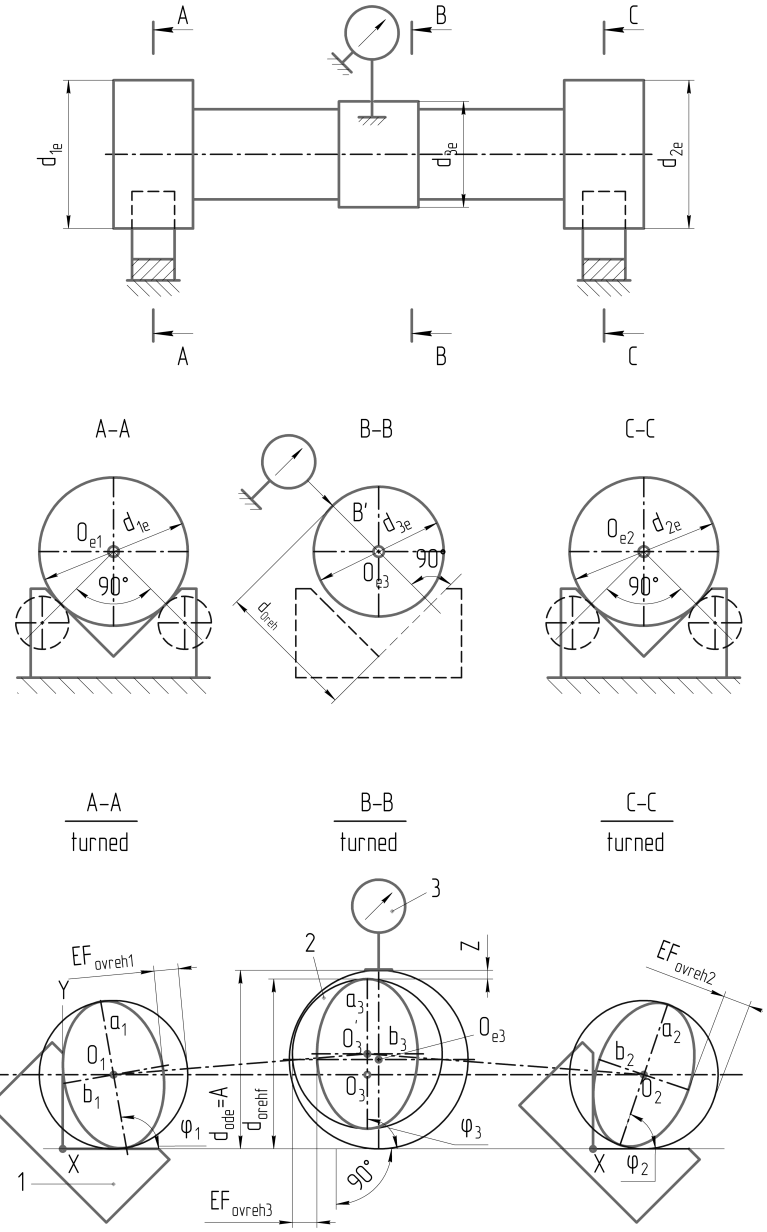


Рисунок 2 - Схема контроля размера вхождения корпуса:
1 – призмы; 2 – эталон; 3 - индикатор

Трубы корпуса соединяют с помощью резьбовых полузамков, включающих упорные резьбы, короткие центрирующие пояски и торцы. В соединении возможны как параллельные смещения осей, так и их перекос [5, 6].

Погрешность измерения $EFd_{0reh1,2}$ приблизительно определяют по зависимости:

$$EFd_{0reh1,2} = 0,5\left(EFd_{0reh2} + EFd_{0reh1}\right), \tag{4}$$

где: $EFd_{0reh1} = L_{b1}\psi_1 \, EFd_{0reh2} = L_{b2}\psi_2$ - погрешности измерения размера от «проседания» изделия в призмах;

L_{b1} и L_{b2} - расстояние до базового сечения от торцов труб.

Смещение плоскости контроля на расстояние L_{jC} от плоскости стыка, приводит к погрешности измерения:

$$EFd_{0reh3} = L_{jc}\psi_1, \tag{5}$$

где: L_{jC} - расстояние от плоскости контроля до плоскости стыка объединяемых труб (до края контролируемой поверхности);
ψ_1 - угол наклона оси первой трубы с осью контроля.

Для определения порядка значений углов ψ рассмотрены сочетания размеров и допусков на типовой корпус: длины труб около 1000 мм, длины центрирующего утолщения 1 и центрирующего утолщения 2 – около 80 мм, максимально допускаемое радиальное биение среднего центрирующего утолщения 3 – 0.5 мм, откуда допустимая кривизна оси корпуса – 0.25 мм.

Как правило, установить реальное значение углов ψ_1 и ψ_2 на практике невозможно, поэтому учесть погрешность измерения можно только пользуясь расчетными предельными величинами углов ψ_1 и ψ_2, ужесточая допуск на размер $TEFd_{0reh\Sigma}$ при настройке прибора.

Для уменьшения погрешностей измерения размера вхождения корпуса d_{0reh}, призмы при контроле нужно устанавливать как можно ближе к краям корпуса, однако они не должны выходить за его пределы, поэтому расстояние от края базовых центрирующих утолщений берется минимальным 2-3 мм, что обычно соответствует погрешности $EFd_{0reh1,2} \approx 0,001 \div 0,00075$ мм.

Проведенное исследование конструкторско-технологического обеспечения сборки протяженных тонкостенных корпусов позволило разработать новый способ контроля размера вхождения тонкостенных корпусов, показывающего, что существующие овальности центрирующих утолщений оказывают значимое влияние на величину контролируемого размера, однако не влияют на точность его измерения.

При использовании традиционной схемы размещения опорных призм, примерно посреди длины центрирующих утолщений, перекос осей корпусов существенно влияет на погрешность измерения размера вхождения. При максимально допустимом радиальном биении центрирующих утолщений получается погрешность измерения до 0.02 мм.

Для уменьшения погрешности контроля необходимо элементы располагать как можно ближе к краям объединяемых деталей. При контроле рекомендуется использовать протяженный контакт, который должен перекрывать стык, для определения размера вхождения по двум смежным поверхностям (двух деталей или одной).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ямников А.С.* Способ контроля диаметра прилегающего цилиндра сборного ступенчатого корпуса / А.С. Ямников, О.А. Ямникова, И.А. Матвеев, Е.Н. Родионова // Российский патент. 2019. № 2682572. С. 8.
2. *Yamnikov A.S., Rodionova E.N.,. Yamnikova O.A, Matveev I.A.* 2019 The effect of errors of the form and position of the base surfaces of a composite axisymmetric body on the size of an adjacent contour *Measurement Techniques* 8(62) 692–696.
3. *Павлов Д.А.* Исследование влияния свойств материала на неоднородность деформации при продольной прокатке труб на короткой оправке / Д.А. Павлов, М.В. Ерпалов, Г.В. Шимов, Е.А. Павлова // Черные металлы, 2018. №10. С. 17–21.
4. *Бажуков И.Н.* О проблеме измерения диаметра прецизионных особотонкостенных труб / И.Н. Бажуков, А.В. Серебряков, С.И. Паршаков // Черные металлы, 2018. №8. С. 51–57.
5. *Sosenushkin E.N., Yanovskaya E.A., Emelyanov V.V.* 2015 Stress state and deformability of metal in axisymmetric extension *Russian Engineering Research* 6(35) 462–465.
6. *Grigoriev S.N., Teleshevskii V.I., Glubokov A.V.* 2012 The problems of metrological support for the preparation of production in machine construction *Measurement Techniques* 5(55) 526–529.

СЕКЦИЯ 2.
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 622.73 : 622.371

АВРАМОВ Д.В.,
МАРТЫНОВ Н.В.
ООО «НПФ «ЭлектроГидроДинамика»
ДОБРОМИРОВ В.Н.
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАСКРЫТИЯ МИНЕРАЛОВ

Аннотация. Технология раскрытия минералов, основанная на электрогидравлическом эффекте, позволяет раскалывать вмещающую породу по неоднородностям, т.е. по границам включений частиц полезных минералов, оставляя степень измельчения в пределах экономической целесообразности. Целью исследования являлась экспериментальная отработка электрогидравлической технологии для энергосберегающей селективной дезинтеграции тонковкрапленных руд сложного минерального сырья. Исследования проводились с использованием специально созданной лабораторной установки. В качестве объектов исследования использовались предварительно дробленные пробы различных руд. Предметом исследования был процесс раскрытия минералов от действия факторов электрогидравлического эффекта. Изложены подходы к расчетному определения электрических параметров, обеспечивающих высокую степень раскрытия минералов. В результате серии проведенных экспериментов по раскрытию минералов была подтверждена высокая эффективность предлагаемой технологии.

Ключевые слова: раскрытие минералов, электрогидравлический эффект, класс крупности, гранулометрический и минералогический состав.

AVRAMOV D.V.
MARTYNOV N.V.
"NPF "Electrohidrodinamica"
DOBROMIROV V.N.
Saint Petersburg State University of Architecture and
Civil Engineering

ELECTROHYDRAULIC TECHNOLOGY OF DISCLOSURE OF MINERALS

Abstract. The technology of mineral disclosure, based on the electrohydraulic effect, allows splitting the host rock along inhomogeneities, i.e. along the boundaries of inclusions of particles of useful minerals, leaving the degree of grinding within the limits of economic feasibility. The aim of the study was the experimental development of electro-hydraulic technology for energy-saving selective disintegration of finely disseminated ores of complex mineral raw materials. Research was conducted using a specially designed laboratory setup. As objects of research, previously crushed samples of various ores were used. The subject of the study was the process of the discovery of minerals from the action of factors of the electrohydraulic effect. Approaches to the calculated determination of electrical parameters that provide a high degree of mineral disclosure are described. As a result of a series of experiments on the discovery of minerals, the high efficiency of the proposed technology was confirmed.

Keywords: disclosure of minerals, electrohydraulic effect, size class, particle size distribution and mineralogical composition.

Введение. Активное использование минеральных ресурсов Земли неизбежно ведет к их истощению. В связи с этим уже сегодня становится актуальным освоение месторождений, разработка которых до настоящего времени считалась нерентабельной [1, 2]. В России имеется много месторождений сложных по состав у тонковкрапленных руд, вовлечение которых в эксплуатацию невозможно из за слишком высоких энергетических затрат на рудоподготовку [3]. Это связано с тем, что раскрытие минералов традиционными механическими способами требует измельчения вмещающей породы до размеров, соизмеримых с размерами самых мелких включений полезных фракций. При этом и происходит энергозатратное неоправданное переизмельчение более крупных включений. В процессах реализации традиционных технологий обогащения минерального сырья около 70 % энергии тратится на дробление и измельчение руды. Затрата электроэнергии на процесс измельчения в зависимости от типа руд составляет от 20 до 60 кВт · ч/т, причем часто увеличение тонкости помола не приводит к повышению степени раскрытия минералов. Недостаточная степень раскрытия минералов приводит к появлению отходов в виде огромных отвалов, содержащих не извлечённое ценное сырье. Анализ основных потерь ценных компонентов в процессах первичной переработки показывает, что 35-40 % потерь связано со сростками и 30-35 % - с тонкими частицами размером меньше 40 мкм [4]. Снизить эти потери возможно путем применения управляемой селективной дезинтеграции руд. Разработка таких методов раскрытия минерального сырья является актуальной задачей [5, 6, 7]. Решение ее возможно путем реализации технологий электроразрядной дезинтеграции, основанной на использования электрогидравлического эффекта иобеспечивающей разрушение материала по межфазным границам за счет образования микротрещин вследствие действия управляемых импульсных нагрузок, возникающих при высоковольнных электрических разрядах в жидкости [4, 8, 9].

Задачи, объект и предмет исследования. В связи с поставленной целью исследования его задачами были: определение расчетных зависимостей для обоснования электрических параметров обработки руд; разработка и создание лабораторной установки; экспериментальная обработка руд сложногоминерального сырья. В качестве объектов исследования использовались предварительно дробленные пробы различных руд. Предметом исследования был процесс раскрытия минералов от действия факторов электрогидравлического эффекта.

Методы и материалы. Сущность электрогидравлического эффекта заключается в том, что при осуществлении высоковольтного электрического разряда внутри жидкости возникает сверхвысокое гидравлическое давление, способное совершать полезную механическую работу. Это самый простой способ преобразования электрической энергии в механическую с высоким КПД [10]. Селективность дезинтеграции достигается возможностью управления воздействующими силовыми параметрами процесса в соответствии с прочностью рудного сырья. Известно, что прочность межфазовых границ уступает прочности фаз. Поэтому давление волн сжатия и растяжения, возникающих в результате мгновенного расширения межэлектродного канала разряда, не должно превышать предела прочности обрабатываемого продукта на сжатие, но должно быть больше предела прочности на растяжение по межфазовым границам [11]:

$$\sigma_{раст} < P_{всж} < \sigma_{сж}, \quad (1)$$

где $\sigma_{раст}$ — предел прочности рудного материала на растяжение, МПа; $P_{всж}$ — давление волны, МПа; $\sigma_{сж}$ — предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, МПа.

Величина давления волны определяется соотношением электрических параметров: напряжения разрядного контура, емкости конденсаторных батарей, индуктивности разрядного контура, lрп — длины разрядного промежутка, а также удаленности волны от эпицентра (радиуса разрушения).

Давление волн сжатия, генерируемых электроразрядом в жидкости, выражается зависимостью [12]:

$$P_{всж} = \frac{\sqrt[4]{U_0^5 C}}{\sqrt{r}\sqrt[8]{L^3 l_{рп}^5}} > \sigma_{раст}, \quad (2)$$

где $P_{всж}$ — давление на фронте волны сжатия, МПа; U_0 — напряжение разрядного контура, кВ; C — емкость конденсаторных батарей, мкФ; r — радиус разрушения, м; L — индуктивность разрядного контура, мкГн; lрп — длина разрядного промежутка, м; $\sigma_{раст}$ — предел прочности материала на растяжение, МПа.

В работе [4] предлагается эмпирический коэффициент пропорциональности k, равный 1,3 и учитывающий превышение давления на фронте волны сжатия $P_{всж}$ над пределом прочности рудных материалов на растяжение $\sigma_{раст}$. При введении коэффициента пропорциональности k зависимость (2) преобразуется в выражение:

$$P_{всж} = \frac{\sqrt[4]{U_0^5 C}}{\sqrt{r}\sqrt[8]{L^3 l_{рп}^5}} = k\sigma_{раст}. \quad (3)$$

На основе выражения (3), зная значение $\sigma_{раст}$ рудного материала и определив необходимое давление $P_{всж}$, можно подобрать электрические параметры обработки U_0, C, $l_{рп}$ при конструктивно заданных параметрах установки r и L, обеспечивающие получение требуемого давления на фронте волны сжатия. Частота и количества подаваемых в обрабатываемую среду разрядных импульсов определяло степень и скорость дробления сырья.

Принципиальная схема функционирования созданной для исследования лабораторной электрогидравлической установки приведена на рис. 1. Исходный материал поступает сверху в рабочую зону через загрузочное отверстие. В разрядной камере в зоне импульсного высоковольтного разряда в воде происходит дробление твердых материалов на фракции. Раздробленный до необходимой фракции материал проходит через щелевой классификатор и попадает в поддон установки. Щелевой классификатор задает размер фракций раскрытых минералов. Циркуляционный насос обеспечивает оборот рабочей жидкости (техническая вода) в системе.

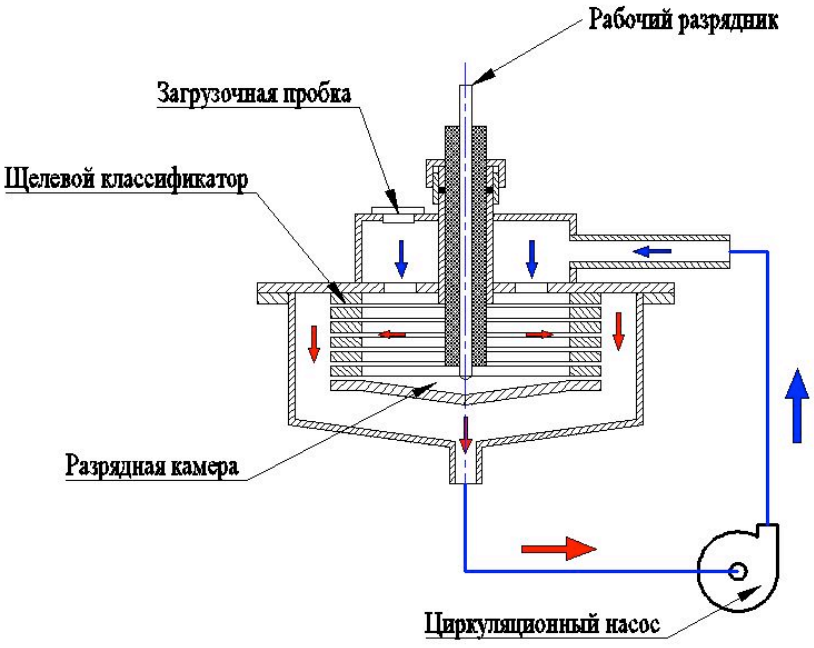


Рисунок 1 – Лабораторная установка для электрогидравлического раскрытия минералов

Обработке были подвергнуты предварительно дробленые пробы руд Аккаргинского, Диабазового, Кульдурского и Снежного месторождений путем их электрогидравлического измельчения до заданной крупности. Подготовленные к измельчению исходные и доведенные в результате обработки до требуемой крупности пробы исследовались в НПО «ВИМС» для определения раскрытия ценных компонентов материалов.

Результаты и обсуждение. Предварительное определение предела прочности пород на сжатие [13, 14] и экспериментальное уточнение электрических параметров позволяли настроить работу установки для измельчения каждой из проб дробленой руды до требуемой крупности. В частности, значения электрических параметров установки для измельчения пробы дробленой руды Кульдурского месторождения составили для крупностей -2+0 и -1+0: U_0 = 36 кВ; С = 2,7 кмФ; $l_{рп}$ = 20 мм; количество импульсов – 500. Энергия одного разряда составляет 1750 Дж в обоих случаях. Частота разрядов определяет производительность процесса и зависит от мощности высоковольтного источника питания. Чем больше мощность источника питания, тем выше частота разрядов на одном и том же режиме. Обычно частота разрядов не превышает 2 Гц. С учетом этого время обработки составило 250 сек, а необходимая мощность источника питания – 1750 · 2 = 3500 Вт или 3,5 кВт.

Ниже представлены результаты исследования раскрываемости целевых минералов в пробе Кульдурского месторождения. Исходный материал – дробленая проба руды крупностью -10+0 мм, представляющая собой смесь минералов (твердость по шкале Мооса): брусит – 65-70% (2,5); магнезит – 10-15% (3.5-4.5); доломит – 5-10% (3,5-4); серпентин – 5%(2,0-4,0); кальцит – 4 5% (3,0); девейлит – 1-3% (2,0-4,0). Полезный минерал – брусит.

Измельчение материала проводилось до заданной крупности 1 мм и 2 мм. Исследование фракционного и минералогического состава проводилось на трех пробах: проба 1 – исходный материал, пробы 2 и 3 - после обработки до заданной крупности.

Для оценки фракционного состава все пробы были рассеяны на классы крупности. Рассев проб показан в табл. 1. Изучение проводилось с применением оптического микроскопа ZeissAxio Imager.A2m с установленным анализатором изображения и программного обеспечения ThixometPro. Из материала каждой пробы были изготовлены препараты для оптического анализа.

Таблица 1

Гранулометрическая характеристика проб

Проба	Исходная		-1+0		-2+0	
Выход класса	Выход		Выход		Выход	
	грамм	%	грамм	%	грамм	%
+2	125.8	62.0	0	0	15	14.8
-2+1	37.2	18.3	24.5	24.4	39.6	39.0
-1+0,5	18.1	8.9	35.2	35.0	16.8	16.5
-0,5+0,250	9.7	4.8	14.6	14.5	8.4	8.3
-0,250+0,125	6.5	3.2	11.3	11.2	7.3	7.2
-0,125+0,071	2.7	1.3	4.8	4.8	3.8	3.7
-0,071+0,045	2.0	1.0	3.2	3.2	4.6	4.5
-0,045	1.0	0.5	6.9	6.9	6.1	6.0
Итого	203.0	100.0	100.5	100.0	101.6	100.0

Гранулометрический анализ показал, что материал проб после электрогидравлической обработки до классов крупности -2+0 и -1+0, различен по

характеру распределения по классам крупности. Так, по составу более крупнозернистая проба (-2+0) сохранила основную часть зерен в классах крупности более 0,5 мкм. При этом выход классов менее 0,125 мкм, где материал состоит из карбонатной мелкой массы, загрязняющий целевые минералы (берилл), в обоих пробах примерно одинаковый. В пробе крупностью -1+0 материал распределился в два основные класса -2+1 и -1+0,5, которые в сумме составили почти 60%. В обоих пробах все шламовые фракции отмечаются с класса крупности -0,125 мкм. Целевые минералы максимально загрязнены мелкими частицами карбонатных и отчасти глинистыми, создавая спресованные массы, которые переходят из класса в класс.

Минералогический анализ был проведен с помощью бинокуляра и оптического микроскопа по классам крупности. По итогам анализа составлена таблица раскрытия минеральных индивидов, в которой показана степень раскрытия по классам крупности (табл. 2).

Таблица 2

Раскрытие минеральных индивидов по классам крупности в исходной пробе и в пробах после обработки

Проба	Класс крупности	+2	-2+1	-1 +0. 5	-0.5 +0.250	-0.250 +0.125	-0.125 +0.071	-0.071 +0.045	-0.045	Итого
Исходная	выход	62	18.3	8.9	4.8	3.2	1.3	1	0.5	100
	раскрытие	63.00	79.00	83.00	88.00	97.00	97.00	99.00	99.00	70.98
-1+0	выход	0	24.4	35	14.5	11.2	4.8	3.2	6.9	100
	раскрытие	0	81.00	85.00	88.00	92.00	98.00	98.00	99.00	87.25
-2+0	выход	14.8	39	16.5	8.3	7.2	3.7	4.5	6	100
	раскрытие	79.00	80.00	82.00	85.00	90.00	92.00	98.00	99.00	83.71

Из данных табл. 2 следует, что в целом раскрытие минеральных составляющих в обоих пробах очень высокое по всем классам крупности, и практически равномерно увеличивается с уменьшением класса.

Заключение. Анализ результатов обработки проб с остальных месторождений позволил сделать по ним идентичные выводы. Это дает основание полагать, что технология энергосберегающей селективной дезинтеграции тонковкрапленных руд сложного минерального сырья, основанная на использовании электрогидравлического эффекта, имеет перспективы промышленного применения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Capilla A.V.* Thanatia: the Destiny of the Earth’s Mineral Resources. A Thermodynamic Cradle-to-Cradle Assessment / A.V. Capilla, A.V. Delgado // Singapore: World Scientific Publishing - 2015. – 672 p

2. *Sayne A.* Twelve Red Flags: Corruption Risks in the Award of Extractive Sector Licenses and Contracts / A. Sayne, A. Gillies, A. Watkins // New York: Natural Resource Governance Institute - 2017. – 56 p.

3. *Чантурия В.А.* Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья / В.А. Чантурия, А.П. Козлов // Материалы международной научной конференции «Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения - 2017)». Красноярск: Издательство Сибирского федерального университета - 2017. - С. 3–6.

4. *Ризун А.Р.* Разработка и внедрение электроразрядного процесса селективной дезинтеграции хвостов обогащения полиметаллических руд / А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк, А.Н. Рачков, В.Ю. Кононов // Наука та інновації - 2013. - Т.9. №2. - С. 5-9.

5. *Чантурия В.А.* Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья / В.А. Чантурия, Л.А. Вайсберг, А.П. Козлов // Обогащение руд - 2014. - №2. - С.3-9.
6. *Чантурия В.А.* Научное обоснование и разработка инновационных процессов комплексной переработки минерального сырья / В.А. Чантурия // Горный журнал - 2017. - №11. - С. 7–13.
7. *Шумская Е.Н.* Особенности технологии переработки полиметаллических руд / Е.Н. Шумская, О.Ю. Поперечникова, А.В. Купцова // Горный журнал - 2016. - №11. - С. 39–48.
8. *Мартынов Н.В.* Электрогидравлическая технология дезинтеграции алмазосодержащих пород / Н.В. Мартынов, В.Н. Добромиров, Д.В. Аврамов // Обогащение руд - 2020. - №1(385). - С.8-14.
9. *Саденова К.К.* Электрогидроимпульсный способ измельчения волластонитовый руды / К.К. Саденова, Н.Н. Шуюшбаева, Н.К. Танашева, Б.Б. Кутум, А.Ж. Тлеубергенова // Молодой ученый - 2015. - №19.
10. *Юткин Л.А.* Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л.А. Юткин // Л.: Машиностроение, Ленинградское отд-ние - 1986. - 263 с.
11. *Ризун А.Р.* Разработка и внедрение электроразрядного процесса дезинтеграции металлургического кремния / А.Р. Ризун, В.М. Косенков, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк // Наука та іновації - 2010. - №6. - С. 25-30.
12. *Шамко В.В.* Исследование некоторых характеристик канала подводной искры в основной стадии развития разряда / В.В. Шамко, Е.В. Кривицкий // Журнал технической физики - 1997. - №47(1). - С. 93-101.
13. *Хаят М.Б.* Разработка эмпирических зависимостей оценки предела прочности пород на одноосное сжатие с помощью неразрушающих методов контроля / М.Б. Хаят, Д. Али, Ю.А. Рехман, А. Салим, Н. Мустафа // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых - 2019. - №6. - С. 25-34.
14. *Ефимов В.П.* Особенности разрушения образцов хрупких горных пород при одноосном сжатии с учетом характеристик зерен / В.П. Ефимов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых - 2018. - №2. - С. 18-25.

УДК 621.791

БЛАНК Е.Д.,
АЛЕКСАНДРОВ Н.В.,
ШАРАПОВ М.Г.
НИЦ «Курчатовский институт» -
ЦНИИ КМ «Прометей»
ШАРАПОВА Д.М.
Санкт-Петербургский горный университет

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ТИПА АБ2

Аннотация. Разработана технология электронно-лучевой сварки деталей из сталей типа АБ. Выполнены исследования сварных соединений. Показано, что технология обеспечивает нормативный уровень требований к прочности сварных соединений при -60ºС. Выпущена технологическая документация на сварку хладостойких сталей типа АБ2-2 в толщинах от 10 до 150 мм. Технология ЭЛС внедрена при изготовлении деталей машиностроения.

Ключевые слова: хладостойкие стали, электронно-лучевая сварка, технология, прочностные свойства.

BLANK E.D.,
ALEKSANDROV N.V.,
SHARAPOV M.G.
NRC “Kurchatov Institute” -
CRISM “Prometey”
SHARAPOVA D.M.
Saint-Petersburg Mining University

RESEARCH OF FORMATION AND STRUCTURE OF THE WELD METAL IN ELECTRON BEAM WELDING OF COLD-RESISTANT STEELS

Abstract. The technology of electron beam welding of details made of steel type АБ has been developed. Welded joint have studied. It is shown that the technology provides a standard level of requirements for the strength of welded joints at -60 °C. The technological documentation for the welding of cold-resistant steels of the АБ2-2 type in thicknesses from 10 to 150 mm has been issued. Electron beam welding technology is introduced in the manufacture of mechanical engineering parts.

Keywords: cold-resistant steels, electron beam welding, technology, strength properties.

В работе представлены результаты исследований технологической свариваемости при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) стали АБ2-2 применительно к изготовлению деталей для нефтедобывающих платформ, которые по завершении обеспечили успешную разработку и внедрение технологии ЭЛС. Особенности технологии были определены возможностями ЭЛС [1, 2]. В исследованиях использовались полуфабрикаты в толщинах до 150 мм; при сварке больших толщин предусматривалось применение присадочной проволоки [3].

Для подтверждения возможности успешного выполнения работы были подготовлены контрольные пробы, форма и размеры которых полностью отвечали

условиям изготовления штатных изделий и были согласованы со специалистами ОАО ПО «Севмаш». Вырезанные из проб образцы были подвергнуты исследованиям в испытательных лабораториях «Судатомэнерготест» и «Промтест КМ» [4], которые функционируют при «ЦНИИ КМ «Прометей» и аккредитованы в системе Госстандарта России.

Известно, что детали из низколегированной стали могут иметь остаточную намагниченность [5,6]. В процессе исследований было показано, что при ЭЛС остаточная намагниченность на деталях толщиной до 30мм не проявляется. Размагничивание металла больших толщин производилось по методике ОАО ПО «Севмаш». Для этих целей был изготовлен специальный стенд.

Разработка технологии сварки велась в «ЦНИИ КМ «Прометей» на установке ЭЛУ-20Б. При разработке технологии учитывалось, что форма проплавления при ЭЛС является одним из ведущих факторов, определяющих качество сварных соединений [7], что определяет необходимость контроля процесса формирования сварного шва, в первую очередь при сварке со сквозным проплавлением [8]. На основании детальных исследований процесса формирования швов при сварке полуфабрикатов различной толщины были определены конструктивные элементы и вид разделки кромок деталей, режимы и приемы сварки, гарантирующие полный провар стыка и отсутствие дефектов в металле шва.

Основной интерес для исследований представляла сварка стали марки АБ2-2. При металлографическом контроле и исследовании микрошлифов недопустимых дефектов в соединениях, включая зону термического влияния, не было обнаружено.

Металл полуфабрикатов стали АБ2-2 толщиной 100мм (основной металл), как показали металлографические исследования имеет отпущенную высокодисперсную бейнитную структуру, включающую незначительное содержание мартенсита. Структура этой стали в зоне термического влияния, образующейся после охлаждения, также представляет собой бейнит, но мере приближения к участку сплавления укрупняется и в ней растет количество мартенсита. Металл шва в результате переплава имеет литую структуру. У границы сплавления формируется зона направленной кристаллизации со следами дендритной ликвации. В связи с большими скоростями охлаждения структура металла в данной зоне шва представляет собой мартенсит. В центре шва скорость теплоотвода уменьшается, зерна становятся равноосными, наблюдаемая структура состоит в основном из мартенсита и нижнего бейнита. Форма проплавления и размеры различных участков в металле шва и зоны термического влияния определяются режимами сварки.

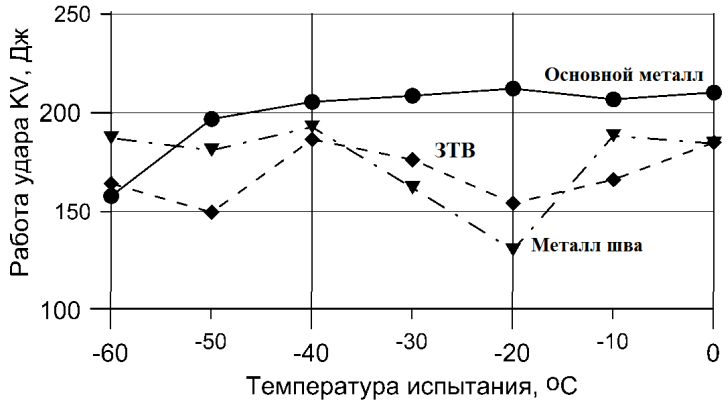


Рисунок 1 – Работа удара металла различных зон сварного соединения в зависимости от температуры испытаний, сталь марки АБ2-2, толщина 100 мм

Для оценки возможностей применения электронно-лучевых технологий для изделий, эксплуатируемых в условиях Арктики, были проведены испытания образцов

Шарпи при температурах в диапазоне от 0 ^{o}C до -60 ^{o}C. На рис. 1 представлены результаты испытаний металла проб толщиной 100 мм. Полученные значения работы удара сравнивались с требованиями Российского морского регистра Судоходства к сталям для конструкций, эксплуатируемых в условиях низких температур (78 Дж при температуре испытаний: - 60 °С).

В результате проведенных испытаний установлено, что электронно-лучевые технологии при производстве изделий из сталей АБ2-2 позволяют получить качественную продукцию с высокой вязкостью металла при минус 60 °С во всех зонах соединения, в том числе в зоне термического влияния, где результаты испытаний образцов Шарпи в два-три раза превзошли нормативные требования.

В результате исследований показано, что технически реализовать технологию ЭЛС возможно на стали АБ2-2 в толщинах до 150 мм [4]. Разработано несколько вариантов технологии ЭЛС: сварка за один проход без разделки кромок (в толщинах до 60 мм); двухсторонняя сварка без разделки кромок (от 60 до 100 мм); двухсторонняя сварка с разделкой кромок и присадкой (от 100 до 150 мм).

Полученные результаты позволили обосновать перспективность применения электронно-лучевых технологий для производства деталей и изделий, использующихся в условиях Арктики (рис. 2).

Рисунок 2 – Детали, на которых была произведена апробация разработанной технологии

По итогам исследований с учетом результатов был разработан и выпущен руководящий документ "Электронно-лучевая сварка изделий машиностроения из различных материалов. Технологическая инструкция». Документ регламентирует применение электронно-лучевых технологий в производстве деталей и изделий из низколегированных хладостойких сталей типа АБ2-2 в толщинах от 10 до 150 мм и согласована с ОАО ПО «Севмаш». Новизна разработки защищена двумя патентами [9,10].

Внедрение разработанной технологии позволяет значительно улучшить рабочие характеристики и ресурс изделий и металлоконструкций при эксплуатации в условиях арктического климата.

Результаты исследований были включены в материалы конкурсной работы, представленной авторским коллективом НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» совместно с ОАО ПО «Севмаш» в 2019 г. на конкурс научно-практических работ, направленных на освоение Арктики, где она получила достойную оценку (Первая премия).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Назаренко О.К.* Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Ковбасенко и др. Под ред. Б.Е.Патона. – Киев: Наукова думка, 1987. - 256 с.

2. *Башенко В.В.* Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки / В.В. Башенко, В.Б. Вихман, А.Н. Козлов, И.С. Гайдукова // В кн. «Технологии и оборудование

ЭЛС-2008».- СПб. - 2008. - С. 5-21.
3. *Александров Н.В.* Разработка технологии электронно-лучевой сварки конструкций из хладостойких сталей / Н.В. Александров, С.Н. Курта, Н.В. Вовченко и др. // Вопросы материаловедения. - 2015. - №1(81). - С. 171-178.
4. *Назаренко О.К.* Отклонение пучка электронов при электронно-лучевой сварке / О.К. Назаренко // Автоматическая сварка. - 1982. - №1. - С. 8-15.
5. *Драгунов В.К.* Методы определения отклонения электронного пучка при сварке намагниченных деталей / В.К. Драгунов // Сварочное производство. - 2002. - №9. - С.15-18.
6. *Ластовиря В.Н.* Принципы управления формой проплава в технологическом процессе электронно-лучевой сварки / В.Н. Ластовиря // Машиностроение и инженерное образование. - 2008. - №3(16). - С. 12-21.
7. *Беленький В.Я.* Некоторые аспекты контроля процесса формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, А.В. Шварев // Сварка и диагностика. - 2010. - № 1. - С. 41-43.

УДК 621

БОРИСОВА Л.Г.
Санкт-петербургский горный университет,
кафедра материаловедения и технологии
художественных изделий

ПРОИЗВОДСТВО КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Достоинством предлагаемой технологии по сравнению с известными технологиями производства пеностекла является исключение крайне дорогостоящих операций по производству стекла специального состава и его помолу до микронной фракции.

Ключевые слова: стеклокерамика; пеностеклокерамика; композитные материалы; химическая активность; введение порошкообразных руд металлов; гранулирование и стеклование при обжиге; дробление шихты; метод прессования.

BORISOVA L.G.
Saint-Petersburg Mining University

PRODUCTION OF STRUCTURAL MATERIALS

Abstract. Advantage of proposed technology compared to known technologies of foam glass production is exclusion of extremely expensive operations for production of glass of special composition and its grinding to micron fraction.

Keywords: glass ceramics; penosteklokeramika; composite materials; chemical activity; Introduction of powdered metal ores; Granulation and glazing during firing; furnace charge crushing; pressing method.

Технология, позволяющая производить различные высококачественные строительные материалы от лёгких теплоизоляционных, до высокопрочных конструкционных, путём использования широко распространенных кремнистых пород (диатомит, опока, трепел, цеолит и т.п.), а также отходов промышленного производства – микрокремнезема, различных шлаков, отвалов и щёлочи в качестве активной добавки [2]. Технология позволяет получать следующие виды продукции – ситаллы, керамику, стеклокерамику, стекло, пеностеклокерамику, пеностекло и композитные материалы в виде плит, блоков, гранул и т.п. ГРАСТЕК – это материалы для различных отраслей промышленности, например, заменители чугуна и бронзы для машиностроения путём введения порошкообразных руд металлов или материалы с заданными электротехническими, магнитными или антифрикционными свойствами. Полученные материалы можно точить, сверлить, фрезеровать и шлифовать [1].

Данный способ основан на более высокой химической активности аморфного кремнезёма по сравнению с его кристаллической формой. Данная технология позволяет эффективно решить проблему утилизации отходов мусоросжигающих заводов, химических производств, отходов атомной промышленности путём их смешивания с обработанной кремнистой породой, гранулирования и стеклования при обжиге [2].

На основе технологии возможно получение традиционных материалов с применением местного сырья, например, производство кирпича или блоков из кремнистой породы с использованием в качестве заполнителя мелкозернистых барханных загрязнённых песков пустынь (до 70% по массе). Производство теплоизоляционных и

конструкционно-теплоизоляционных поризованных материалов «ГРАСТЕК» в виде плит и блоков (пеностеклокерамика, пеностекло) [3]. Основные технологические операции: подготовка сырья, смешение со щелочью, сушка полученной смеси (шихты), дробление шихты, засыпка дробленой шихты в формы или на полотно конвейера, обжиг [2]. Общая длительность технологического процесса от добычи сырья до получения готовой продукции составляет 6-12 часов (без учета времени охлаждения).

Получаемая продукция – плиты или блоки. Максимальный размер полученных изделий на имеющемся оборудовании (L, B, H) 1200×600×400 мм. По предлагаемой технологии операция обжига производится при температуре 650-850 градусов [5]. Стеновые блоки из конструкционно-теплоизоляционной пеностеклокерамики могут использоваться в качестве самонесущего конструкционно-теплоизоляционного материала в многоэтажном жилищном и промышленном строительстве, а стеновые блоки – в качестве несущего конструкционно-теплоизоляционного материала в малоэтажном (до 3 этажей) домостроении [4].

Кроме того, «ГРАСТЕК» обладает минимальным водопоглощением в 1,5-2% по объему против ячеистых бетонов, имеющих водопоглощение в размере 25-35%, и не имеет усадки в процессе эксплуатации. Производство конструкционных материалов «ГРАСТЕК» (аналог клинкерного кирпича и плитки в виде керамики, стеклокерамики, ситаллов) [1]. Основные технологические операции: подготовка сырья, смешение со щелочью, сушка полученной смеси (шихты), дробление шихты, формование изделий методом прессования на гидравлических или коленорычажных прессах, обжиг [2]. Общая длительность технологического процесса от добычи сырья до получения готовой продукции составляет 6-24 часов (без учета времени охлаждения). Время охлаждения зависит от геометрических размеров получаемой продукции – чем больше размер получаемой продукции, тем больше время охлаждения [4].

Достоинством предлагаемой технологии по сравнению с известными технологиями производства пеностекла является исключение крайне дорогостоящих операций по производству стекла специального состава и его помолу до микронной фракции [1]. Также исключены дополнительные операции автоклавного получения жидкого стекла из кварцевого песка или трепела.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пачурин Г.В.* Структура и свойства неметаллических материалов: Учебное пособие / Г.В. Пачурин, Т.А. Горшкова и др.; под общ. ред. Г.В. Пачурина. - М.: Форум: НИЦ ИНФРА-М, 2015.
2. *Мельников В.Н.* Материаловедение и технологии современных и перспективных неметаллических материалов: учебное пособие. - Екатеринбург: УрФУ., 2013.
3. *Солнцев Ю.П.* Специальные материалы в машиностроении / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, В.Ю. Пирайнен. - СПб.: Химиздат, 2004.
4. *Солнцев Ю.П.* Материалы для низких и криогенных температур: энциклопедический справочник / Ю.П. Солнцев, Б.С. Ермаков, О.И. Слепцов. - СПб.: Химиздат, 2008.
5. Конструкционные материалы: Справочник / Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. - М.: Машиностроение, 1990.

УДК 67.03

ВАСИНКИНА Е.Ю.,
КАДЫКОВА Ю.А.,
КАЛГАНОВА С.Г.,
АРЗАМАСЦЕВ С.В.
СГТУ имени Гагарина Ю.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРНОЙ БАЗАЛЬТОВОЙ ПОРОДЫ ДЛЯ НАПОЛНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Изучена перспективность и целесообразность использования магматической горной породы для получения базальтонаполненных композитов. Для измельченного базальта с размером частиц ≤ 140 мкм характерно наличие агломерации частиц, что может свидетельствовать о высокой активности их поверхности. Анализ характеристик удельной поверхности базальтового наполнителя позволяет предположить активный характер его влияния на структуру и свойства базальтонаполненных композиционных материалов.

Ключевые слова: измельченный базальт, полимерные композиционные материалы, оптическая микроскопия, ИК-спектр, удельная поверхность базальтовых частиц.

VASILKINA E.Y.,
KADYKOVA Y.A.,
KALGANOVA S.G.,
ARZAMASTSEV S.V.
Gagarin State Technical University

THE RESEARCH OF POSSIBILITY OF USE OF MINING BASALT-RELATED ROCKS FOR FILLING IN POLYMER MATERIALS

Abstract. The prospects and feasibility of using igneous rock to produce basalt-filled composites have been studied. Crushed basalt with a particle size of ≤ 140 microns is characterized by the presence of agglomeration of particles, which may indicate a high activity of their surface. Analysis of the characteristics of the specific surface of basalt filler suggests the active nature of its influence on the structure and properties of basalt-filled composite materials.

Keywords: crushed basalt, polymer composite materials, optical microscopy, infrared spectrum, specific surface of basalt particles.

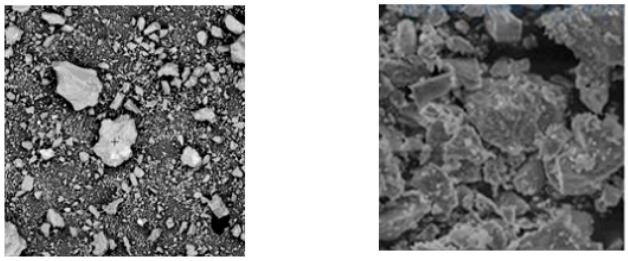
Базальт – порода вулканического происхождения, образованная в виде базальтовых лав, которую используют как сырье для щебня, производства базальтового волокна, каменного литья и кислотоупорного порошка, а также в качестве наполнителя для бетона. Базальт имеет много преимуществ, наиболее значимые: отличные шумопоглощаемые свойства; высокий уровень паропроницаемости; устойчив, к высоким температурам; экологичен и безопасен для здоровья людей; имеет высокую прочность; сохраняет тепло; хорошие пожаробезопасные свойства; не электролизуется; не имеет срока годности – долговечен.

Поэтому для повышения свойств полимерных композиционных материалов, актуальным является изучение возможности использования измельченного базальта для наполнения данных композитов.

Перед использованием в качестве наполнителя базальтового щебня он измельчался на шаровой мельнице в течение 3 часов при 50 об/мин [1].

Отношение массы мелющих агентов к массе измельчаемого материала составило 8. После помола для удаления неразмолотых частиц базальт просеивали через набор стандартных сит диаметром отверстий от 40 до 140 мкм.

Частицы базальта после измельчения имеют нерегулярную форму (рис. 1), являются полифракционными (рис. 2), причем отмечены большее содержание частиц со средним размером ~ 50 мкм. Из рис. 1 следует наличие агломерации частиц, что может свидетельствовать о высокой активности их поверхности, что не противоречит литературным данным [2]. В данных исследованиях использовали частицы с размером ≤ 140 мкм.



X240 X5000

Рисунок 1 - Данные электронной микроскопии частиц базальта при различных увеличениях

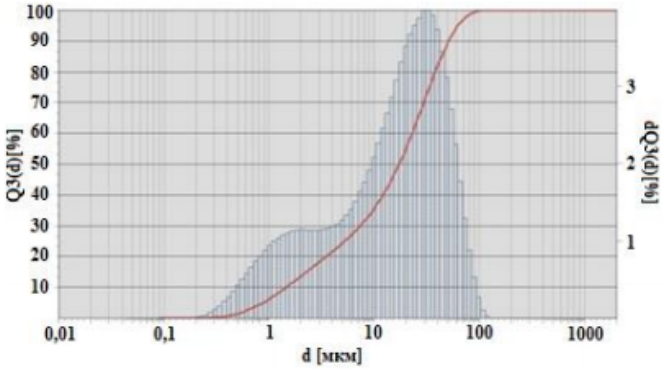


Рисунок 2 - Гранулометрический состав измельченного базальта

Основными компонентами используемого в исследовании базальта являются: оксиды кремния (до 47,5%), алюминия (до 11,4%), магния (до 16,4%), кальция (до 9,2%), железа (до 10,4%) и др. [3].

На ИК-спектре базальта (рис. 3) имеется полоса поглощения (3409 $см^{-1}$) валентных колебаний адсорбированных молекул воды в составе Si-OH [4] и молекул свободной воды, находящихся в порах. Отмечено слабое колебание при 2340 $см^{-1}$, которое соответствует колебаниям OH-групп входящих в состав анионов $[O_3Si\text{-}OH]^{3-}$. Очень малая относительная интенсивность этого максимума указывает на низкую степень гидратации поверхности базальта. Максимумы при 1825, 1650 $см^{-1}$ свидетельствуют о валентных колебаниях связи Si-O, а при 1520, 1466 $см^{-1}$ – о деформационных колебаниях OH-групп. Широкая интенсивная полоса с максимумом при 1145 $см^{-1}$ соответствует валентным колебаниям связи Si-OH и -Si-O-Si-. Очень слабый максимум при 800 $см^{-1}$ обусловлен валентными колебаниями связи Si-O, при 752 $см^{-1}$ - колебаниями связи Al-O. Очень слабый максимум при 700 $см^{-1}$ отражает валентные колебания vscвязи -Fe-O- [5]. Несмотря на содержание по ИКспектрам OH-групп, содержание влаги в базальте составляет менее 2 %, поэтому предварительной сушки наполнителя перед введением в матрицу не требуется.

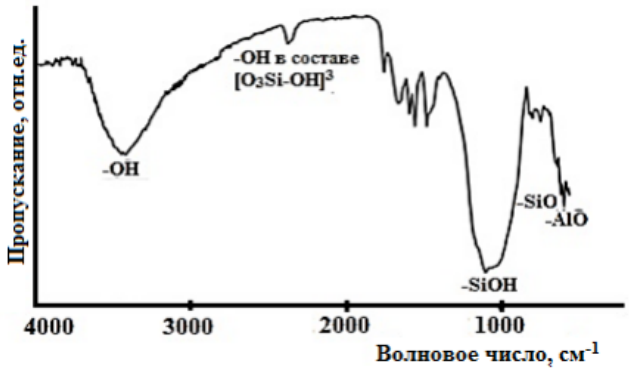


Рисунок 3 - Данные ИКС для базальта

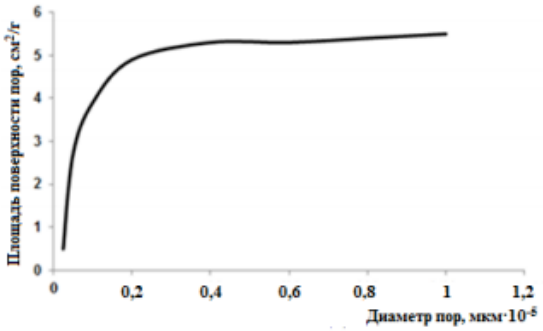


Рисунок 4 - Интегральная кривая зависимости площади внутренней поверхности пор базальта от их диаметра

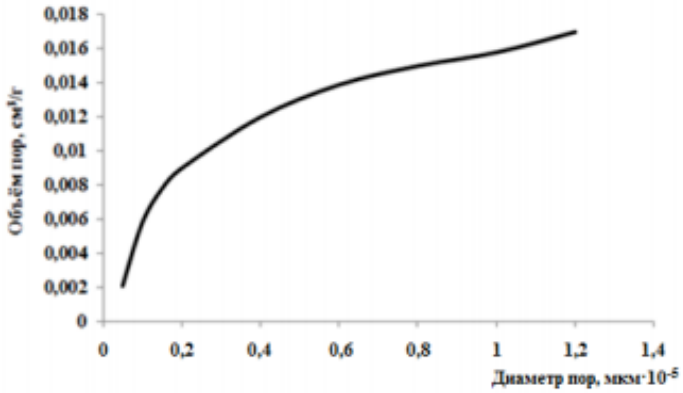


Рисунок 5 - Интегральная кривая зависимости объема пор измельченного базальта от их диаметра

Возможность взаимодействия наполнителей с матрицей достигается при наличии в наполнителе внутреннего объема пор, обеспечивающего проникновение связующего в наполнитель. Различают общую $S_{об}$, внутреннюю $S_{вн}$ и геометрическую $S_г$ поверхности наполнителя. Общая удельная поверхность частиц измельченного базальта, определенная методом низкотемпературной сорбции азота, от размера частиц существенно не зависит.

Площадь поверхности пор дисперсного базальта относительно высокая и составляет свыше 5 $см^2/г$ (рис. 4), а объем пор достигает 0,016 $см^3/г$ (рис. 5).

Эти показатели с увеличением диаметра пор незначительно увеличиваются.

Анализ дифференциальных кривых зависимости площади поверхности пор показывает наличие в составе базальта в основном мезопор с площадью поверхности от 0,2 до 0,45 мкм (рис. 6).

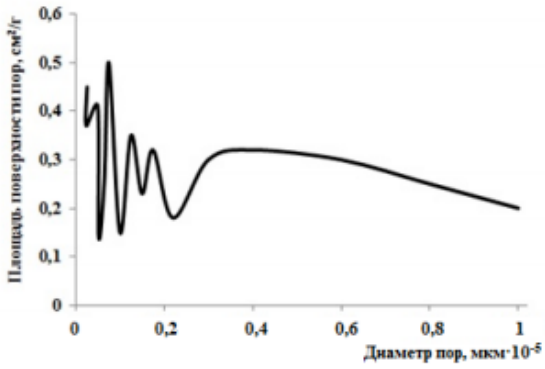


Рисунок 6 - Дифференциальная кривая зависимости площади поверхности пор от их диаметра для измельченного базальта

Анализ характеристик удельной поверхности базальтового наполнителя позволяет предположить активный характер его влияния на структуру и свойства базальтонаполненных композиционных материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арзамасцев С.В.* Закономерности технологии базальто- и фосфогипсонаполненных полимерных композиционных материалов: дис. д-ра. техн. наук: 05.17.06. - Саратов, 2011. - 338 с.
2. Изучение степени измельчения и гранулометрического состава материалов, используемых в химической технологии: методические рекомендации / Л.Г. Панова, Н.Л. Левкина, Ю.А. Кадыкова, О.М. Сладков. – Энгельс, 2012. - 12 с.
3. *Джигирис Д.Д.* Основы производства базальтовых волокон и изделий / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова. - М.: Теплоэнергетика, 2002. - 416 с.
4. *Буря А.И.* ИК-спектральный анализ самоармированных органопластиков / А.И. Буря, С.П. Сучилина-Соколенко // Технические науки и технологии. - 2017. - №1. - С. 207-216.
5. *Вернигорова В.Н.* Современные методы исследования свойств строительных материалов: учеб. пособие. - М.: АСВ, 2003. - 240 с.

УДК 621

ВИНТЕР Э.Р.,
ТИМОФЕЕВ В.Н.,
ПЕРВУХИН М.В.
Сибирский федеральный университет

ТЕХНОЛОГИЯ И УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНДУКЦИОННОГО РАФИНИРОВАНИЯ РАСПЛАВА В ЛИТЕЙНОМ ЖЕЛОБЕ

Аннотация. В работе рассмотрено устройство для электромагнитного рафинирования алюминиевыого расплава в литейном желобе. С помощью численного моеделирвоания проведен анализ распределения объемных электромагнитных сил в расплаве. Преведена оценка предельной скорости миграции частицы в различных точках желоба. Определена величина плотности тока для эффективного удаления примесей различного диаметра.

Ключевые слова: электромагнитное рафинирование; рафинирование сплавов; сила Лоренца.

VINTER E.R.,
TIMOFEEV V.N.,
PERVUKHIN M.V.
Siberian Federal University

TECHNOLOGY AND DEVICE OF ELECTROMAGNETIC CONDUCTION MELT REFINING IN CASTING LINE

Abstract.A device for electromagnetic refining of aluminum melt in a casting line is considered in thispaper. The distribution of bulk electromagnetic forces in the melt is analyzed by using numerical modeling. Estimation of the terminal velocity of particle migration at various points of the cross-section of the melt is made.Current density value for the effective removal of impurities of various diameters is determined.

Keywords:electromagnetic refining; alloy refining; Lorentz force.

Введение. В настоящее время область применения металлургической продукции из алюминиевых сплавов интенсивно расширяется. Так алюминий сегодня находит широкое применение в авиастроительной и судостроительной отраслях, а в последние годы расширяется его применение в области аддитивных технологий [1].

При производстве алюминиевых сплавов из-за технологических особенностей производства, расплавленный металл загрязняется твердыми и газовыми примесями [2]. В свою очередь, присутствующие в расплаве алюминия газовые и твердые включения образуют в слитках дефекты различного вида, которые негативно влияют на свойства получаемых слитков и более того, могут приводить к браку продукции. Таким образом одной из важнейших и необходимых технологических операций при производстве алюминия является рафинирование.

В современной металлургии широко распространены методы рафинирования основанные на принципах флотации, вакуумировании [3] и ультразвуковой кавитации [4]. Другим перспективным способом очистки расплава является электромагнитное рафинирование [5], в физической основе которого лежит вытеснение инородной частицы из объема расплава под действием объемной электромагнитной силы. Основными преимуществами электромагнитного рафинирования следует выделить:

- Эффективность очистки, так как величина проработки зависит только от разницы проводимостей металла и примеси и не зависит от плотности, химического состава и фазового состояния примеси [5],

- Экологичность, так как не требуется ввода в расплав активных компонентов,

- Исключение загрязнения расплава частицами рабочего органа,

- Простота в управлении, так как направление и величину выталкивающей силы можно контролировать, изменяя направление и амплитуду электрического и магнитного полей.

Параметры расчетной области. Эскиз расчетной области показан на рис. 1. Расчетная область включает в себя алюминиевый расплав 1 и токоподводящий блок, который состоит из углеграфитового блока 2, стального блюмса 3 и литого чугуна 4, который обеспечивает электрический контакт между графитовым блоком и стальным блюмсом. Также данные элементы окружает расчетная область со свойствами вакуума (воздуха), границы которой ограничены краями параллелепипеда. Расчетная область симметрична относительно оси x, таким образом возможно ограничиться решением ½ части модели.

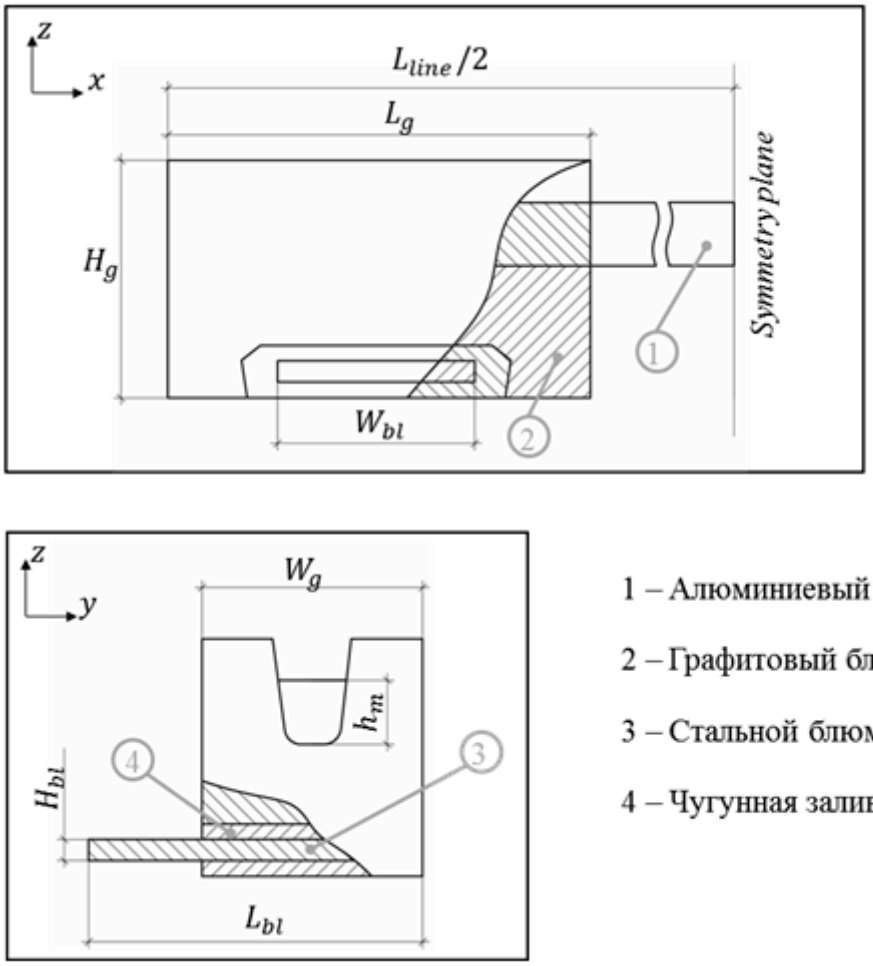


Рисунок 1 – Геометрия расчетной области системы «Токоподвод-расплав»

Основные геометрические параметры математической модели представлены в табл. 1. Другие геометрические размеры находятся в параметрической зависимости от основных.

Результаты и обсуждение. На рис. 2 показано векторное распределение электромагнитных сил в продольном сечении расплава. Исходя и распределения электромагнитных сил условно область расплава можно разделить три зоны. Зона отсутствия МГД-эффектов – входная часть желоба, захватывающий также некоторый

участок контакта расплава с электродом. В данной зоне величина плотности тока минимальная, а, следовательно, следует ожидать транзитного течения вдоль длины желоба, которое задается массовым расходом.

Таблица 1.

Основные геометрические параметры математической модели

Параметр	Значение [м]
Длина литейной линии L_{line}	1
Длина графитового блока L_g	0,240
Высота графитового блока H_g	0,135
Ширина графитового блока W_g	0,125
Длина стального блюмса L_{bl}	0,24
Высота стального блюмса H_{bl}	0,012
Ширина стального блюмса W_{bl}	0,12
Высота расплава в желлобе h_m	0,02; 0,025; 0,03

Зона вихревых течений – область, располагающаяся между зоной отсутствия электромагнитных сил и зоной, где их распределение имеет равномерный радиальный характер. Так как в этой зоне распределение электромагнитных сил по длине и радиусу неравномерно, то, следовательно, ротор поля электромагнитных сил отличен от нуля $rot(f_{em}) \neq 0$. Таким образом, электромагнитная сила в данной области имеет вихревой характер, что является причиной возникновения вихревых, и в некоторых случаях турбулентных течений расплава.

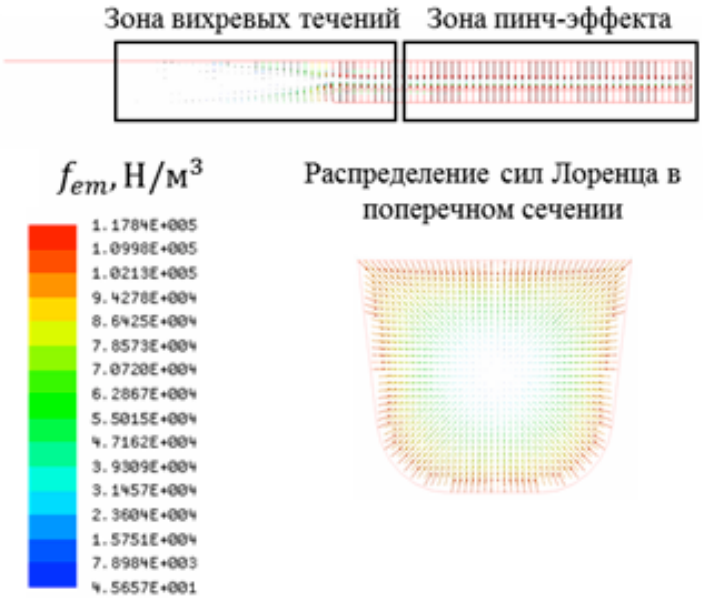


Рисунок 2 – Распределение сил лоренца в расплаве

Третья область – зона образования пинч-эффекта. В данной области распределение электромагнитных сил имеет равномерный характер, в котором преобладает радиальная составляющая сил. Ротор такого поля векторных сил минимален, таким образом, в данной области следует ожидать слабоинтенсивных вихревых течений. Однако потенциальная часть электромагнитной силы будет выражаться электромагнитным давлением, сдавливающим расплав в радиальном направлении.

Исходя распределения электромагнитных сил на рисунке, частицы поступая в литейный желоб под действием массового расхода будут вовлекаться в область образования вихревых течений. При дальнейшей миграции вдоль длины желоба частицы попадают в область действия пинч-эффекта. В данной области на частицу будет

действовать электромагнитная сила, которая определяется согласно выражению [6]:

$$f_{em}^{p} = -\frac{3}{4}\frac{\pi d_p^3}{6} f_{em},$$

где d_p – диаметр частицы; f_{em} – объемная электромагнитная сила Лоренца.

Таким образом при достаточной величине электромагнитных сил дальнейшая миграция частиц будет происходить в направлении стенок желоба и поверхности металла. Для оценки скорости миграции примесей воспользуемся формулой Стокса для расчета предельной скорости частицы, в предположении о малых числах Рейнольдса и с учетом силы тяжести имеем [7]:

$$v_{t_{x,y}} = \frac{d_p^2}{18\mu} 0.75 f_{em_{x,y}};\ v_{t_z} = \frac{d_p^2}{18\mu}\left[\left(\rho_p - \rho_{fl}\right) g + 0.75 f_{em_z}\right],$$

где μ – динамическая вязкость жидкого металла; ρ_p, ρ_{fl} – плотность жилкого металла и частицы соответственно.

На рис. 3 показана цветовая и векторная карта предельных скоростей для частицы 25 μm в поперечном сечении расплава. Направление векторов определяет направление миграции частицы в различных точках расплава. Видно, что при интегральном значении тока 3000 А через скорости миграции могут достигать 2 мм/с и выше. При данных скоростях миграции частица достигнет поверхности примерно за 5-10 секунд. Очевидно, что более крупные примеси будут мигрировать более интенсивно, так как предельная скорость находится в квадратичной зависимости от диаметра частицы.

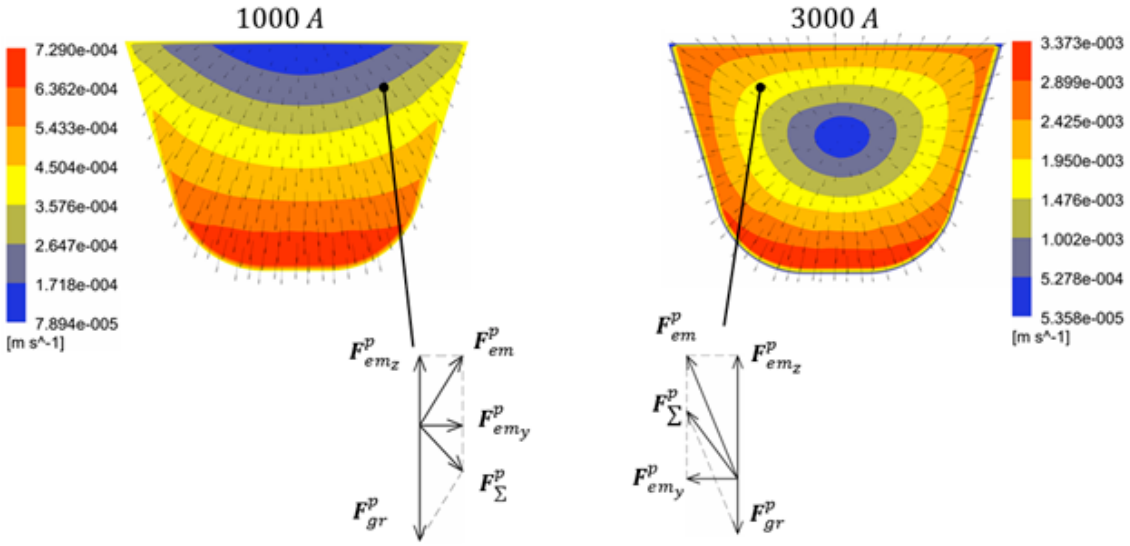


Рисунок 3 – Цветовая и векторная карта скорости миграции частицы диаметром 25 мкм в поперечном сечении расплава

Для анализа влияния различных параметров на скорости миграции частицы, было взято две точки в поперечном сечении расплава, как показано на рис. 4

На рис. 5 изображены графики зависимости предельной скорости миграции частиц от их диаметра в точках 1 и 2. Из графиков можно сделать вывод, что для эффективного удаления частиц диаметром менее 20 мкм необходимо обеспечивать плотность тока в расплаве более чем $10^7 А/м^2$, что в данной конструкции будет чревато сильным проявлением пинч-эффектом и пережатием металла. Тем не менее следует ожидать, что даже примеси мелкой фракции (< 20 мкм) с течением некоторого времени будут также вытесняться, из-за значительной длины участка рафинирования (0,52 м). Частицы же диаметром более 20 мкм могут эффективно удаляться при значениях плотности тока в расплаве порядка $(3-5)\cdot 10^6 А/м^2$.

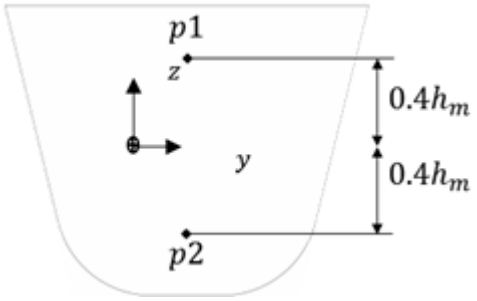


Рисунок 4 – Точки исследования параметров на величину скорости миграции

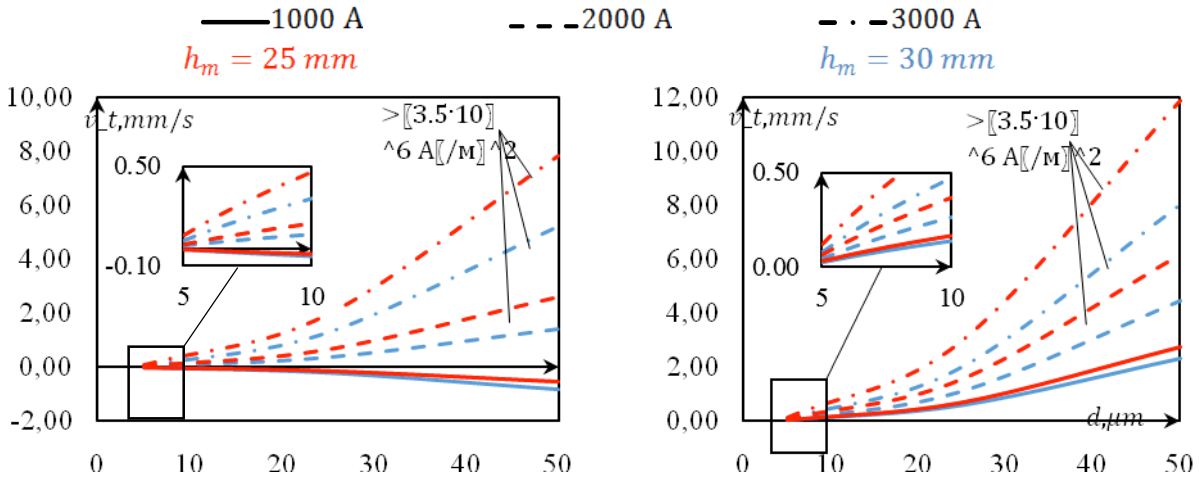


Рисунок 5 – График зависимости предельной скорости миграции от диаметра частицы в точке *p1* (слева) и точке *p2* (справа)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kenzari S.* Additive manufacturing of lightweight, fully Al-based components using quasicrystals / S. Kenzari, D. Bonina, J.-M. Dubois, V. Fournée // Journal of Materials Processing Technology. - 2014. - 214 (12). - p. 3108–3111.
2. *Schlesinger M.* Aluminum recycling. CRC press. - 2013.
3. *Zhang L.* Removal of Impurity Elements from Molten Aluminum: A Review / L. Zhang, X. Lv, A. Torgerson, M. Long // Journal Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. - 2011. - 32(3). - p. 150-228.
4. *Eskin D.G.* Ultrasonic processing of molten and solidifying aluminium alloys: overview and outlook Materials Science and Technology. - 2017. - 33(6). - p. 636-645.
5. *Zhang L.* Application of electromagnetic (EM) separation technology to metal refining processes: a review / L. Zhang et al. // Metallurgical and Materials Transactions B. - 2014. - 45(6). - p. 2153-2185.
6. *Lennov D.* Theory of electromagnetophoresis. I. Magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles / D. Lennov, A. Kolin // Journal of Chemical Physics. - 1954. - 22 (4). - p. 683–689.
7. *Zhenming X.* Elimination of Fe in Al-Si cast alloy scrap by electromagnetic filtration / X. Zhenming, L. Tianxiao, Z. Yaohe // Journal of materials science. -2003. - 38(22). - p. 4557-4565.

УДК 62.97+621.9.048.7+621.795+621.373.8

ГАНЗУЛЕНКО О.Ю.,
ПЕТКОВА А.П.
Санкт-Петербургский горный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АПРОБАЦИЯ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Статья посвящена вопросам моделирования технологического процессамаркировки на поверхности металлических изделий посредством импульсного лазера. Приведенная математическая модель позволяет подбирать оптимальные технологические параметры лазерного маркировочного комплекса для формирования на поверхности изделий из сталей и сплавов различного химического состава желаемые маркировочные символы, учитывая физические свойства маркируемого материала. Разработанные технологические режимы прошли апробацию и рекомендованы для применениях различных отраслях промышленности, таких как машиностроение, автомобилестроение, авиастроение и железнодорожный транспорт, а также для широкого применения маркировки серийных изделий из металлических материалов.

Ключевые слова: маркировка, импульсный лазер, параметры процесса, математическая модель, оксидная пленка.

GANZULENKO O.Y.,
PETKOVA A.P.
Saint-Petersburg Mining University

SIMULATION AND APPROBATION OF THE MARKING LASER PROCESS ON METAL MATERIALS

Abstract. The article is devoted to the technological process modeling of marking on the surface of metal products using a pulsed laser. The described mathematical model allows us to select the optimal technological parameters of the laser marking complex in order to form the desired marking symbols on the surface of steel and alloy products with various chemical composition, taking into account the physical properties of the marked material. The developed technological regimes have been tested and recommended for industrial applications in various industries, such as engineering, automotive, aircraft manufacturing and railway transport, as well as for the widespread usage of marking serial products from metal materials.

Keywords: marking, pulsed laser, process perameters, mathematical model, oxide film.

Лазерная маркировка в промышленности широко используется для нанесения информации об изделии и его идентификации на протяжении всего жизненного цикла. В то же время такой способ нанесения маркировочных символов является современным технологическим процессом и особенно актуально его применение для металлической продукции изделий машиностроения и автомобилестроения. Нанесенная таким способом маркировка обладает высоким разрешением и будет весьма долговечна. Возможность получать многоцветные изображения посредством лазерной обработки металлических материалов определяется особенностями процессов, происходящих на поверхности металлов и технологичностью данного метода, обладающего исключительно высокой гибкостью, поскольку лазерным лучом можно управлять во времени и в пространстве, а также достаточно точно дозировать и регулировать энергию излучения [1, 2]. Но далеко

не всегда возможно воспроизвести желаемый цвет и требуемую читаемость маркировочного символа на поверхности металлического изделия, следуя инструкциям и предлагаемым режимам производителя лазерного маркировочного комплекса. На качество маркировки будет влиять множество факторов, основные их которых принимаются для расчета в представляемой математической модели, учитывающей физические свойства маркируемого материала и технологические параметры лазерного комплекса [3].

При маркировке металлических изделий импульсным волоконным лазером в области воздействия на поверхность сфокусированного лазерного пучка происходит частичное оплавление и интенсивный нагрев поверхностного слоя металла с последующим окислением [4]. Это приводит к появлению следа (отпечатка) на участке воздействия лазерного луча (рис. 1).

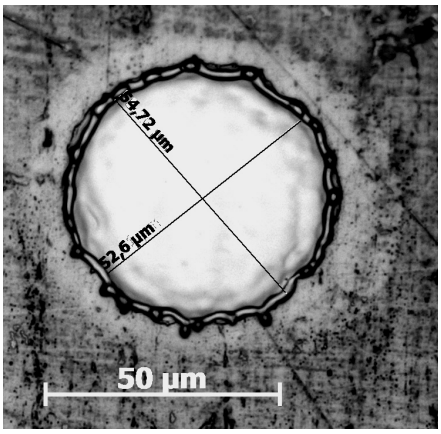


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности стали 08Х18Н10Т после воздействия единичного лазерного импульса, ×500

Размеры отпечатков на металлической поверхности и их взаимное расположение относительно друг друга будут отличаться для различного химического состава сплава и параметров лазерного комплекса: так, например, в зависимости от тока накачки диодной линейки (I), который определяет среднюю мощность излучения (P) и физических свойств сплава, будет изменяться диаметр отпечатка (рисунок 2).Скорость перемещения лазерного луча (V) и частота следования импульсов (F) будет определять насколько плотно по ряду отпечатки накладываются друг на друга, близость каждого ряда определяется задаваемой линиатурой [5]. Оптимально подобранной линиатура будет в том случае, когда между рядами нет промежутков необработанного металла, но и соседние ряды при этом не накладываются друг на друга, чтобы нагрев при формировании второй строки не оказывал влияния на цвет предыдущей строки.

Рисунок 2 – Вид отпечатков импульсов при различных токах накачки на стали 08Х18Н10Т, ×100

Цветная оксидная пленка формируется на площади от предыдущего отпечатка лазерного луча. Толщина плёнки зависит от степени нагрева стали – плёнки разной толщины по-разному отражают световые лучи, чем и обусловлены те или иные цвета побежалости. Для наращивания однородной оксидной пленки заданного цветового оттенка отпечатки следует накладывать друг на друга с некоторым сдвигом таким

образом, чтобы область видимой цветной оксидной пленки перекрывала зону воздействия последующего импульса. Расстояние между следующими друг за другом импульсами зависит от скорости и частоты следования импульсов:

$$dx = V / F, \quad (1)$$

где dx – расстояние между импульсами, м; V - скорость перемещения лазерного луча, м/с; F – частота следования импульсов, Гц. Отпечатки накладываются друг на друга, если dx значительно меньше диаметра отпечатка (рис. 3). Оксидная пленка образуется на участке, предварительно активированном (очищенном от оксидной пленки) предыдущим импульсом лазера [6, 7]. Схема математической модели расчета следования импульсов представлена на рисунке 4: D – диаметр отпечатка лазерного луча на поверхности материала (м); dx – смещение следующего импульса (м); t_a - температура нагрева металла лучом лазера (°С); t_x – температура нагрева зоны образования оксида следующим импульсом (°С), S - зона термического влияния лазерного импульса (м).

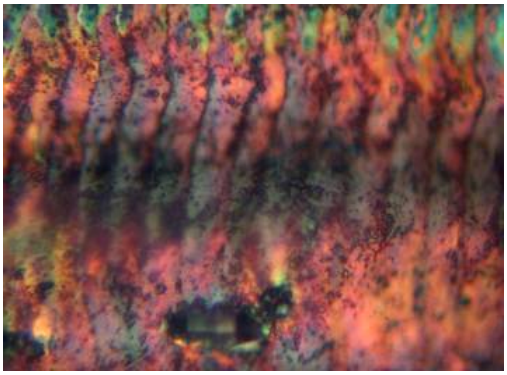


Рисунок 3 – Ряд наложенных отпечатков лазерного луча на металлической поверхности, ×500.

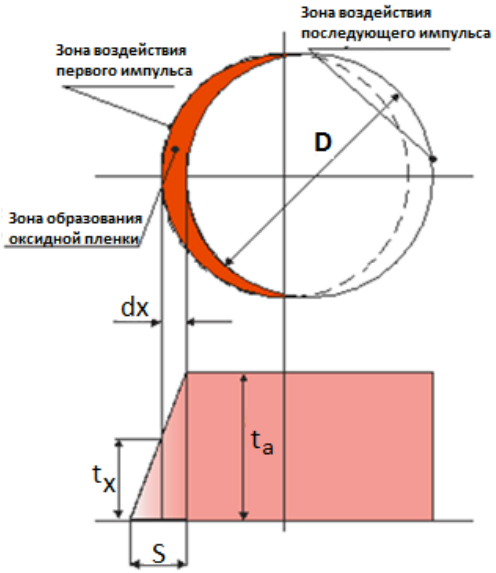


Рисунок 4 - Схема следования импульсов для расчета образования оксидной пленки.

Температура поверхности от мгновенного сосредоточенного источника тепла, действующего на полубесконечной пластине, может быть описана выражением:

$$t_a = \frac{2\eta Q_и}{К \pi r^2} \sqrt{\frac{K \tau_и}{gc\pi}}, \quad (2)$$

где t_a – температура активации поверхности, (°С), $Q_и$ – импульсная мощность (Вт), η – коэффициент поглощения, r – радиус отпечатка лазерного луча (м), $\tau_и$ – длительность импульса (с), K – теплопроводность материала (Вт/(м·град)), g – плотность материала (кг/м^3), c – теплоемкость материала (Дж/(кг·град)).

Импульсную мощность можно определить из выражения (2) следующим образом:

$$Q_и = \frac{t_a \pi r^2}{2\eta} \sqrt{\frac{Kgc\pi}{\tau_и}}. \quad (3)$$

Частота следования импульсов выражается через время импульса, среднюю и импульсную мощность лазера:

$$F = \frac{1}{t_и} \frac{Q_{ср}}{Q_и}, \text{или } F = Q_{ср} \frac{2\eta}{t_a \pi r^2} \sqrt{\frac{1}{\tau_и Kgc\pi}}, \quad (4)$$

где F – частота следования импульсов (Гц), $Q_{ср}$ – средняя мощность (Вт).

Так как время между импульсами существенно больше времени цикла нагрев-охлаждение, охлаждение участка после нагрева лазерным импульсом закончится до начала воздействия следующего импульса. Поэтому нагрев зоны формирования оксидной пленки возможен только за счет зоны термического влияния от последующего импульса (*S* на рис. 4).

Скорость перемещения лазерного луча определяется из выражений:

$$V = 2SF\left(1 - \frac{t'_{п}}{t_a}\right) \text{ или } V = 2F\left(1 - \frac{t'_{п}}{t_a}\right)\sqrt{\frac{2\,\pi\,K\,\tau_{и}}{cg}}, \quad (5)$$

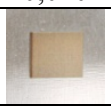
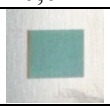
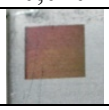
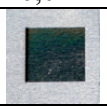
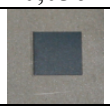
где $t'_{п}$ – температура плавления (°С).

Образование оксидной пленки определенной толщины определяется температурно-временными характеристиками воздействия на поверхность металла. Как видно из формул (2) - (5) в случае обработки поверхности металлических поверхностей лазерным излучением эти характеристики зависят от плотности и мощности лазерного излучения. Косвенной характеристикой изменения подводимой мощности излучения может служить размер отпечатка в зоне воздействия луча лазера. Для получения цветных структур обработка поверхности лазерным маркировочным комплексом производится построчно. Чтобы температурные условия формирования второй строки не оказывали влияния на сформированную предыдущую строку, необходимо, как упоминалось выше, чтобы строки не накладывались друг на друга.

С использованием выражений (4) и (5) были рассчитаны технологические параметры режима формирования оксидных пленок различных цветовых оттенков на трех металлических материалах и проведена их апробация (табл. 1).

Таблица 1.

Расчет параметров режимов формирования цветных оксидных пленок

Расчетный параметр	Марка материала				
	12Х17		08Х18Н10Т		ВТ1-0
Температура плавления, $t'_{п}$, °С	1360		1360		1668
Плотность, g, кг/м^3	7850		7850		4320
Теплопроводность, К, Вт/(м·град)	25		26		22
Теплоемкость, с, Дж/(кг·град)	462		504		523
Температура активации, t_a,°С	1860		2220		2268
Коэффициент поглощения, η	0,03		0,03		0,04
Ток накачки диодной линейки, I, А	13,0		13,0		16,0
Импульсная мощность, $Q_{и}$, Вт	8469		10767		7530
Средняя мощность, $Q_{ср}$, Вт	6,72		6,72		9,86
Частота следования импульсов, F, Гц	15510		15600		32740
Скорость перемещения луча, V, м/с	0,010	0,012	0,010	0,012	0,036
Фото образца					

Скорость перемещения лазерного луча, в основном, определяет расстояние между импульсами и непосредственно влияет на толщину формируемого слоя оксидных структур металла. Частота следования импульсов влияет на интенсивность получаемых оттенков, лимитируя время между импульсами и в тоже время находится во взаимосвязи со скоростью перемещения лазерного луча, что определяет расстояние между отпечатками импульсов. Аналогично рассчитанные параметры (скорость перемещения и частота следования), а также такой технологический параметр, как мощность импульса, можно вычислять не только для технологии маркировки, но и для других видов лазерной обработки, таких как гравировка [8], значительно снизив количество испытуемых

режимов и тестовых образцов на практике.

Полученные в результате теоретического анализа зависимости, описывающие тепловые условия формирования пленочных оксидных микроструктур на металлической поверхности под воздействием импульсного лазерного излучения, разработаны на основании общих положений теории термодинамики. Используемые для расчетов теплофизические характеристики материалов являются общеизвестными и их величины можно найти в справочной литературе.

В результате проведенных исследований была установлена взаимосвязь технологических параметров процесса лазерной маркировки, теплофизических свойств обрабатываемого материала, параметров оксидной пленки (толщины и, соответственно цвета) и характеристик выводимого цветного изображения на металлических поверхностях, что позволяет определять температурно-временной режим формирования маркировочных символов в виде оксидных пленок на этих материалах с заданными цветовыми характеристиками, значительно снизив при этом количество практических маркировочных тестов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Švantner M., Kučera M., Houdková Š.* 2012 Possibilities of stainless steel laser marking *Proc. of 21th Int. Conference on Metallurgy and Materials METAL, 23-25.05, Brno, Czech Republic*.
2. *Горный С*. Цветная лазерная маркировка поверхности металлов / С. Горный, В. Вейко, Г. Одинцова, Е. Горбунова, А. Логинов, Ю. Карлагина, А. Скуратова, Э. Агеев // Журнал Фотоника. - 2013. - №6.
3. *Sivenkov A.V., Konchus D.A., Chirkova O.S., Pryakhin E.I.* 2018 Assessment of laser marking contrast with profilometer *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 194 042022.
4. *Завестовская И.Н.* Лазерное наноструктурирование поверхности материалов / Квантовая электроника. – М.: ФИАН. - 2010. - Т.40. № 11. - С. 942-954.
5. *Ганзуленко О.Ю.* Разработка и апробация технологического процесса нанесения информационных полей на изделия из различных материалов для защиты от подделок, идентификации и учета / О.Ю. Ганзуленко, Е.А. Захаренко, Е.В. Ларионова, А.П. Петкова, Е.И. Пряхин // Инноватика и экспертиза. – М.: ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ. - 2013. - 2(11). - С. 142-154.
6. *Пряхин Е.И.* Создание и апробация аппаратно-программного комплекса для нанесения информационных полей на поверхности изделий / Е.И. Пряхин, Е.В. Ларионова, Е.А. Захаренко // Записки Горного института. - 2014. - Т.209. - С. 234-238.
7. *Пряхин Е.И*. Нанобар-код - многофункциональная двухмерная символика с новыми возможностями // Записки Горного института. - 2015. - Т.215. - С. 97-106.
8. *Nikolidakis E., Choreftakis I., Antoniadis A*. 2018 Experimental Investigation of Stainless Steel SAE304 Laser Engraving Cutting Conditions *Machines* 6 40.

УДК 539.3

ГАРАНИКОВ В.В.
Тверской государственный технический университет,
Факультет природопользования и инженерной экологии

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПО ПЛОСКИМ ТРАЕКТОРИЯМ ПЕРЕМЕННОЙ КРИВИЗНЫ

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования закономерностей изменения скалярных и векторных свойств материалов на плоских криволинейных траекториях переменной кривизны типа спиралей «Архимеда». В экспериментах были реализованы траектории деформаций с 4, 2, 1, 0.5 витками скручивания. При завершении скручивания траектории на последующих витках, как продолжение эксперимента, происходит последовательное раскручивание спирали.

Ключевые слова: деформирование, сложное нагружение, спираль «Архимеда», векторные и скалярные свойства, траектория.

GARANIKOV V.V.
Tver State Technical Universiti

THE RESEARCH OF THE PROCESS IN THE FLAT TRAJECTORIES OF VARIABLE CURVATURE

Abstract. The paper presents the results of an experimental research of the patterns of changes in the scalar and vector properties of materials on the plane curvilinear variable-curvature type spirals "Archimedes". Deformation trajectories with 4,2,1, 0.5 twisting turns were realized in the experiments. At the end of the twisting path on the subsequent turns, as a continuation of the experiment is a sequential unwinding of the spiral.

Key words: deformation, complex loading, spiral of Archimedes, vector and scalar properties, trajectory.

В ряде работ [1-2] и др. проведено исследование закономерностей упругопластического деформирования металлов, в частности, стали 45, по замкнутым плоским криволинейным траекториям. Причем, в большинстве случаев, изучались траектории постоянной кривизны χ_1 = const, как наиболее простые в плане технической реализации. Постановка подобных исследований имеет целью экспериментальное обоснование и проверку физической достоверности определяющих соотношений теории пластичности и необходима для анализа и подбора аппроксимаций функционалов, входящих в определяющие соотношения. При этом очевидна необходимость постановки дополнительных экспериментов с максимально широким диапазоном изменения кривизны траектории в пределах одного опыта. В этом плане интересным, на наш взгляд, является постановка экспериментов по сложному активному деформированию и разгрузке материалов на траекториях типа спиралей Архимеда. Эксперименты по сложному деформированию материала по траекториям «спираль Архимеда» осуществлены в плоскости $Э_1$-$Э_3$ девиаторного подпространства деформаций $Э^3$ А.А. Ильюшина:

$$Э_1 = Э\cos\theta,\ Э_2 = -Э\sin\theta,\ Э = a(2\pi n - \theta),$$

где Э - переменный радиус спирали, θ - угол поворота радиуса от направления оси $Э_1$, n - число витков, $\Delta Э = 2\pi a$ - расстояния на радиусе между двумя соседними витками спирали.

Выход на криволинейную траекторию осуществлялся в результате предварительного растяжения до заданного уровня $Э_1 = S_0$ ($S_0 = \Delta Э \cdot n$) и излома траектории на угол $\nu = 90 + \beta$, где $\beta = \text{arctg}\,(1/2\,\pi)$. Центр кривизны совмещался с началом координат девиаторной плоскости. При завершении скручивания траектории $Э_1 = Э_3 = 0$ (4-витка), на последующих витках, как продолжение эксперимента (2-витка), происходит последовательное раскручивание спирали. Таким образом, части траектории деформирования, сопровождающиеся уменьшением и возрастанием модуля вектора деформации Э не совпадают. В экспериментах были реализованы траектории деформаций с 4, 2, 1, 0.5 витками скручивания так, что угол ν изменялся в пределах $\pi/2 < \nu < 1.89$ ($90° < \nu < 108.30°$). На рис.1 представлена траектория с четырьмя витками скручивания Цифры в кружках указывают на начало соответствующих витков. Экспериментальные точки на каждом витке обозначены условными символами в виде кружочков, треугольников и т.п. Стрелка указывает направление процесса. Реализовано более 6 полных витков спирали: на четырех первых витках происходит скручивание траектории в точку начала координат Э = 0 (условное изображение - кружки), на двух последующих витках, как продолжение эксперимента, происходит последовательное раскручивание спирали без изменения знака процесса. Таким образом, части траектории деформирования, сопровождающиеся уменьшением и возрастанием модуля вектора деформаций Э не совпадают.

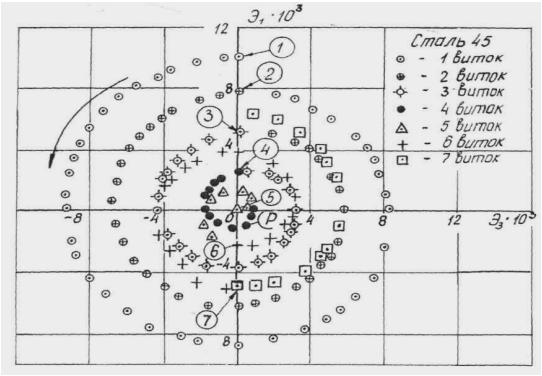


Рисунок 1 – Траектория деформаций типа «спираль Архимеда» (n = 4)

Траектория напряжений, соответствующая реализованной траектории деформирования, изображена на рис. 2. Цифры в кружках на рис. 1, 2 указывают на начала соответствующих витков.

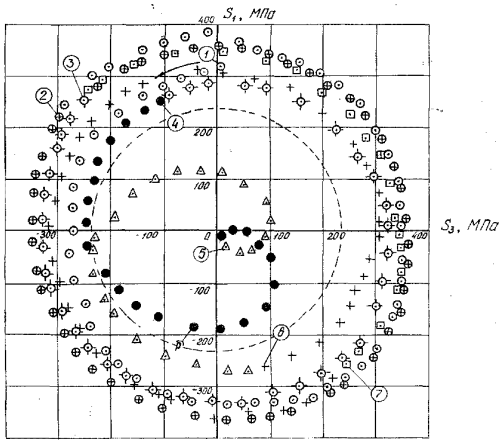


Рисунок 2 – Траектории нагружения (n = 4)

На рис. 3 представлена диаграмма деформирования материала для спирали Архимеда (n = 4).

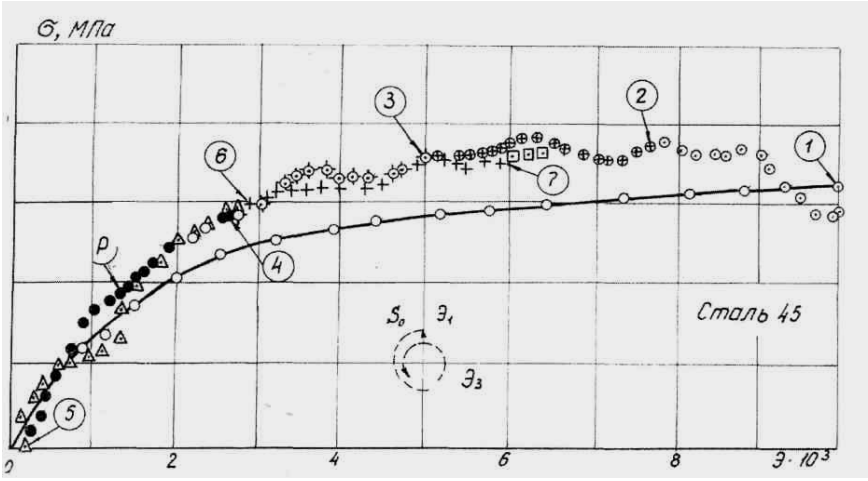


Рисунок 3 – Диаграмма деформирования материала (n = 4)

Видно, что после «нырка» напряжений в точке излома, зависимость σ ~ Э при сложном процессе, сопровождающимся постоянным уменьшением Э, поднимается выше графика σ = Ф(Э) простого нагружения, что соответствует упрочнению материала и активному процессу упругопластического деформирования. При достижении точки «Р» активный процесс сменяется на пассивный (сложная разгрузка). Для данной траектории, с учетом естественного разброса опытных данных, графики σ ~ Э для двух участков траектории (при скручивании и раскручивании спирали) практически совпадают, что говорит о стабильности упрочнения материала, полученного при реализации рассматриваемого процесса, который можно отнести к процессам сложной разгрузки. Таким образом показано, что после излома траекторий процесс оставался активным и лишь в точке Р началась разгрузка. До этого момента материал вел себя подобно нелинейно упругому, хотя имел место активный процесс упругопластического деформирования. Такое поведение материала при сложном нагружении наблюдалось впервые. При этом сталь 45 может быть отнесена к классу мало упрочняющихся при сложном непропорциональном малоцикловом деформировании материалов [3-5].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубчанинов В.Г.* Пластическое деформирование стали по замкнутым криволинейным траекториям / В.Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков // Проблемы прочности. - 1996. - №4. - С. 19-26.

2. *Гараников В.В.* Экспериментальная пластичность: Монография. Книга 2: Процессы сложного нагружения / В.В. Гараников, В.Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков // Тверь: ТГТУ, 2004 - 184 с.

3. *Garanikov V.V.* 2016 Investigation into regularity of scalar properties of materials on a spatial curved paths *Journal of Advanced Research in Technical Science* North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace Issue 2 108 p.

4. *Гараников В.В.* Исследование упругопластических свойств конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / Современные проблемы теории машин: Материалы пятой междунар. научно-практической конф. Новокузнецк. - 2017. - №5. - С. 79-81.

5. *Zubchaninow V.G., Garanikov V.V.,Gultiaev V.I., Alekseev A.A., Subbtin S.L.* 2017 Testing of steel 45 under complex loading along the cylindrical screw trajectories of deformation *Materials Physics and Mechanics* 32 305-311.

УДК 539.4.016.3: 669.146:536.4

ЕФИМОВ С.В.
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»
ЦУКАНОВ В.В.,
СМИРНОВА Д.Л.
НИЦ «Курчатовский институт» -
ЦНИИ КМ «Прометей»

ФАЗОВЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ ШТАМПОВЫХ СТАЛЯХ

Аннотация. Изучение фазовых и структурных превращений в крупных поковках штамповых сталей (до 60-80 тн) необходимо проводить с целью оптимизации режимов накопления и предварительной термической обработки (ПТО) непосредственно после ковки.

Ключевые слова: штамповые стали; поковки; флокены; превращения в сталях; предварительная термическая обработка.

EFIMOV S.V.
JSC «NPO «TSNIITMASH»
TSYKANOV V.V.,
SMIRNOVA D.L.
NRC «Kurchatov Institute»- CRISM «Prometey»

PHASE AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN MEDIUM-CARBON DIE STEELS

Abstract. The study of phase and structural transformations in large forgings of stamped steels (up to 60-80 tons) should be carried out in order to optimize the accumulation modes and pre-heat treatment (PTO) immediately after forging.

Keywords: die steels; forgings; flocs; transformations in steels; advanced heat treatment.

Предварительная термическая обработка (ПТО) проводится непосредственно после ковки, стадии накопления и переохлаждения. Часто, в зависимости от основной цели ПТО (например – снижение содержания водорода в стали ниже критического с точки зрения недопустимости флокенов), может называться противофлокенная термическая обработка (ПФО) или отжиг.

Первая стадия этого комплекса действий – операция накопления. После ковки поковки собирают в накопительной печи при температуре (по базовой документации) 600-650 ºС и выдерживают определенное время до набора нужного количества (по весу или габаритам) поковок из стали близкого состава. При этом оговаривается суммарное время накопления не более 5 суток, а последней по закладке поковки – не менее 5-10 часов в зависимости от сечения и марки стали. Далее следует переохлаждение до температур 250-300 ºС. При этом выдержка при накоплении не регламентируется в зависимости от марки стали и лежит в довольно широком диапазоне температур 600-650 ºС. При таком подходе к операции накопления совершенно не учитываются процессы фазовых и структурных превращений, происходящие на стадии копежа, в то время как их целенаправленное применение могло бы дать значительную эффективность в борьбе с устранением неизбежной при ковке разнозернистости, повышенной склонности к структурной

наследственности, с флокенообразованием, а также в повышении эффективности последующих термических обработок [1-2].

В постановке части работы по исследованию фазовых и структурных превращений при копеже стояли следующие задачи:

1. Определение температуры выдержки при накоплении с целью соответствия ее диапазона температуре прохождения диффузионного А → Ф+П превращения для ряда марок стали.

2. Анализ влияния скорости охлаждения с температуры окончания ковки на характер диффузионного превращения аустенита и температурно-временные параметры превращения.

3. Анализ кинетики диффузионного превращения аустенита и обоснование оптимального режима накопления с точки зрения ускорения диффузионных процессов выделения водорода на этой стадии термического воздействия.

На основании решения задач 1-3 – назначение копежа на базе оптимальных режимов необходимо считать важным этапом в составе ПТО, при котором формируется структура, фазовый состав и проходит дегазация по водороду, влияющим, в конечном итоге, на сдаточные характеристики качества металлургических полуфабрикатов.

После операции накопления в соответствии с общепринятой практикой делают переохлаждение до температур 250-300 ºС с определенной выдержкой. Назначение охлаждения – перевести непревратившуюся часть аустенита в α фазу (в основном - бейнит) и провести дополнительную дегазацию по водороду за счет снижения растворимости водорода в α-фазе при понижении температуры до 250-300 ºС.

Далее следует предварительная термическая обработка. Предварительная термическая обработка стали предназначена для улучшения свойств готовых изделий, при этом есть необходимость устранения дефектов горячедеформированной структуры и подготовки их к окончательной термообработке.

В зависимости от режимов деформирования, последующего охлаждения и марки стали в поковках могут образовываться следующие дефекты:

– крупнозернистость, связанная с развитием процессов собирательной рекристаллизации при высокой температуре окончания ковки;

– разнозернистость, обусловленная различной степенью деформации поверхностных слоев и центральной зоны;

– повышенная твердость поверхностного слоя из-за частичного сохранения горячего наклепа;

– карбидная сетка по границам зерен, выделяющаяся из аустенита при медленном охлаждении крупных поковок (для сталей с повышенным содержанием углерода).

Так же предварительная термическая обработка позволяет избавиться от флокенов. Флокены представляют собой очень тонкие трещины овальной или круглой формы размерами от долей миллиметра до 50 мм в поперечнике. В большинстве случаев встречаются в катанных или кованных заготовках (поковках), иногда - в литом металле. Из сталей, применяемых для крупных поковок, наиболее склонны к флокенообразованию хромоникелевые, хромомарганцовистые (с молибденом, в том числе) стали мартенситного и мартенситно–бейнитного классов.

При определенных условиях предварительная термическая обработка позволяет добиться феррито-перлитной структуры, полностью или частично перераспределить количество водорода по всему объему детали, уменьшив его количество в стали.

При проведении ПТО низко- и среднелегированных сталей целесообразно использовать изотермический отжиг. При изотермическом отжиге поковки нагревают до температуры выше точки Ac_3 на 30-50 °С. Выдерживают до полного прогрева, затем охлаждают до температуры несколько ниже точки Ar_3, выдерживают при этой температуре время, необходимое для полного завершения превращения, после чего охлаждают. Для проведения изотермического отжига требуется меньше времени, чем для

отжига, состоящего из фазовой перекристаллизации, переохлаждения и, чаще всего, двукратного отпуска. Для охлаждения изделие переносят в печь с меньшей температурой или охлаждают с печью с последующим выравниванием температуры. Для ускорения изотермического отжига и более полного его прохождения, температуру изотермической выдержки желательно выбирать близкой к температуре минимальной устойчивости переохлажденного аустенита, определенной в изотермических условиях.

Изотермический отжиг может дать выигрыш во времени, особенно при обработке легированных сталей с устойчивым переохлажденным аустенитом. Температура изотермической выдержки значительно влияет на получающуюся структуру и свойства. С понижением температуры, т.е. с увеличением степени переохлаждения аустенита, зерна измельчаются, и получается более дисперсный перлит. Однако, это положение справедливо только для углеродистых и низколегированных сталей.

Другое преимущество изотермического отжига - получение более однородной структуры, так как при изотермической выдержке температура по сечению изделия выравнивается и превращение во всем объеме стали происходит при одинаковой степени переохлаждения.

Для углеродистой стали высокие скорости распада аустенита совпадают с интервалом температур 650-450 °С. Здесь превращение идет с образованием структур перлита. Почти все легирующие элементы (исключение составляет кобальт) замедляют превращения в этой области температур сужают его, часто сводя к нулю скорости распада около 400–500 °С, и создают новую область высоких скоростей распада в интервале 370 – 240°С. В интервале температур ниже 400°С распад протекает с образованием структур бейнита и мартенсита и иногда не может быть закончен, причем в структуре стали сохраняется остаточный аустенит. Как известно, в некоторых сталях с высокой степенью легирования создается весьма устойчивый аустенит, как, например, для сталей 18ХН4В(М)А и 25ХН4В(М)А, распад аустенита которых практически при любых выдержках в зоне подкритических температур не идет, либо при охлаждении идет по мартенситному механизму. Поэтому, определение диапазона температур, в котором наиболее эффективно происходит диффузионное превращение аустенита, вызывает большой теоретический и практический интерес [3].

С целью эффективно удалить водород и равномерно при меньшей концентрации по всей поковке, уже начиная на стадии окончания ковки (копежа) необходимо определить оптимальную температуру изотермической выдержки.

Исследуемую сталь 56NiCrMoV7 подвергли термической обработке по различным технологическим схемам (рис. 1) - нагрев до 1200 °С, охлаждение 54 °С/ч и последующей изотермической выдержкой при разных температурах (680 °С, 700 °С, 720 °С).

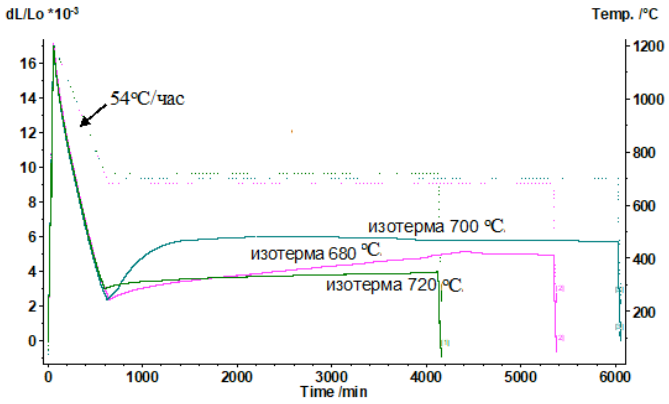


Рисунок 1 - Дилатограмма нагрев – 1200 °С с последующим охлаждением до температур 680, 700, 720 °С и изотермической выдержкой при этих температурах (моделирование накопления)

Более интенсивное диффузионное превращение происходит при изотермической выдержке при 700 °С на начальном этапе выдержки, при этом следует отметить, что при охлаждении с выдержек 700 и 720 °С происходит бейнито-мартенситное превращение, таким образом, наиболее полное диффузионное превращение происходит при изотермической выдержке при 680 °С [4].

Проведены дилатометрические исследования (рис. 2), моделирующие режим ПТО, с нагревом до 860 °С и последующей изотермической выдержкой при разных температурах (630 °С, 680 °С, 700 °С, 720 °С).

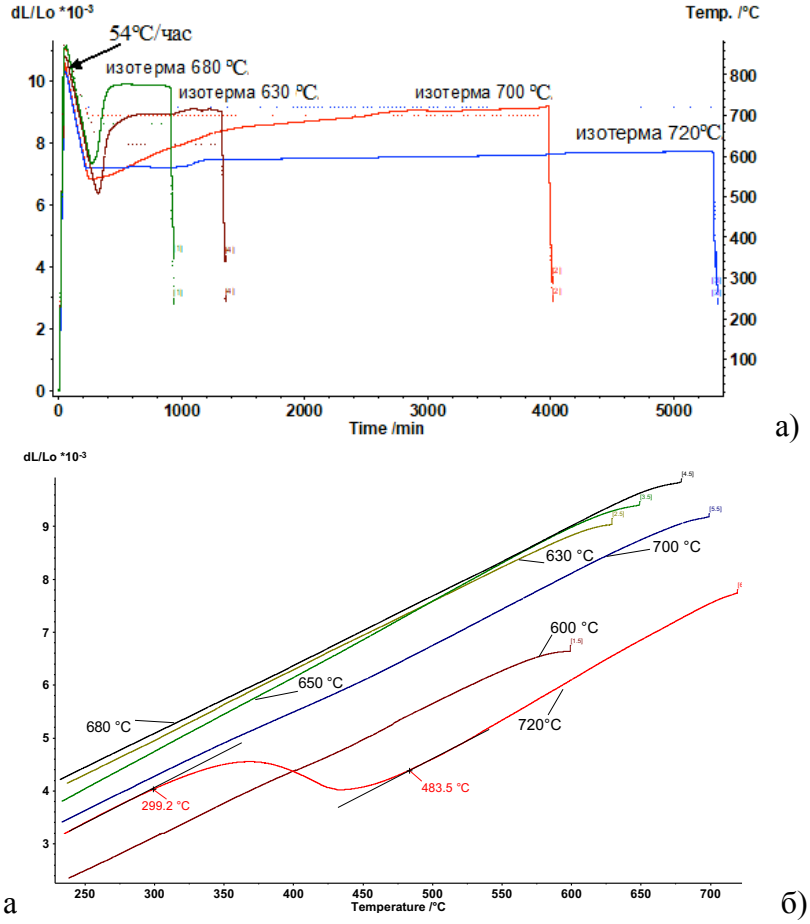


Рисунок 2 - Дилатометрические исследования, моделирующие режим ПТО:
а) - дилатограмма нагрев - 860°С с последующим охлаждением до температур 630, 680, 700, 720°С и изотермической выдержкой при этих температурах;
б) - кривые окончательного охлаждения после выдержки

При изотермической выдержке при температуре 720 °С диффузионного превращения практически не происходит, наблюдается бейнитное превращение при охлаждении. При изотермической выдержке при температуре 700 °С происходит на начальной стадии слабо интенсивное диффузионное превращение, которое заканчивается за ~ 45 часов. При изотермической выдержке 680 °С происходит интенсивное диффузионное превращение, которое заканчивается за ~ 4 часа. При изотермической выдержке при температуре 630 °С также происходит интенсивное диффузионное превращение, которое заканчивается за ~ 15 часов.

Исходя из выполненных исследований, был рекомендован усовершенствованный режим ПТО, включающий в себя изотермический отжиг на стадии копежа и на основной стадии ПТО, с выдержками при температурах наиболее интенсивного прохождения диффузионного феррито - перлитного превращения. Усовершенствованная технология

отличается меньшей продолжительностью обработки (рис. 3, б) на 120 ч.

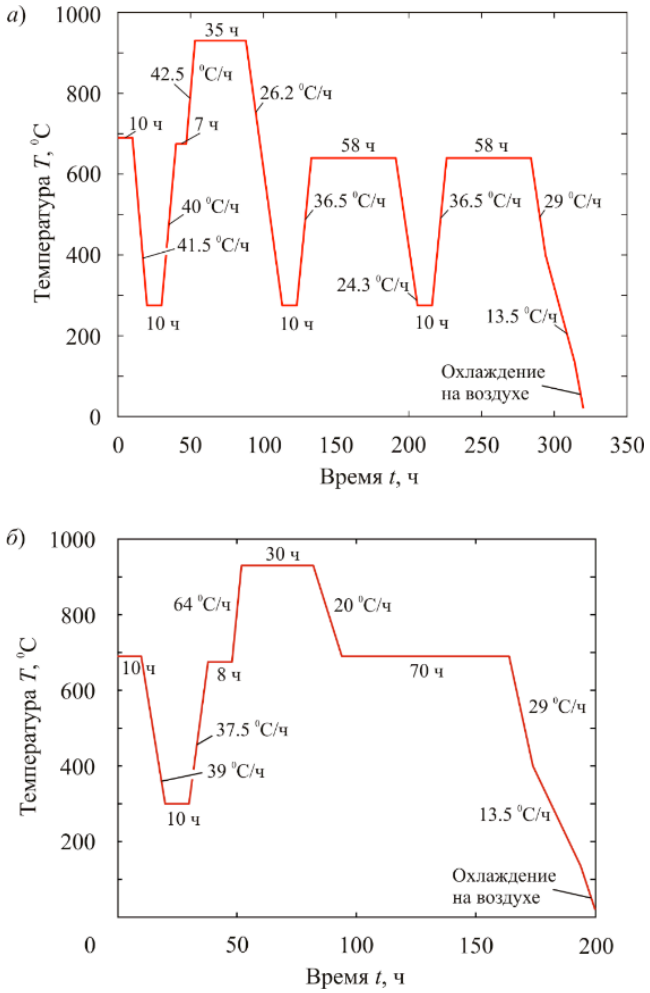


Рисунок 3 - Режим предварительной термической обработки поковок из сталей 5ХНМ и 56NiCrMoV7 диаметром 1000 мм:
а – стандартная технология; *б* – усовершенствованная технология

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов. 3-е изд., перераб и доп. - М.: Металлургия, 1978.
2. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. Изд. 3-е изд. перераб. и доп. / Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. - М.: Металлургия, 1983.
3. *Цуканов В.В.* Современные стали и технологии в энергомашиностроении. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2014.
4. *Барахтин Б.К., Немец А.М.* Справ. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 490 с.

УДК 539.4.016.3: 669.146:536.4

ЕФИМОВ С.В.
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»
ЦУКАНОВ В.В.,
СМИРНОВА Д.Л.
НИЦ «Курчатовский институт» -
ЦНИИ КМ «Прометей»

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА (860 И 1200 °С) НА КИНЕТИКУ ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА В ШТАМПОВОЙ СТАЛИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Аннотация. В работе проведена оценка влияния условий охлаждения на кинетику превращения аустенита штамповой стали, а также определено влияние температуры нагрева на критические точки фазовых превращений при непрерывном охлаждении.

Ключевые слова: штамповые стали; поковки; флокены; превращения в сталях; предварительная термическая обработка; превращения аустенита; термокинетическая диаграмма; дилатометрия.

EFIMOV S.V.,
JSC «NPO «TSNIITMASH»
TSYKANOV V.V.,
SMIRNOVA D.L.
NRC «Kurchatov Institute»- CRISM «Prometey»

INFLUENCE OF THE HEATING TEMPERATURE (860 AND 1200 °C) ON THE KINETICS OF AUSTENITE TRANSFORMATION IN DIE STEEL UNDER CONTINUOUS COOLING

Abstract. The paper evaluates the influence of cooling conditions on the kinetics of transformation of austenite of stamped steel, and also determines the influence of the heating temperature on the critical points of phase transformations during continuous cooling.

Keywords: die steels; forgings; flockens; transformations in steels; pre-heat treatment; austenite transformations; thermokinetic diagram; dilatometry.

При производстве штамповых крупногабаритных заготовок большое внимание уделяется борьбе с флокенообразованием. При определенных условиях предварительная термическая обработка позволяет добиться феррито-перлитной структуры, полностью или частично перераспределить количество водорода по всему объему поковки, уменьшив его количество в стали. Сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» была предложена усовершенствованная схема предварительной термической обработки стали типа 56NiCrMoV7, с созданием условий для прохождения диффузионного феррито-перлитного превращения. Для определения температурных диапазонов превращений аустенита, применяются термокинетические диаграммы. Однако, в зависимости от температур нагрева изменяется легированность аустенита, что влияет на его устойчивость. Исходя из этого выполнено исследование по оценке влияния условий охлаждения на кинетику превращения аустенита [1-2].

В работе была построена совмещенная термокинетическая диаграмма превращения аустенита при исходных температурах нагрева 1200 и 860 °С (рис.1). Температура 1200 °С

имитировала температуру нагрева под ковку, при которой достигается максимальная легированность аустенита. Температура 860 °С соответствовала принятой температуре нагрева под отжиг.

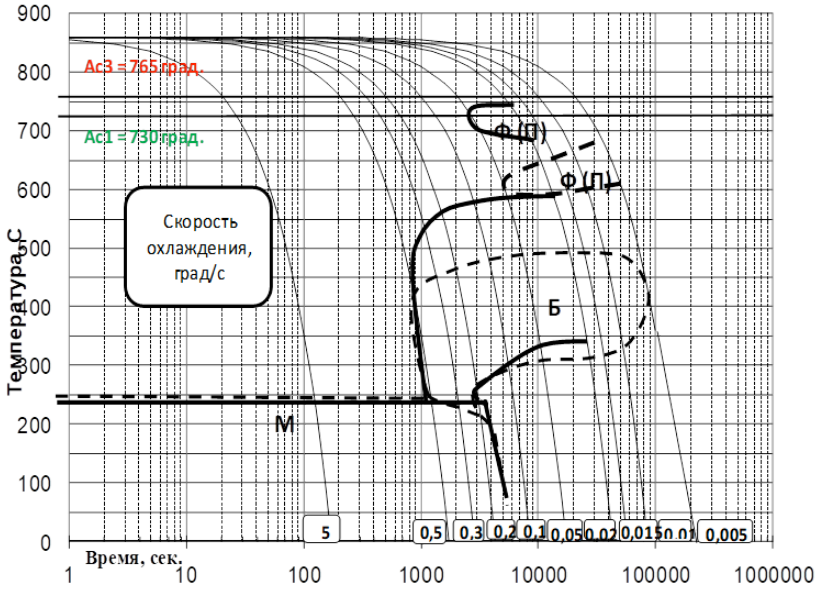


Рисунок 1 – Сравнение термокинетических диаграмм при непрерывном охлаждении с нагрева 1200°С (———) и 860 °С (– – –)

В табл. 1 приведены результаты микроструктурного анализа, а также приведены результаты замеров твердости образцов после эксперимента.

Таблица 1.

Результаты исследований образцов после непрерывного охлаждения с нагревов 1200 °С и 860 °С

Т нагрева, °С	V охлаждения, °С/с	Характеристика структуры	Размер зерна	Твердость HRC
1200	0,02	Бейнит+феррит+перлит	398 мкм (-1 балл)	28
	0,05	Бейнит+феррит+перлит	399 мкм (-1 балл)	35
	0,1	Бейнит	380 мкм (-1 балл)	44
	0,2	Бейнит+мартенсит	434 мкм (-1 балл)	49
	0,5	Бейнит+мартенсит	432 мкм (-1 балл)	58
	5	Мартенсит	422 мкм (-1 балл)	61
860	0,02	Бейнит+феррит+перлит	18,5 мкм (8 балл)	34
	0,05	Бейнит	22 мкм (8 балл)	35
	0,1	Бейнит	20,6 мкм (8 балл)	36
	0,2	Бейнит+мартенсит	15 мкм (9 балл)	51
	0,5	Бейнит+мартенсит	21 мкм (8 балл)	59
	5	Мартенсит	21 мкм (8 балл)	60

Сравнение термокинетических диаграмм при непрерывном охлаждении с нагрева 1200 и 860 °С показало существенное изменение температурных интервалов превращений:

– температурный интервал бейнитного превращения смещается в область более низких температур (начало бейнитного превращения смещается с 600 до 500 °С).

– температурный интервал феррито-перлитного превращения также снижается в область медленных скоростей, и минимум устойчивости аустенита в области превращения снижается с 730 до 620 °С.

– температурный диапазон мартенситного превращения не изменился [3-4].

Результаты данного исследования указывают на то, что при выборе температур при назначении режима предварительной термической обработки, необходимо руководствоваться значениями температурного диапазона диффузионного превращения, определяемого при нагреве до температур, присущим этим технологическим операциям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фазовые и структурные превращения в стали и обоснование режимов термической обработки крупногабаритных заготовок в машиностроении. Учебное пособие / В.В. Цуканов, Г.Ю. Калинин. – СПб.: ФГУП «ЦНИИ КМ Прометей», 2012. – 126 с.
2. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. Изд. 3-е изд. перераб. и доп. / Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. - М.: Металлургия, 1983.
3. *Цуканов В.В.* Современные стали и технологии в энергомашиностроении. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2014.
4. *Барахтин Б.К., Немец А.М.* Справ. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 490 с.

УДК 621.762

ЗАМОЗДРА М.Ю.,
ЦЕМЕНКО В.Н.,
ГАНИН С.В.,
ТРОЦКИЙ М.В.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРЯЧЕЭКСТРУДИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ДИСПЕРСНО УПРОЧЕННЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДАМИ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

Аннотация. Данная работа содержит сведения о получении дисперсных тройных интерметаллидов на основе алюминия двумя различными способами, их смешение с алюминиевым порошком, последующим брикетированием и горячей экструзией. В результате наблюдается увеличение предела прочности прутка, повышение твердости и равномерное распределение упрочняющей фазы по объему.

Ключевые слова: горячая экструзия; тройные интерметаллиды; дисперсное упрочнение; экструзия алюминия; высокодисперсные добавки; механосинтез; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; порошковая металлургия.

ZAMOZDRA M.YU.,
TSEMENKO V.N.,
GANIN S.V.,
TROTSKY M.V.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

STUDY OF STRENGTH PROPERTIES OF HOT EXTRUDED ALUMINUM SEMI-FINISHED PRODUCTS DISPERSION STRENGTHENED BY ALUMINUM INTERMETALIDES

Abstract. The thesis contains information on the preparation of dispersed ternary intermetallides based on aluminum, their mixing with aluminum powder, subsequent briquetting and hot extrusion. As a result, the strength of the rod is increased, the hardness is increased and the strengthening phase is uniformly distributed throughout the volume.

Keywords: hot extrusion, triple intermetallides, dispersed hardening, aluminum extrusion, highly disperse additives, mechanosynthesis, self-propagating high-temperature synthesis, powder metallurgy.

Находясь в составе алюминиевых, магниевых и некоторых титановых сплавов, металлические соединения на основе алюминия оказывают большое влияние на их прочностные и специальные свойства – износостойкость, коррозионостойкость, жаропрочность. Наибольший эффект достигается при наличии в сплаве двойных и особенно тройных металлических соединений в виде интерметаллидов. Интерметаллиды (ИМ) могут присутствовать в структурно-свободном состоянии, входить в структуру эвтектик или находиться в форме рассеянных частиц, выделившихся в процессе дисперсионного распада закаленных сплавов [1].

Порошковая металлургия открывает широкие возможности создания искусственных («синтетических») сплавов, упрочнённых двойными или тройными ИМ,

что может быть реализовано введением заранее синтезированных порошков ИМ заданного химсостава в порошки чистого алюминия (а также других металлов) или малолегированных его сплавов. В результате такого введения система станет значительно отличаться от равновесной и будет содержать существенно большее, чем в соответствии с классическими диаграммами состояния, количество упрочняющих фаз. Это содержание определяется только интересами исследователя, нацеленными на получение наилучшего комплекса прочностных и служебных характеристик материала после термопластической обработки смеси.

Для изучения возможности упрочнения сплавов алюминия предпринята попытка создания «синтетических» сплавов за счет тройных ИМ, состоящих из алюминия и хрома, магния, марганца, титана или цинка в различной стехиометрии с последующей горячей экструзией порошковых смесей.

Цель работы: практическое исследование структуры и свойств алюминиевых горячеэкструдированных полуфабрикатов, дисперсно-упрочненных тройными интерметаллидами на алюминиевой же основе.

Для работы были выбраны четыре состава различных ИМ, полученных методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [2] или механолегирования (МЛ) [3], фазовый состав которых приведен в табл. 1.

Таблица 1.

Фазовый состав образцов для исследований (мас. %)

№ образца	Основная фаза			Прочие фазы					
	Химическая формула	Способ получения	Содержание, %	Al	$Al_{13}Cr_2$	$Al_{12}Mg_{17}$	Al_6Mn	Zn	Al_3Ti
1	$Al_{18}Mg_3Cr_2$	СВС	37	20	43	-	-	-	-
2	$Al_{18}Mg_3Mn_2$	СВС	34	23	-	11	32	-	-
3	$Al_{11}Ti_4Zn$	МЛ	53	24	-	-	-	9	14
4	$Al_{66}Ti_{25}Zn_9$	МЛ	75	14	-	-	-	4	7

Были подготовлены четыре шихты для горячей экструзии с равным содержанием в них основной фазы ИМ, составляющим 3 мас. %. Основа шихты – порошок чистого алюминия марки АСД-1.

Процесс экструзии проведен в следующем режиме: нагрев до 400 °С; коэффициент вытяжки ~ 9; угол конусности фильеры – 90°; скорость деформации – минимально возможная для поддержания процесса (~1,5 мм/с).

Результаты механических испытаний образцов.

Испытания на сжатие показали, что введение ИМ не оказывает значительного охрупчивающего эффекта материала – образцы образовывают «бочку» и выдерживают значительную деформацию.

Результаты испытаний на растяжение показаны в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты испытаний прутков Al + 3 мас.% ИМ на растяжение

№ прутка	Хим. состав	Предел прочности, МПа			Упрочнение, %	Увеличение микротв., %
		Обр.1	Обр.2	Среднее		
0 («эталон»)	АСД-1 (Al)	126,8	126,1	126,5	–	–
1	$Al + Al_{18}Mg_3Cr_2$	129,0	132,2	130,6	3,3	12,3
2	$Al + Al_{18}Mg_3Mn_2$	–	138,7	138,7	9,7	29,8
3	$Al + Al_{11}Ti_4Zn$	132,7	129,9	131,3	3,8	49,1
4	$Al + Al_{66}Ti_{25}Zn_9$	123,7	126,4	125,0	-1,1	9,3

Образец Al + 3% $Al_{18}Mg_3Mn_2$ демонстрирует повышение прочностных свойств относительно эталона почти на 10%, но один из прутков именно этого состава разрушился в зажимах по резьбе. Хотя и магний, и марганец заметно увеличивают прочностные показатели алюминия, но при этом значительно охрупчивают матрицу, даже при небольшом легировании [4].

Микротвердость измеряли с использованием сканирующего нанотвердомера Hynistron TI 750 Ubi 1 Triboindenter. Установлено, что микротвердость возросла на 9-49%.

Микроструктура всех образцов изучена с помощью системы «Thixomet» на базе микроскопа фирмы Leika. Сравнение образца Al + 3 % $Al_{18}Mg_3Cr_2$ с эталонным показано на рис. 1.

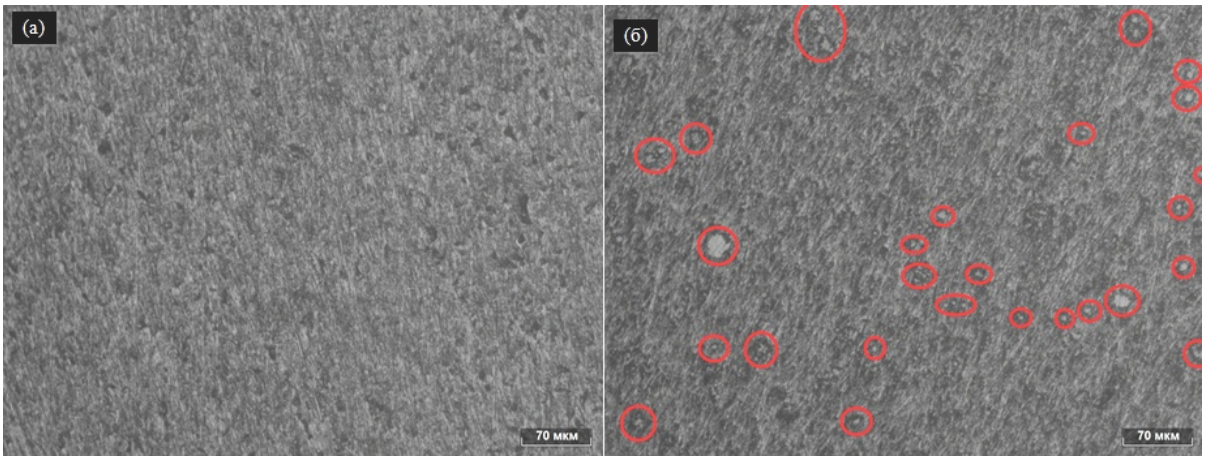


Рисунок 1 – Сравнение микроструктуры экструдатов:
(а) чистого алюминия и (б) дисперсно-упрочненного композита состава Al+ 3% $Al_{18}Mg_3Cr_2$, ×200

Снимки микроструктуры в поперечном сечении позволили убедиться в равномерном распределении включений ИМ.

Заключение. Методом горячей экструзии при 400 °С и коэффициенте вытяжки 9 получены пять образцов: один из чистого алюминия и четыре композитных состава Al + 3% ИМ.

Механические испытания показали, что образцы разрушаются пластично, хотя, судя по графикам нагружения, с некоторой потерей пластичности относительно нелегированного эталоном.

Микротвёрдость всех дисперсно-упрочненных образцов повысилась на 9-49%. Наилучшим из исследованных упрочняющим составом является $Al_{18}Mg_3Mn_2$, введение 3 мас. % которого в алюминиевую матрицу повышает прочность на 10%, а микротвёрдость на 30%.

При дальнейшем исследовании предполагается, увеличив дисперсность ИМ, варьировать содержанием фазы ИМ в Al матрице, длительностью выдержки, коэффициентом вытяжки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Drozda T., Wick C., Bakerjian R., Veilleux, R.F., Petro L.* 1984 Tool and manufacturing engineers handbook: Forming 2. SME.

2. *Троцкий М.В.* Закономерности возникновения и изменения наноразмерных фаз упрочняющих фаз в механолегированных порошках системы Al-Mg-Mn-Ti / М.В. Троцкий [и др.] // Сборник докладов молодежной научно-практической конференции в рамках недели науки СПбПУ: СПб, 2014. С. 137-141.

3. *Каминский В.В.* Исследование процесса синтеза и развития нанодисперсных фаз при механолегировании, проводимого на основе порошковой системы Al-Ti-Zn / В.В.

Каминский, М.В. Мишин, С.Ю. Петрович // Сборник докладов молодежной научно-практической конференции в рамках недели науки СПбПУ: СПб, 2015.
4. *Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н.* Современные технологии в порошковой металлургии. Уч. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. - 386 с.

УДК 535.662

ЗАХАРЕНКО Е.А,
РОМАНОВ В.В,
ОДИНЦОВА Г.В.
Университет ИТМО

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОБАР-КОДА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ

Аннотация В данной работе рассматривается двухмерный код – нанобар-код (НБК).Описываются его функциональные возможности по защите продукции от контрафакта. Проведен полный факторный анализ по определению оптимального режима получения наиболее контрастного изображения ячеек кода на металлической поверхности (сталь 08Х18Н10Т) с помощью лазерной маркировки. Получено уравнение регрессии, коэффициенты уравнения проверены на значимость, а само уравнение проверено на адекватность, приведена интерпретация коэффициентов уравнения.

Ключевые слова: лазерная маркировка, двухмерный код, многофакторный анализ.

ZAKHARENKO E.A,,
ROMANOV V.V.,
ODINTSOVA G.V.
ITMO University

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR FORMING A NANOBAR CODE ON A METAL SURFACE USING LASER MARKING

Abstract: In this paper, we consider a two – dimensional code-nanobar code (NBC). It describes its functionality to protect products from counterfeit. A full factor analysis was performed to determine the optimal mode for obtaining the most contrasting image of code cells on a metal surface (steel 08X18N10T) using laser marking. The regression equation is obtained, the coefficients and the equation are checked for adequacy, and the interpretation of the coefficients of the equation is given.

Keywords: laser marking, two-dimensional code, multi-factor analysis.

В обзорной части рассматриваются виды линейных и двухмерных штрих-кодов – их достоинства и недостатки. Сформулирована проблема решение которой предполагает данная разработка. Представлено описание нового вида двухмерного кода – нанобар-кода (НБК), описаны его функциональные возможности. Приведены размеры кода в зависимости от количества кодируемой информации и размера ячейки. Проведен сравнительный анализ размеров и функциональности существующих двухмерных кодов – DataMatrix и QRCode с рассматриваемым кодом [1, 3-5].

Далее проведен полный факторный эксперимент для определения значения цвета в системе RGB максимально приближенного к черному цвету. За факторы, влияющие на отклик функции (значение цвета в системе RGB), приняты параметры лазерного излучения: длительность импульса, частота лазерного излучения, скорость маркировки, а также мощность импульса, определены пределы варьирования факторов (табл. 1).

Таблица 1.

Факторы, влияющие на отклик функции

Фактор		Уровни варьирования факторов					
		Минимальный		Основной		Максимальный	
Наименование	Обозначение	число	код	число	код	число	код
Длительность импульса, (Фактор x_1)	τ, нсек	4	-1	102	0	200	+1
Частота лазерного излучения (Фактор x_2)	F, Гц	1,6	-1	50,3	0	99	+1
Скорость маркировки(Фактор x_3)	S, мм/с	1	-1	90	0	179	+1
Мощность импульса (Фактор x_4)	P, Вт	1	-1	50,5	0	100	+1

Для проведения полного факторного эксперимента было проведено 16 опытов, так как количество факторов равно 4: $2^4=16$. В общем виде уравнение регрессии представлено в следующем виде:

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_4x_4+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+b_{14}x_1x_4+b_{23}x_2x_3+b_{24}x_2x_4+b_{34}x_3x_4+b_{123}x_1x_2x_3+b_{234}x_2x_3x_4+b_{124}x_1x_2x_4+b_{134}x_1x_3x_4+b_{1234}x_1x_2x_3x_4.$$

На основе полученных результатов экспериментов и составленной матрицы четырехфакторного полного эксперимента были рассчитаны коэффициенты уравнения и получен окончательный вариант уравнения регрессии:

$$Y=11,84+0,84x_1+0,79x_2+0,79x_3+0,71x_4-0,81x_1x_2-0,76x_1x_3-0,89x_1x_4-0,66x_2x_3-0,79x_2x_4-0,79x_3x_4+0,79x_1x_2x_3+0,81x_1x_2x_4+0,81x_1x_3x_4+0,86x_2x_3x_4-0,73x_1x_2x_3x_4.$$

Определение значимости коэффициентов уравнения регрессии проводилось по критерию Стьюдента: $S_{коэф} = 0,274$. Сравнивая коэффициенты уравнения с рассчитанным значением критерия Стьюдента, получили, что все коэффициенты значимы.

Далее проводилось определение адекватности уравнения по критерию Фишера: $F_{расч} = 1,56$. Сравнивая с табличным значением критических точек распределения Фишера: $F_{табл}= 3,98$, получаем, что $F_{расч} < F_{табл}$, это означает то, что уравнение регрессии адекватно.

Интерпретируя коэффициенты уравнения получилось, что наибольший отклик функция имеет при сочетании факторов x_1x_4 - так как они имеют наибольший по абсолютной величине коэффициент. Далее по силе влияния на отклик идет: тройное взаимодействие $x_2x_3x_4$, а также тройные взаимодействия $x_1x_2x_4$ и $x_1x_3x_4$ и двойное взаимодействие x_1x_2 – остальные факторы и их сочетания играют меньшую роль.

Так как все 4 одинарных фактора x_1, x_2, x_3, x_4 положительны, то с увеличением этих факторов растет отклик. Коэффициенты при x_1x_2, x_1x_3, x_1x_4, x_2x_3, x_2x_4, x_3x_4 отрицательны, это означает, что с уменьшением взаимодействующих факторов значение отклика будет возрастать, а с увеличением – убывать.

Таким образом определены факторы и их сочетания, имеющие наибольшее влияние на получение значения цвета в системе RGB максимально приближенного к черному цвету.

В конце приведена схема функционирования системы, включающей в себя НБК. Приведены рекомендации по виду используемого лазерного оборудования и методов нанесения кода на поверхность изделий. Описаны требования к устройствам считывания и вывода информации, содержащейся в коде. В конце перечислены этапы функционирования всей системы НБК и подведены итоги, в которых даны рекомендации по использованию НБК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гарькушев А.Ю.* Комплексная система защиты изделий от контрафакта, как дополнительная степень обеспечения информационной безопасности предприятия / А.Ю. Гарькушев, Е.В. Ларионова, Е.А. Захаренко // Вопросы оборонной техники. - С. 106-108.
2. Патент №2656734 «Способ кодирования и декодирования в виде Нанобар-кода», 06.06.2018.
3. *Пряхин Е.И., Ларионова Е.В.* Новый многофункциональный двухмерный матричный код с новыми возможностями – НАНОБАР-КОД.
4. *Пряхин Е.И., Ларионова Е.В., Захаренко Е.А.* Нанобар-код – многофункциональная система идентификации и защиты продукции / Фотоника, 2016. 6.
5. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Издательство «Наука», 1976. – 279 с.

УДК 621.762.04

ИГОШИН С.Д.,
МАСАЙЛО Д.В.,
ОРЛОВ А.В.,
ПОПОВИЧ А.А.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЬ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МАРГАНЦА МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Аннотация. Длительная эксплуатация металлоконструкций, трубопроводов и штампов приводит к их износу и разрушению. По истечению срока эксплуатации необходимо проводить ремонт или замену металлического компонента. В статье рассматривается метод нанесения никелевого суперсплава Inconel 625 прямым лазерным выращиванием на высоколегированную аустенитную Mn-Cr сталь. Сплав Inconel 625 может выполняет функцию буферного слоя при ремонте этой стали. Но при наплавке на эту сталь высокая вероятность возникновения трещины в зоне диффузионного перемешивания. Для устранения дефектов использован подгорев подложки с помощью резистивных нагревателей до 400 ˚С. В результате была получена бездефектная адгезия материала наплавки и подложки. Твердость подложки до и после подогрева не изменилась и равна 312 HV 0,5/10, после подогрева твердость подложки в зоне термического влияния уменьшилась на 14 % и равна 267 HV 0,5/10, твердость наплавки уменьшилась на 12 % и равна 230 HV 0,5/10.

Ключевые слова: Аддитивные технологии; прямое лазерное выращивание; суперсплав Inconel 625; ремонт и восстановление.

IGOSHIN S.D.,
MASAYLO D.V.,
ORLOV A.V.,
POPOVICH A.A.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

DIRECT LASER DEPOSITION OF MULTILAYER COATING ON HIGH MANGANESE STEEL

Abstract. Metal structures, pipelines and dies used for a long time wear out and deteriorate. At the end of the service life it is necessary to repair or replace the metal component. The article discusses the method of applying nickel super-alloy Inconel 625 by direct laser deposition on high-alloy austenitic Mn-Cr steel The article discusses the method of applying nickel super-alloy Inconel 625 by direct laser deposition on high-alloy austenitic Mn-Cr steel. Inconel 625 alloy is used as a buffer layer or repair material. Cracks occur in the diffusion zone of two alloys during the cladding process. To eliminate defects, the substrate was heated with resistive heaters to 400℃. The result was a defect-free adhesion of the cladding material and the substrate. The hardness of the substrate before and after heating has not changed (312 HV 0,5/10). After heating the hardness of the substrate in the heat-affected zone decreased by 14% and equal to 267 HV 0,5/10. The hardness of the cladding decreased by 12% and equal to 230 HV 0,5/10.

Keywords: Additive technologies; direct laser deposition; Inconel 625 superalloy; repair and restoration.

ВВЕДЕНИЕ

Такие немагнитные безникелевые стали, как аустенитные стали с большим содержанием легирующих элементов Mn (20%) и Cr (20%), имеют гораздо более высокий предел текучести, чем обычные нержавеющие стали, а их высокая коррозионная стойкость и высокая прочность делают их особенно выгодными в медицинской, аэрокосмической и нефтяной промышленности. Но высокая прочность, также делает эти стали трудными для обработки с относительно коротким сроком эксплуатации [1, 2]. Для обеспечения экономичности производства, возможно, ремонт изделий может оказаться выгоднее, полной замены компонента из такой стали. Для этих целей, кроме методов газотермического осаждения покрытий [3], можно применить технологии аддитивного производства, которые получили большое развитие в мире за последнее десятилетие. Технология аддитивного производства, которая называется прямое лазерное выращивание (далее ПЛВ) позволяет выращивать объем материала из различных сплавов, на металлических изделиях, устойчивых к высокой температуре [4,5]. Например, в качестве подложки (изделие, требующее ремонта) могут применяться как низколегированные стали, например, Ст3, так и высоколегированные с большим содержанием элементов Ni, Cr, Mn и др [6–9]. Принцип работы технологии представлен на рис. 1.

Многие физико-химические процессы в ПЛВ схожи с классической технологией сварки. Поэтому теоретические основы, разработанные для сварки такие как оценка свариваемости, образования дефектов и влияние зоны термического влияния (далее ЗТВ) в наплавленном слое или подложке, возможно в общем случае применить при объяснении процессов в металле в технологии ПЛВ.

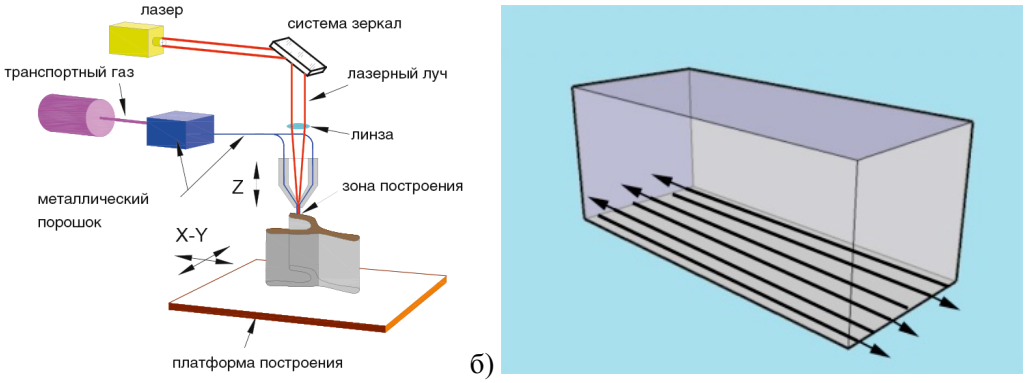


Рисунок 1 – Схема построения изделия по технологии ПЛВ (а), принцип построения объёма материала по технологии ПЛВ (б), где стрелками обозначено перемещение наплавочной головы

Хромоникелевый суперсплав Inconel 625 (основные элементы Ni-58%, Cr -20%, Fe-5%, Mo-8%, Nb-3,5%) зарекомендовал себя как технологичный материал для восстановления компонентов, работающих в условиях повышенных температур, а также для создания буферных слоев для других функциональных сплавов [10].

В этой работе рассматривается нанесение буферного слоя из сплава Inconel 625 с подложкой из высоколегированной Mn-Cr стали при комнатной температуре и с подогревом подложки до 400 °C.

МЕТОД И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве оборудования для ремонта использована установка для ПЛВ (рис. 2), которая состоит из следующих компонентов: непрерывный иттербиевый волоконный лазер ЛС-3, максимальной мощностью 3 кВт, порошковый питатель, 5-ти осевой робот Fanuk.

Наплавка осуществлялась на подложку из Mn-Cr стали, на которую наносился суперсплав Inconel 625, в виде порошка с гранулометрическим составом порошка 50-125 мкм.

Подогрев подложки производился с помощью специально разработанной системы с возможностью подогрева до 600° С. Охлаждение на воздухе вместе с нагревательными элементами. Схема устройства нагревателя представлена на рис. 3.

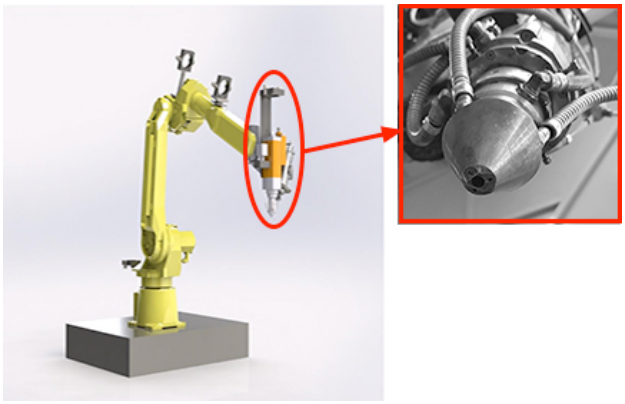


Рисунок 2 – Схема установки ПЛВ

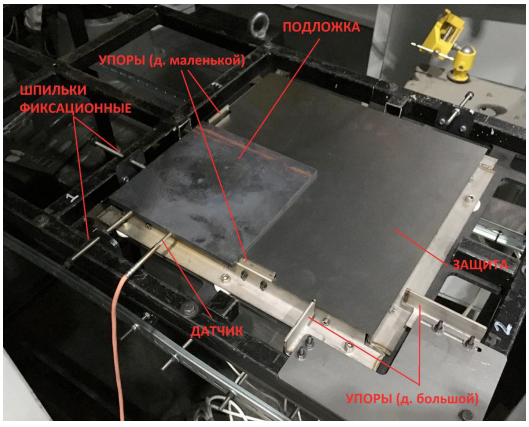


Рисунок 3 – Внешний вид системы для подогрева подложки

Подготовка образцов к исследованию осуществлялось с помощью шлифовки с последующей полировкой. Химическое травление проводилось составом 10 мл H_2O, 30 мл HCl, 1,5 мл H_2O_2.

Исследование ЗТВ и структуры образцов исследовались с помощью оптического микроскопа и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) с приставкой для энергодисперсионного рентгеновской спектроскопии.

В начале эксперимент осуществлялся с нанесением буферного слоя без подогрева подложки по режиму, представленному в табл. 1.

Таблица 1.

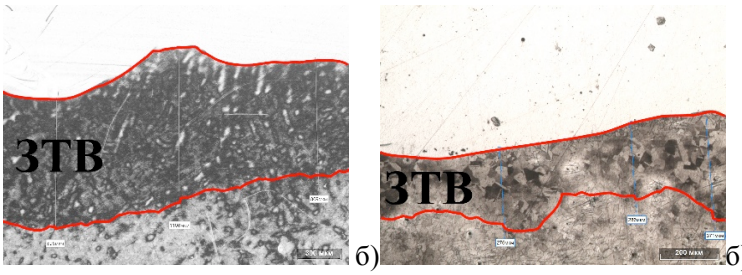
Параметры процесса наплавки методом ПЛВ

Параметр	Значение	Единицы измерения
Мощность лазера	1200	Вт
Ширина пятна	3	мм
Скорость движения робота	12	мм/с
Расход порошкового материала	15	г/мин
Расстояние между треками	1,5	мм
Высота подъема	0,6	мм

Затем, был проведен эксперимент с подогревом подложки 400 ˚С с поддержанием этой температуры во время процесса выращивания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ЗТВ, которая определялась с помощью химического травления и измерения ширины переходной зоны средствами оптической микроскопии, которая представлена на рис. 4.



а) б) б)

Рисунок 4 – Оценка ЗТВ с помощью оптической микроскопии:
Сверху наплавка – Inconel 625, снизу подложка из стали Mn-Cr, где а – фотография структуры без подогрева, б – фотография структуры с подогревом

Средняя величина ЗТВ для наплавки без подогрева по результатам трех измерений определена как 1 мм, для наплавки с подогревом 0,3 мм. ЗТВ после применения наплавки с подогревом значительно уменьшилась. Возможно, это связано с уменьшением градиента температур в процессе наплавки и охлаждения.

Далее, была проведена оценка качество зоны перехода наплавка-подложка. Результат представлен на рис. 5.

Как видно на рисунке 5.а, по краям ванн от каждого трека образовались трещины, которые отсутствуют в образце с подогревом. С помощью СЭМ исследованы трещины и выявлены причины их образования – оксидные включения, которые приводят к образованию трещин (рис. 6).

а)

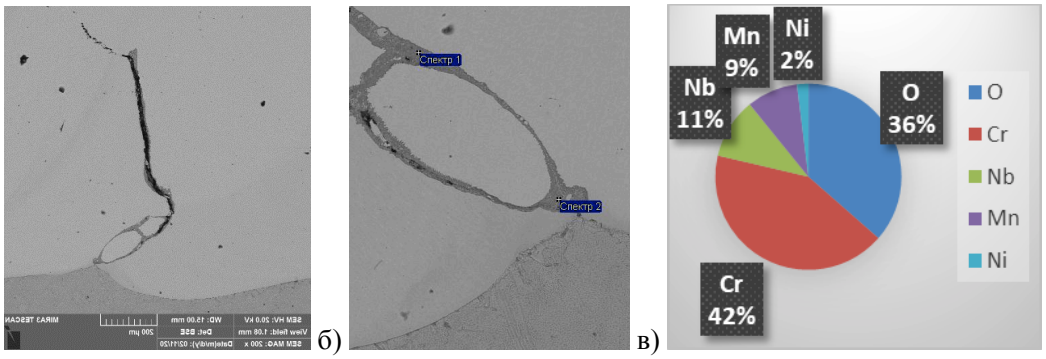
б)

Рисунок 5 – Панорама зоны перехода наплавка-подложка для исследования наличия дефектов:
а – без подогрева подложки, б – с подогревом подложки

Как видно из анализа химического состава, основной компонент этих трещин это хром, который в большом количестве содержится как в подложке, так и в наплавляемом сплаве. По предыдущему опыту работы со сплавом Inconel 625, а также опираясь на результаты работ других учёных с этим сплавом [10–13], этот сплав не склонен к образованию трещин при восстановлении изделий из свариваемых сталей, у которых значение углеродного эквивалента $C_{экв} < 0,2$ [14]. Подложка, которая применяется в этой работе высоколегированная и обладает уменьшеным коэффицентом теплопроводности и

больший коэффициент линейного расширения, что приводит к возникновению значительных внутренних напряжений. Преполагается, это и является причиной разрушения и роста трещин, концентратором для которых являются оксидные включения.

Также стоит отметить, что при применении подогрева на краях ванн от каждого трека образуются вытянутые зоны игольчатой формы с химическим составом приближенным к материалу подложки. Но наличие отдельных оксидных включений, как в ваннах которые образованы без подогрева подложки выявлено не было.

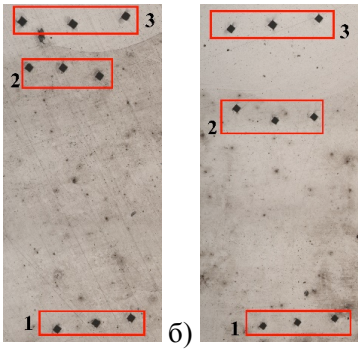


а) б) в)

Рисунок 6 – СЭМ изображение трещины (а), оксиды в её основании (б) диаграмма среднего химического состсава оксидов (в)

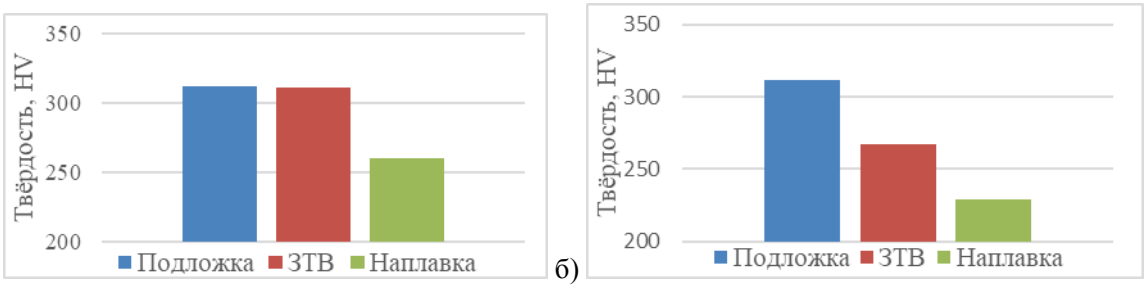
Чтобы оценить свойства материалов с применением подогрева и без него измерена микротведость в трех зонах: 1 – материал подложки, 2 – ЗТВ подложки, 3 – материал наплавки. Эти области представлены на рис. 7.

Результаты измерения отображены в виде гистограммы и представлены на рис. 8.



а) б)

Рисунок 7 – Области измерения микротвердости, а – для образца без подогрева, б – для образца с подогревом



а) б)

Рисунок 7 – Твёрдость образцов:
а – без подогрева подложки, б -с подогревом подложки

Твёрдости подложки в массиве материала не отличаются при обоих режимах наплавки. В то время как твёрдость в ЗТВ с применением подогрева уменьшилась на 14 % и равна 267 HV 0,5/10, твердость наплавки уменьшилась на 12 % и равна 230 HV 0,5/10.

Причиной уменьшения твёрдости связано с меньшими скоростями охлаждения, что уменьшает величину закалочных напряжений.

ВЫВОДЫ

1. Отработанная технология наплавки многослойного покрытия из Inconel 625 на высоколегированную стальную Mn-Cr подложку методом прямого лазерного выращивания с применением подогрева подложки. Такое покрытие может выполнять функцию буферного слоя, для других функциональных материалов.

2. Исследована адгезия перехода наплавка-подложка при осаждении материала с подогревом подложки и без подогрева подложки. Определено, что основной причиной возникновения трещин малой длинны в материале наплавки могут служит оксидные включения и значительные закалочные напряжения. Подогрев подложки в процессе наплавки устраняет эти дефекты, по причине уменьшения термических напряжений и увеличенному времени протекания диффузионных процессов.

3. Твердость подложки до и после подогрева не изменилась и равна 312 HV 0,5/10, после подогрева твердость подложки в ЗТВ уменьшилась на 14 % и равна 267 HV 0,5/10, твердость наплавки уменьшилась на 12 % и равна 230 HV 0,5/10.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anderson M.C., Shin Y.C.* 2006 Laser-assisted machining of an austenitic stainless steel: P550 *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 220(12) 2055–2067.
2. *Wang B.X., Liu X.H., Wang G.D.* 2005 Dynamic recrystallization behavior and microstructural evolution in a Mn-Cr gear steel *Mater. Sci. Eng. A* 393(1–2) 102–108.
3. *Maksarov V., Krasnyy V.* 2017 The Formation of Surface Roughness of Piston Rings for the Purpose of Improving the Adhesion of Wear-Resistant Coatings *Key Eng. Mater*. 736. 73–78.
4. *Gibson I., Rosen D., Stucker B.* 2015 Directed Energy Deposition Processes *Additive Manufacturing Technologies. New York, NY: Springer New York* 245–268.
5. *Thompson S.M. et al.* 2015 An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics *Addit. Manuf*. 8 36–62.
6. *Guo P. et al.* 2017 Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition *J. Mater. Process. Technol*. 240. 12–22.
7. *Ziętala M. et al.* 2016 The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping *Mater. Sci. Eng. A*.. T. 677. 1–10.
8. *Xu P. et al.* 2014 Wear and corrosion resistance of laser cladding AISI 304 stainless steel/Al2O3 composite coatings *Surf. Coatings Technol*. 238. 9–14.
9. *Huang W. et al.* 2019 Mechanical properties of 304 austenite stainless steel manufactured by laser metal deposition *Mater. Sci. Eng. A*. 758 60–70.
10. *Chakraborty G. et al.* 2016 Effect of Alloy 625 Buffer Layer on Hardfacing of Modified 9Cr-1Mo Steel Using Nickel Base Hardfacing Alloy J. *Mater. Eng. Perform.* 25(4) 1663–1672.
11. *Feng K. et al.* 2017 Improved high-temperature hardness and wear resistance of Inconel 625 coatings fabricated by laser cladding *J. Mater. Process. Technol.* 243 82–91.
12. *Masaylo D.V., Orlov A.V., Igoshin S.D.* 2019 Effect of Heat Treatment on the Structure and Phase Composition of a High-Temperature Nickel Alloy Obtained by Laser Cladding *Met. Sci. Heat Treat.* 60(11–12) 728–733.
13. *Masaylo D. et al.* 2020 Effect of process parameters on defects in large scale components manufactured by direct laser deposition *Mater. Today Proc.*
14. ГОСТ 23870-79 Свариваемость сталей. Метод оценки влияния сварки плавлением на основной металл. - М.: Издательство стандартов, 1982 - 10 с.

УДК 669.243

КИРОС КАБАСКАНГО В.Э.,
БАЖИН В.Ю.
Санкт-Петербургский горный университет

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОКСИДА НИКЕЛЯ В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ CO / CO_2 В ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Аннотация. Выполнены лабораторные исследования по восстановлению оксида никеля в отражательной печи с газовыми горелками при температурах от 400ºС до 1050ºС. Микроструктуры никелевых продуктов и частично восстановленных образцов металлического никеля были проанализированы с помощью сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения.
Доказано, что процесс восстановления может привести к образованию на поверхности расплава плотного слоя никеля при непрерывном росте газообразных пор в NiO.
В холе исследования выполнена поэтапная оценка технологического процесса и научное обоснование процесса восстановления никеля при состоянии химического равновесия идеальной газовой смеси с учетом необходимых ограничений переменных и параметров плавки.

Ключевые слова: газовые отражательные печи, никелевые сплавы, автоматизация, температура плавления, никель.

QUIROZ CABASCANGO V.E.,
BAZHIN V.YU.
Saint-Petersburg Mining University

NICKEL OXIDE REDUCTION IN CO/CO2 GAS MIXTURES IN REFLECTIVE FURNACES

Abstract. Laboratory studies on the reduction of nickel oxide in a reflective furnace with gas burners were performed at temperatures from 400ºC to 1050ºC. The microstructures of nickel products and partially reduced metal nickel samples were analyzed using high resolution scanning electron microscopy.
It is proved that the reduction process can lead to the formation of a dense nickel layer on the melt surface with continuous growth of gaseous pores in NiO.
In the study hall, a step-by-step evaluation of the technological process and scientific substantiation of the nickel reduction process under the state of chemical equilibrium of an ideal gas mixture were carried out, taking into account the necessary limitations of the variables and melting parameters.

Keywords: gas reflective furnaces, nickel alloys, automation, melting point, nickel.

Изучение процессов восстановления оксида никеля в виде прессованного брикета на подложке проводили в лабораторной печи интервале температур 400-1050 °С в атмосфере чистого CO (давление - 1 атм). На рис. 1 представлена схема установки.

Задавая температуру и общее давление либо парциальное давление одного из газовых компонентов (CO-CO_2) можно полностью определить состояние системы. В данном случае реакция идет без изменения числа молей газовых компонентов, и общее давление не влияет на состояние системы, соотношение CO/CO_2, а определяющее

константу равновесия общее содержания газов будет зависеть только от температуры, тогда в данном случае система моновариантна [1, 2].

При температуре 550-1050 °С были обнаружены капли металлического никеля Ni, при дальнейшем нагреве до 950 °С рост плотного металлического слоя никеля на поверхности NiO. Образование промежуточных фаз металлического Ni на поверхности расплава (закристаллизовавшего образца) во время восстановления в атмосфере CO можно наблюдать непосредственно с помощью оптического микроскопа [3-5].

Научный подход заключается в снижении погрешностей, связанных с первоначальным размером частиц (капель), пористостью и геометрией образца, а также с потенциальными изменениями при фазообразовании в совокупности с кинетическими особенностями реакции восстановления, с учетом уменьшение плотности образцов NiO.

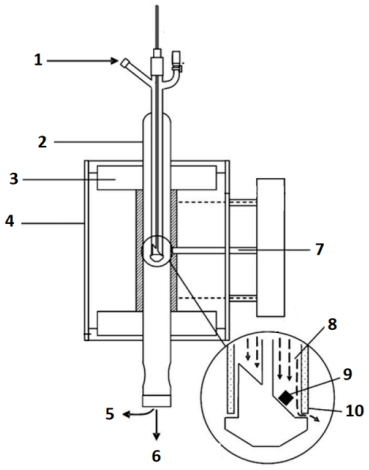


Рисунок 1 – Схема установки:
1 - ввод газа, 2 - реакционная трубка, 3 - огнеупор, 4 - оцинкованный стальной корпус, 5 - газ в систему очистки, 6 - разгрузка образца, 7 - термопара тип H, 8 - газовый поток, 9 - образец, 10 - внутренняя реакционная труба

Трубчатая электрическая печь была использована для нагрева реакционной трубки. Эксперимент по восстановлению проводился в CO+CO_2. Потоки газа точно контролировались с использованием различных расходомеров парциального давления газа и полностью смешивались перед вводом в реакционную трубу через колонку, заполненную стеклянными шариками. Отдельные образцы NiO были введены непосредственно в горячую зону кварцевой восстановительной трубки через вход в воздушную пробку в верхней части устройства. Образец упал под действием силы тяжести в реакционной пробирке. После необходимого периода восстановления частично прореагировавший образец будет извлечен путем понижения стержня оксида алюминия на несколько мм. Экспериментальные температуры и составы газов, использованные в настоящем исследовании, приведены в табл 1.

Свободная энергия Гиббса (ΔG) или движущая сила для реакции восстановления была рассчитана в каждом случае с использованием следующего соотношения:

$$\Delta G = -2RTln\left[\frac{(pCO/pCO_2)_{газ}}{(pCO/pCO_2)_{\frac{Ni}{NiO}}}\right] \text{ дж (моль } O_2)^{-1}, \quad (1)$$

где (pCO/pCO_2) представляет собой отношение CO к CO_2 в объемном газе и (pCO/pCO_2) это отношение CO к CO_2 на границе раздела Ni/NiO, последнее равно коэффициенту равновесия.

Константы равновесия для восстановления NiO в CO/CO_2 описываются следующим уравнением:

$$NiO_{(тв.)} + CO_{(г)} \rightarrow Ni_{(тв.)} + CO_{2(г)}. \quad (2)$$

Газовые смеси были выбраны таким образом, чтобы создать термодинамическую движущую силу для восстановления 30, 120 и 150 кДж/моль$^{-1}$ O_2, удаленного из оксида при выбранных температурах. Осаждение твердого углерода описывается реакцией:

$$2CO_{(г)} \rightarrow C_{(тв.)} + CO_{2(г)} \quad (3)$$

и образование карбида никеля, Ni_3C в результате реакции:

$$3Ni_{(тв.)} + 2CO_{(г)} \rightarrow Ni_3C_{(тв.)} + CO_{2(г)}. \quad (4)$$

Таблица 1.

Изменение температуры и условия подачи газовой смеси (CO + CO_2)

T, ºC	Условия реакции в (CO + CO_2) *P* =1 атм (об. % CO)		*Kp* (NiO+CO→Ni+ CO_2)	*Kp* *(2CO→C+CO_2)*	*Kp* *(3NiO+3CO→Ni_3 C+2CO_2)*
400	1,3	86,2	98,2	628	1,18.10
566-796	2,5	82,1	96,3	182,6	1, 5.10^{-1}
847-1099	5,2	79	93,9	77,9	7,45.10^{-2}
ΔG (кДж/ моль$^{-1}$ O_2)	30	120	150		

Константы равновесия были получены при давлении1 атм и использовании чистых твердые соединений в качестве стандартных образцов.

Результаты микроструктурного исследования и полученные кинетические зависимости процесса восстановления оксида никеля в условиях изменяющегося состава природного газа горелок печи в различных температурных интервалах показало, что может быть сформирован ряд различных структур продуктов при различном взаимодействии газовых смесей CO/CO_2.

Доказано, что многоступенчатый или прерывистый механизм реакций роста металлизированной фазы никеля возможен при изменении условий подачи газовой смеси и в заданном температурном интервале. Это дает возможность внести корректировки в автоматизированную систему управления газовыми горелками среднего давления отражательной печи согласовав данные температуры процесса с составом подаваемого газа для обеспечения термодинамических условий протекания процесса полного восстановления оксида до металлического никеля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Diomidovsky D.A.* 1967 Control and automation of processes in non-ferrous metallurgy *Metallurgizdat Moscow* p. 403.
2. Galnbek A.A. 1976 The continuous combined process of smelting and converting sour copper-nickel raw materials *Non-ferrous metals* 4 16–17.
3. *Kaiser G., Leitner G.* 1994 Temperature calibration of thermo-balances with nickel-iron-nickel-bimetal *Journal of thermal analysis* 42 919-924.
4. *Noboru S., Tadashi Ch., Teiriki T.* 1988 Reduction of Nickel Oxide with Carbon Monoxide 4. Accompanied by Carbon Deposition *J-STAGE* 14(3) 368–373.
5. Yang X.E., Baligar V.C., Foster J.C., Martens D.C. 1997 Accumulation and transport of nickel in relation to organic acids in ryegrass and maize grown with different nickel levels *Plant and Soil* 196 271-276.

УДК 539.3 + 551.3 + 629.1

КОВАЛЕВ С.М.
Арктический и антарктический НИИ
(ФГБУ ААНИИ)
ПАВИЛАЙНЕН Г.В.
Санкт-Петербургский государственный
университет (СПбГУ)

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ЛЬДА НА ИЗГИБ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ОПОР ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. Строительство морских буровых платформ и других конструкций на шельфе замерзающих морей является актуальной государственной задачей.Одной из проблем является разработка эффективных методов расчета сооружений при учёте воздействия льда и способов снижения этого воздействия. В работе исследуется упругопластический изгиб металлических вертикальных опор гидротехнических сооружений под действием горизонтальной сосредоточенной нагрузки, которая моделирует давление ледового поля.

Ключевые слова: упругопластический изгиб, вертикальная балка, давление льда, локальная прочность.

KOVALEV S.M.
Arctic and Antarctic Research Institute (AARI),
St. Petersburg, Russia
PAVILAYNEN G.V.
Saint Petersburg University, St. Petersburg, Russia

INFLUENCE OF ICE PRESSURE ON THE BEND OF VERTICAL SUPPORTS OF HYDROTECHNICAL STRUCTURES

Abstract. The construction of offshore drilling platforms and other structures on the shelf of the freezing seas is an urgent state task. One of the problems is the development of effective methods for calculating structures taking into account the effects of ice and ways to reduce this impact. The work examines the elastic-plastic bending of metal vertical supports of hydraulic structures under the action of a horizontal concentrated load, which simulates the pressure of the ice field.

Keywords: elastoplastic bending; vertical beam; icepressure; local strength.

Строительство морских буровых платформ и других конструкций на шельфе замерзающих морей является актуальной государственной задачей. Возникает целый спектр научных проблем: проектирование надёжных конструкций, обеспечение их работы в экстремальных условиях, снижение себестоимости строительства за счет увеличения срока службы и др. Одной из проблем является разработка эффективных методов расчета сооружений при учёте воздействия льда и способов снижения этого воздействия. Уже предложены феноменологические модели и развиваются подходы, связанные с компьютерным моделированием процессов взаимодействия ледовых полей с препятствиями [1, 2].

Традиционно физико-механические свойства льда изучаются на основании экспериментов по одноосному сжатию кернов и образцов, выбуренных параллельно поверхности ровных ледяных полей, торосов, стамух и айсбергов. Чтобы приготовить

такие образцы сначала в ледяном покрове выпиливается блок льда. Затем этот блок извлекается на поверхность. На блоке выделяются нужные горизонты, размечаются конкретные места и затем выбуриваются керны льда. На специальном станке, обеспечивающем плоскопараллельность торцов, образцы обрезаются до нужного размера и только после этого проводятся их испытания на гидравлическом прессе. Все эти операции требуют определённого времени. При этом воздействия внешних факторов, таких как солнечная радиация и температура воздуха приводят к уменьшению прочности образцов льда. А это, в свою очередь ведёт к ошибкам при расчёте прочности сооружений. Приведём пример. В 2015 году в акватории Финского залива, вблизи строящегося нового Усть-Лужского порта планировалось строительство надводной метеорологической станции. В летнее время были забиты сваи по прямоугольному периметру, изготовленные из металлических труб, заполненных армированным бетоном. На сваи планировалось установить рабочую платформу с научным оборудованием для обеспечения безопасности прохождения судов по фарватеру. Но платформу на опоры установить не успели и в зимний период давление ледяного поля, толщиной до 1,5 м было таким, что вертикальные сваи «собрались в пучок» (см. фото на рис. 1). Вокруг опор образовались ледяные торосы высотой до 3 м, а сами опоры получили необратимую пластическую деформацию при изгибе (см. схему на рис. 2).

Рисунок 1 - Упругопластический необратимый изгиб металлических опор

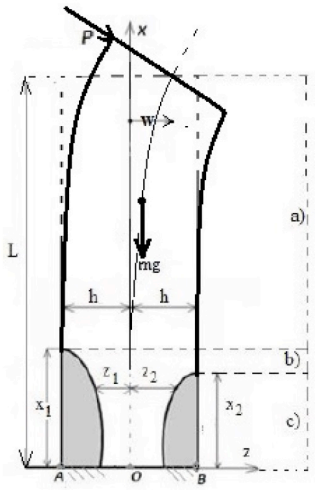


Рисунок 2 - Математическая модель изгиба

В Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ФГБУ ААНИИ) в рамках Целевой научно-технической программы Роскомгидромета в 2020–24 годах разрабатывается тема «Исследование крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов с целью совершенствования методов краткосрочного прогнозирования сжатия и торошения». Для успешной реализации этой темы разработаны методики определения прочности льда при сжатии и изгибе [3, 4]. Был разработан способ определениялокальной прочности льда при сжатии в натурных условиях с помощью скважинного зонд-индентора. На основании измерений разрушающих напряжений по толщине льда строились вертикальные распределения прочности льда, что позволяет оценивать неоднородность прочности при сжатии по толщине льда и разрабатывать эффективные методики его крошения.

В научной литературе исследуются различные виды воздействия льда на сооружения: статическое воздействие, возникающее при формировании ледяного покрова и его расширении при снижении окружающей температуры воздуха, воздействие динамической природы от движущихся ледяных полей или образованием торосов, воздействие сил трения от соприкосновения с колеблющимся льдом вблизи сооружения.

В условиях арктического шельфа статическое воздействие льда, имеющее значение главным образом для сооружений большой протяженности, несущественно. Наиболее опасно воздействие от движущегося ледяного образования, особенно для отдельно стоящих сооружений. Значительным может быть изгиб несущих опор при подходе крупного ледяного поля.

Исследования упругопластического изгиба вертикальных металлических опор, проводимые в Санкт-Петербургском государственном университете в рамках гранта РФФИ 20-01-00208, позволяют оценить величины допустимого бокового давления при изгибе и провести расчёты с учетом веса конструкций и воздействием гидростатического давления на опоры [5]. Ранее было получено аналитическое решение для прогиба опор при учёте боковой нагрузки и перехода конструкции в упругопластическую стадию деформирования [6], а затем получено аналитическое решение при учёте пластической анизотропии материала опоры и определены предельные нагрузки появления пластичности и критическая нагрузка образования вблизи защемления внизу опоры «пластического щарнира» [7].

При определении ледового давления в нормативных документах используется прочность льда при одноосном сжатии и не учитывается сильная анизотропия льда как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. На рис. 3 приведены результаты исследований С.М. Ковалёва, одного из авторов данной статьи, по морю Уэдделла (Антарктида) (рис. 3).

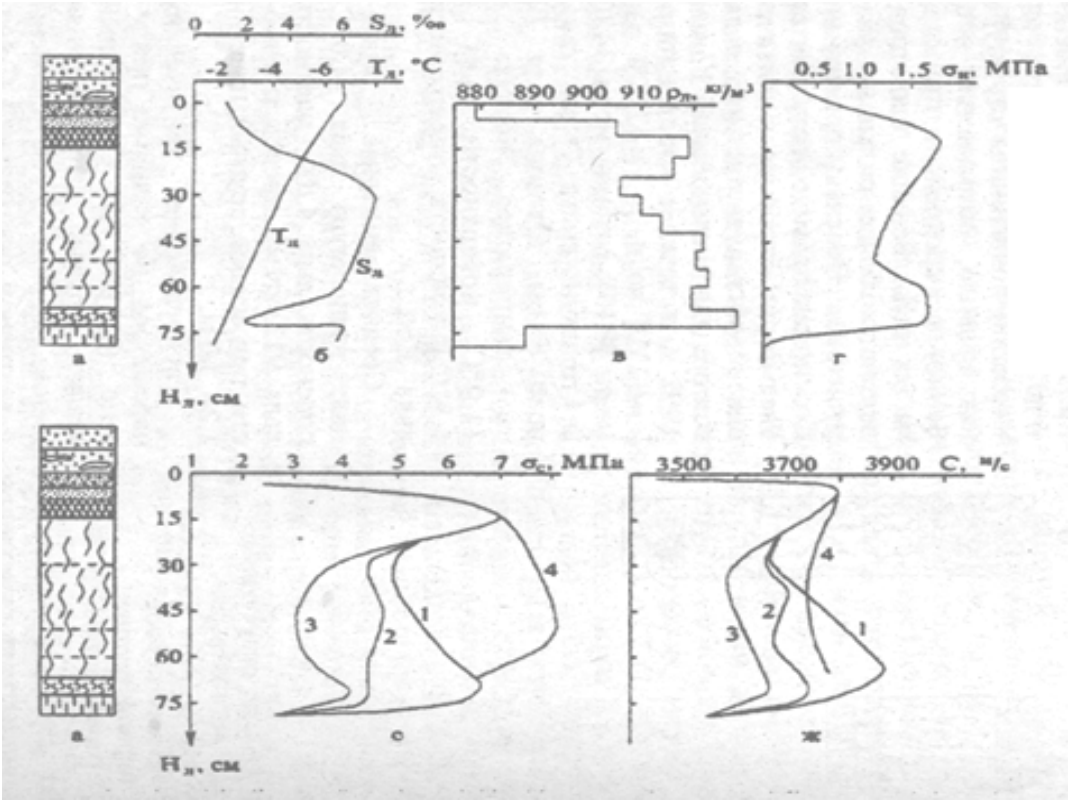


Рисунок 3 – Результаты исследований С.М. Ковалёва:
а) – схема вертикальной структуры двухлетнего льда, б) – распределение по толщине температуры и солености, в) – плотность, г) – предел прочности при изгибе, е) – предел прочности при одноосном сжатии, ж) – скорость распространения продольных ультразвуковых волн.
Цифрами обозначены различные ориентации: 1 – ориентация «90:00», 2 – ориентация «90:45», 3 – ориентация «90:90», 4 – ориентация «00:90»

Сравнение кривых 3 и 4 на диаграмме е) показывает, что прочности при одноосном сжатииразличаются 2 раза. Поэтому для уточнения критериев прочности надо использовать локальную прочность льда, которая определяется при анализе сложного

трехосного напряженного состояния и анизотропия менее выражена. Прочностные характеристики льда (в том числе и локальная прочность) неоднородно распределяются по площади ледяного покрова и могут существенно различаться даже на небольшом расстоянии. Работы на полигонах позволяют получить пространственные неоднородности локальной прочности льда и «слабые» места, в которых операции по разрушению льда будут наиболее эффективны. На рис. 4. представлены результаты натурных исследованийв море Лаптевых на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова».

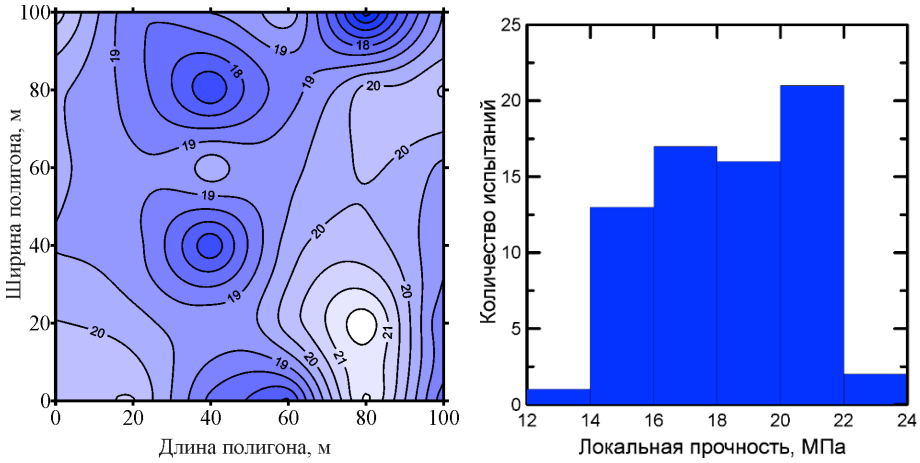


Рисунок 4 – Неоднородность средних по толщине значений локальной прочности на ледовом полигоне в мае 2016 года и статистика по количеству испытаний

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беккер А.Т.* Разработка методов расчета вероятностных характеристик ледовых нагрузок для оценки надежности сооружений континентального шельфа. - Владивосток, 1998. - 453 с.
2. *Политько В.А.* Расчет морских ледостойких сооружений на действие ледовых нагрузок с учетом российских строительных норм / В.А. Политько, И.Г. Кантаржи // Гидротехническое строительство. № 1. СПб, 2017. С. 27-35.
3. *Ковалёв С.М.* Универсальная модульно-блочная система мониторинга состояния ледяного покрова / В.Н. Смирнов, М.С. Знаменский, С.М. Ковалёв, А.И. Шушлебин // Патент на изобретение № 2683806 от 02.04.2019.
4. *Ковалёв С.М.* Инструментальный мониторинг и краткосрочный прогноз явлений сжатия и торошения в морских льдах / В.Н. Смирнов, С.М. Ковалев, В.А. Бородкин, А.А. Нюбом, А.И. Шушлебин // СПб.: ААНИИ, 2017. - 174 с.
5. *Лачугин Д.В.* Упруго-пластический изгиб разнопрочной вертикальной консоли под действием сосредоточенной нагрузки на свободном конце / Российско-китайский научный журнал «Содружество» раздел Физико-математические науки. - 2016. - № 2(2). - С. 32-35.
7. *Павилайнен Г.В.* К вопросу упруго-пластического деформирования конструкций. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. - 1992. - № 1. - С. 67-73.
8. *Pavilaynen G.V.* 2015 Mathematical model for the bending of plastically anisotropic beams *Vestnic of the St. Petersburg University: Mathematics* 48(4) 275-279.

УДК621.7.092:681

КОНЧУС Д.А.,
СИВЕНКОВ А.В.
Санкт-Петербургский горный университет

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Аннотация. В данной работе рассматривается процесс нанесения лазерной маркировки на коррозионностойкую сталь 08Х18Н10 при помощи лазерной системы «МиниМаркер2–20А4». Проанализированы возможности оптимизации параметров нанесения маркировки методом планирования эксперимента. Проведены расчеты наиболее оптимального режима нанесения маркировки для получения наибольшего контраста.

Ключевые слова: лазерная маркировка, контрастность, оптимизация режимов.

KONCHUS D.A.,
SIVENKOV A.V.
Saint-Petersburg Mining University

LASER MARKING MODES OPTIMIZATION BY DESIGNMETHOD

Abstract. The thesis is devoted to the process of laser marking steel AISI 304 with laser system “MiniMarker2 – 20A4”. The opportunities of laser marking optimization were analyzed by the method of experiment planning. The special calculationswere madeto achievethe most optimal modes of laser marking aiming the highest contrast.

Keywords: laser marking, contrast, modes optimization.

Поиск оптимальных параметров нанесения маркировки на нержавеющую сталь производился с использованием метода планирования эксперимента как наиболее применимого для оптимизации технологических процессов. К преимуществам этого метода относят возможность минимальным количеством опытов установить оптимальную область параметра оптимизации и получить математическую модель достижения оптимума [1, 2]. Технология отрабатывалась на нанесении маркировки в виде QR кода на сталь 08Х18Н10 [3-6]. Сталь аустенитного класса применяется в виде холоднокатаного листа и ленты повышенной прочности для деталей и конструкций, свариваемых точечной сваркой, а также для изделий, подвергаемых термической обработке. Сварные соединения, выполненные другими методами сварки, склонны к межкристаллитной коррозии (МКК). Температура окалинообразования 850°С, что дает возможность использования данной стали до температуры 800°С и учитывать эту температуру при локальном нагреве лазером.

В данном эксперименте было выбраны 10 основных технологических характеристик лазера и проанализированы возможности по оптимизации их параметров для нанесения маркировки на нержавеющую сталь, для дальнейшего использования при нанесении маркировки в различных производственных процессах [7-9].

Из 10 имеющихся факторов, исходя из свойств материала, 3 оставили одинаковыми для нанесения подложки и кода. Таким образом для варьирования использовали только 7 факторов которые варьировали на двух уровнях. Исследуемые факторы и выбранные уровни варьирования для нанесения подложки и кода представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1.

Уровни варьирования факторов для подложки

факторы		уровни варьирования факторов						Интервал варьирования ΔX
		минимальный		основной		максимальный		
наименование	обозн.	число	код $-x_i$	число	код x_0	число	код $+x_i$	
Частота *n*, Гц	X_1	60	-1	80	0	100	1	20
Мощность *P*, %	X_4	20	-1	30	0	40	1	10
Скорость *V*, мм/с	X_2	450	-1	600	0	750	1	150
Линиатура *lpi*, лин/мм	X_5	60	-1	75	0	90	1	15
Длительность импульса *τ*, с	X_7	50	-1	100	0	200	1	75

Таблица 2.

Уровни варьирования факторов для кода

фактор		уровни варьирования факторов						Интервал варьирования ΔX
		минимальный		основной		максимальный		
наименование	обозн.	число	код $-x_i$	число	кодx_0	число	код $+x_i$	
Частота *n*, Гц	X_1	60	-1	80	0	100	1	20
Мощность *P*, %	X_4	20	-1	30	0	40	1	10
Скорость *V*, мм/с	X_2	5	-1	10	0	15	1	5
Линиатура *lpi*, лин/мм	X_5	20	-1	35	0	50	1	15
Длительность импульса *τ*, с	X_7	50	-1	100	0	200	1	75

Дробный факторный эксперимент, являясь 1/8 реплики от полного факторного эксперимента 2^7, который помог минимизировать количество опытов со 128 до 16. Получить данную реплику 2^{7-3}можно исходя из определяющего контраста $1 \equiv x_1x_2x_5 \equiv x_1x_3x_6 \equiv x_1x_4x_7 \equiv x_1x_2x_3x_4x_5x_6x_7$ с помощью которого можно оценить линейные эффекты факторов, смешанные с парными взаимодействиями. Что позволяет построить линейную модель [10, 11]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{7} a_i x_i.$$

Был реализован 21 опыт по нанесению QR-кода на сталь 08Х18Н10 сдублированием 5 опытов в центре пана. За функцию отклика выбрали показатель контрастности изображения. С помощью программы Photoshop CC оценивались цветовые показатели подложки и нанесенного на нее кода.

Измерение контрастности производилось по показателям RGB которые имеют диапазон измерений от 0 – абсолютно черный, 255 – абсолютно белый.

После проведения анализа всех образцов получены данные контрастности изображения, представленные в таблице 3.

Для сравнения использовался контраст QR-кода плотностью печати 1200 dpiнанесенного на бумагу 80 г/м^2 с помощью лазерного принтера.

Расчет контрастности (функции отклика) для дальнейшего планирования эксперимента производится по следующей формуле:

$$К = \frac{П_п - П_к}{П_п},$$

где: $П_п$ - показатель RGB подложки; $П_к$ - показатель RGB кода.

При дублировании опыта в центре плана дисперсия опытасоставила $S_y^2 = 0{,}00023$.

Значимость коэффициента проверялась сравнением модуля величины коэффициентаa_i с его доверительным интервалом Δa_i.

В нашем случае доверительный интервал рассчитывался по формуле:

$$\Delta a_i = t * S_{ai},$$

где t – критерий Стьюдента; S_{ai} – среднеквадратическая ошибка в определении коэффициентов регрессии.

В данном случае дисперсия составила $S_{ai} = 0{,}00379$.

При уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ и числе степеней свободы $f_1 = 4$ табличное значение коэффициента Стьюдента $t = 2{,}776$, следовательно $\Delta a_i = 0{,}0105$.

С учетом значимости коэффициентов ($|a_i| \geq \Delta a$), коэффициент a_3статически не значим, тогда функция отклика будет выглядеть следующим образом:

$$y=0{,}661+0{,}065x_1+0{,}026x_2-0{,}045x_4-0{,}015x_5+0{,}024x_6+0{,}091x_7.$$

Таблица 3.

Определение контрастности образцов

Номер образца	RGB подложки	RGB кода	Контрастность
1	144	53	0,63
2	160	47	0,71
3	87	59	0,32
4	138	23	0,83
5	169	54	0,68
6	138	26	0,81
7	135	31	0,77
8	75	43	0,43
9	164	52	0,68
10	194	71	0,63
11	211	53	0,75
12	94	40	0,57
13	188	40	0,79
14	211	76	0,64
15	211	39	0,82
16	105	50	0,52
a	150	37	0,75
b	152	34	0,78
c	161	40	0,75
d	186	48	0,74
e	184	44	0,76
QR-код на бумаге	197	34	0,83

Проверка адекватности полученной модели проводилась с помощью критерия Фишера. Для расчета адекватности рассчитывали дисперсию неадекватности сравнивая расчетные$y_{\text{расч}}$ и опытные$y_{\text{экс}}$ значений контрастности при числе степеней свободы $f_2 = 10$ всех исследуемых образцов:

$$S^2_{\text{неад}} = \frac{\sum_{i=0}^{n}(y_{\text{расч}}-y_{\text{эксп}})^2}{f_2} = 0{,}0065.$$

Расчетное значение критерия Фишера составило:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S^2_{\text{неад}}}{S^2_{\bar{y}}} = \frac{0{,}0065}{0{,}0023} = 2{,}84.$$

При уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ и числе степеней свободы $f_1 = 4$ и $f_2 = 10$ табличное значение критерия Фишера $F_{\text{табл}} = 3{,}63 \geq F_{\text{расч}} = 2{,}84$. Данное соотношения показывает, что полученная модель адекватна.

Анализируя полученную модель можно сделать следующий вывод:

- в изученных интервалах варьирования наибольшее влияние на контрастность оказывают длительность и частота импульса, мощность излучения; в меньшей степени – линиатура;

- для увеличения контрастности изображения необходимо увеличивать частоту и длительность импульсов, скорость маркировки; уменьшать мощность.

Статистический анализ полученных результатов дает нам возможность утверждать,

что для достижения оптимального значения контрастности следует снизить скорость нанесения подложки, а также мощность лазерной установки при увеличении всех остальных входящих параметров.

Дробный факторный эксперимент с дублированием в центре плана помог найти наиболее оптимальный режим маркировки, это подтверждается устойчивым быстрым считыванием QR–кода без задержки.

Максимальный контраст, полученный в результате оптимизации параметров составил 0,83 и был улучшен на 10%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новик Ф.С., Арсов Я.Б.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение; София; Техника, 1980. - 304 с.
2. *Спиридонов А.А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
3. *Ганзуленко О.Ю.* Технология маркировки серийных изделий из металлических и полимерных материалов посредством импульсного лазерного излучения / О.Ю. Ганзуленко, Е.В. Ларионова, А.П. Петкова // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции смеждународным участием. Институт металлургии, машиностроения итранспорта СПбГПУ. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 178-181.
4. *Орлов А.А., Астафьев А.В.* Системный анализ методов маркировки промышленных изделий / Алгоритмы, методы и системы обработки данных, 2010. №15. С. 136-140.
5. *Ковалёв А.И.* QR-коды, их свойства и применение / Молодой ученый, 2016. № 10. С. 56-59.
6. *Ганзуленко О.Ю.* Выбор состава сталей с целью получения изображений полной цветовой гаммы на поверхности изделий при импульсном лазерном излучении / О.Ю. Ганзуленко, А.П. Петкова / Записки Горного института, 2014. Т.209. С. 216-219.
7. *Айхлер Ю., Айхлер Г.И.* Лазеры. Исполнение, управление, применение. - М.: Техносфера, 2008. – 440 с.
8. *Ковалев О.Б., Фомин В.М.* Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2013. – 256 с.
9. *Ганзуленко О.Ю.* Особенности лазерного окисления металлов и структуры материала в области лазерного воздействия / О.Ю. Ганзуленко, А.П. Петкова // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов. Том III. Секция «технологические процессы в машиностроении». – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. С. 65-67.
10. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Издательство «Наука», 1976. – 279 с.
11. *Горский В.Г.* Планирование промышленных экспериментов (модели динамики) / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер, А.М. Талалай. - М.: Металлургия, 1987. - 112 с.

УДК 621.7

ЛАРИН С.Н.,
КОРОТКОВ В.А.,
ИСАЕВА А.Н.,
ПАСЫНКОВ А.А.
Тульский государственный университет

ВЫДАВЛИВАНИЕ ПРУТКОВОЙ ЗАГОТОВКИ В МАТРИЦУ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ С АКТИВНЫМ ТРЕНИЕМ

Аннотация. Процессы обратного выдавливания имеют широкое распространение при производстве различных осесимметричных пустотелых изделий. Данный процесс характеризуется значительными удельными давлениями. Важной задачей стоит снижение нагрузок при реализации данного процесса. Перспективным выглядит использование сил активного трения для снижения силовых режимов. Предполагается использование подвижной матрицы с выступом на цилиндрической поверхности, который будет способствовать подталкиванию материала заготовки. Для теоретического обоснования процесса предполагается использование метода конечных элементов. Было выполнено моделирование данной операции при различных геометрических соотношениях инструмента, скоростей перемещения подвижной матрицы и положения заготовки относительно матрицы. Предполагается выполнить анализ деформационных параметров и скоростных параметров на изменение силы исследуемой операции. По результатам исследований сделаны выводы о целесообразности применения исследуемого метода для его практической реализации.

Ключевые слова: обратное выдавливание, активное трение, обработка давлением, сила.

LARIN S.N.,
KOROTKOV V.A.,
ISAEVA A.N.,
PASYNKOV A.A.
Tula State University

EXTRUSION OF BAR PREPARATIONS IN THE MATRIX OF A CYLINDRICAL SECTION WITH ACTIVE FRICTION

Abstract. Reverse production is widespread in the production of various axisymmetric hollow products. This process is associated with significant specific pressures. An important task is to reduce the load during the implementation of this process. The use of power regimes looks promising. It is intended to use a movable matrix with a protruding surface on the surface. For the theoretical justification of the use process, finite element elements are used. This operation was simulated for various geometric ratios of the instrument. It is supposed to carry out the analysis of deformation parameters and speed parameters. Based on the results of the research, conclusions are drawn about the advisability of using the element under study for its practical implementation.

Key words: reverse extrusion, active friction, pressure treatment, force.

Актуальной задачей для различных процессов пластического формоизменения является снижение нагрузок, особенно важно это для операции обратного выдавливания [1-4]. В статье рассмотрен процесс обратного выдавливания стальной заготовки в холодных условиях [4-7]. Для снижения силовых нагрузок предполагается использование

подвижной матрицы [8-15]. Еще одной особенностью ее является выступ на цилиндрической части, который должен отвечать за подталкивание материала заготовки. На рисунке 1 представлена схема процесса.

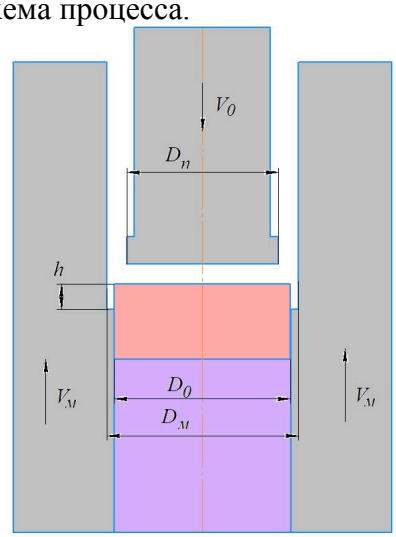


Рисунок 1. Схема процесса

Для моделирования процесса принимались следующие размеры заготовки и инструмента: $D_0 = 70$ мм; $D_п = 60...66$ мм; $D_м = 70...76$ мм; $h = 0...15$ мм. Для реализации требуемой схемы деформирования менялись скорость перемещения матрицы и коэффициент трения. Материалом заготовки является сталь 45. Моделирование выполнялось в программе DEFORM.

На рисунке 2 предоставлена графическая зависимость «Сила-путь» для условий холодного деформирования и разных условий трения.

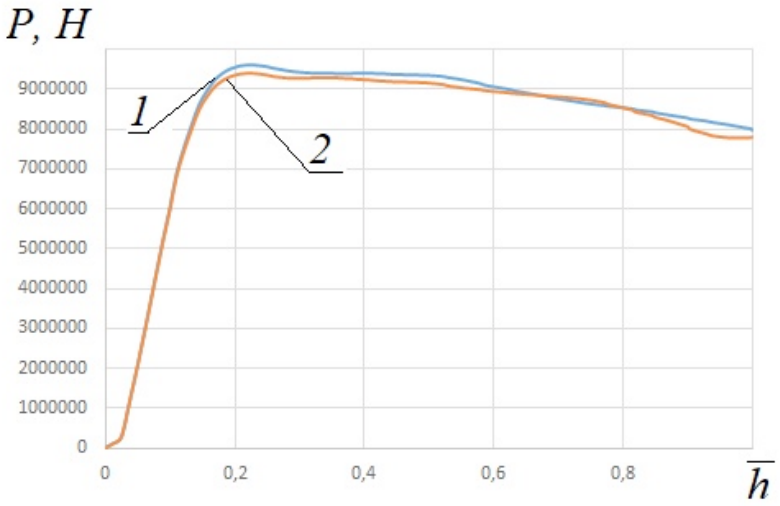


Рисунок 2. Зависимость «Сила-путь»:
1 – без активного трения; 2 – с активным трением и гладкой матрицей
$D_0 = 70$ мм; $D_м = 70$ мм; $D_п = 60$ мм

Кривая 1 на данной зависимости соответствует условиям деформирования без реализации активного трения, т.е. матрица неподвижна, реализуется обычное обратное выдавливание. Кривая 2 соответствует режиму деформирования с использованием сил активного трения, когда матрица подвижна и перемещается в сторону, противоположную движению пуансона со скоростью $V_м = 100$мм/с. Как видно из графика использование активного трения не дает заметного эффекта по снижению силовых нагрузок.

В связи с эти предлагается схема с перемещением матрицы и подталкиванием ей

материала заготовки. На рисунке 3 представлены эскизы, показывающие характер течения металла при реализации выдавливания с подталкиванием, дающие представление о предлагаемой схеме деформирования.

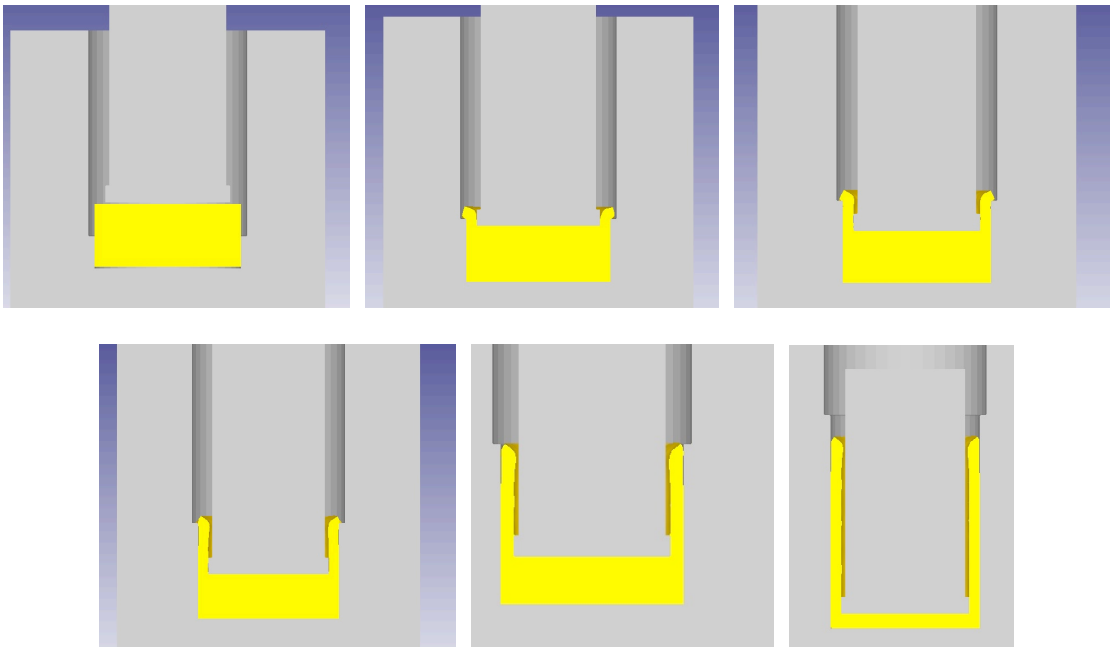


Рисунок 3. Схема течения металла при реализации выдавливания с подталкиванием
($D_0 = 70$ мм; $D_м = 76$ мм; $D_п = 60$ мм; $V_м = 170$ мм/с)

На рисунках 4-5 представлены зависимости изменения силы обратного выдавливания от относительного хода инструмента для разных режимов перемещения матрицы.

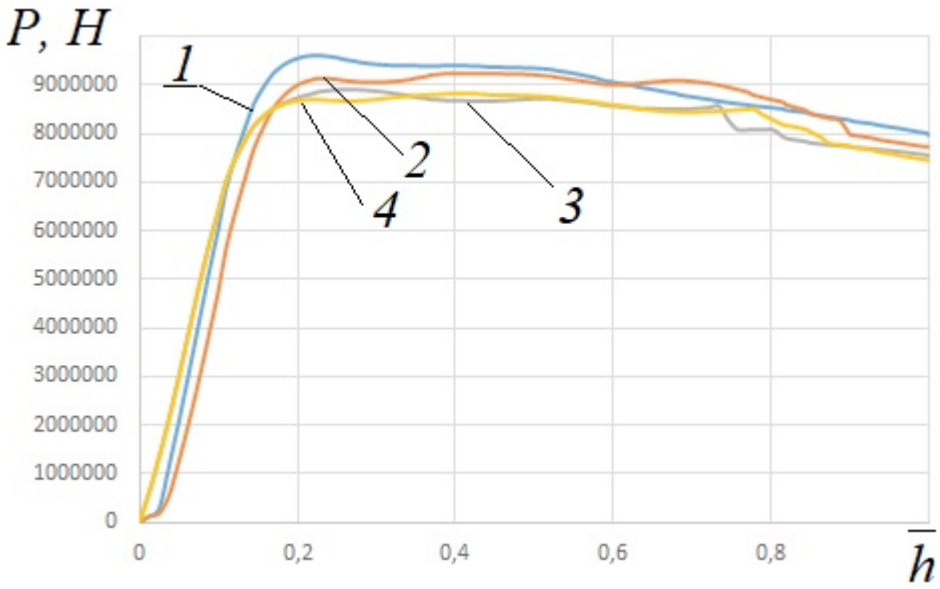


Рисунок 4. Зависимость «Сила-путь»: 1 – с активным трением и гладкой матрицей; 2 – с активным трением, $V_м = 120$ мм/с; 3 – с активным трением, $V_м = 150$ мм/с;
4 – с активным трением, $V_м = 170$ мм/с
($D_0 = 70$ мм; $D_м = 76$ мм; $D_п = 60$ мм; $h = 10$ мм)

Данные, представленные на рисунке 4 справедливы для гладкой матрицы и матрицы с выступом и различным скоростям перемещения матрицы. Данные,

представленные на рисунке 5 справедливы для матрицы с выступом и разным значениям высоты торца заготовки над выступом матрицы.

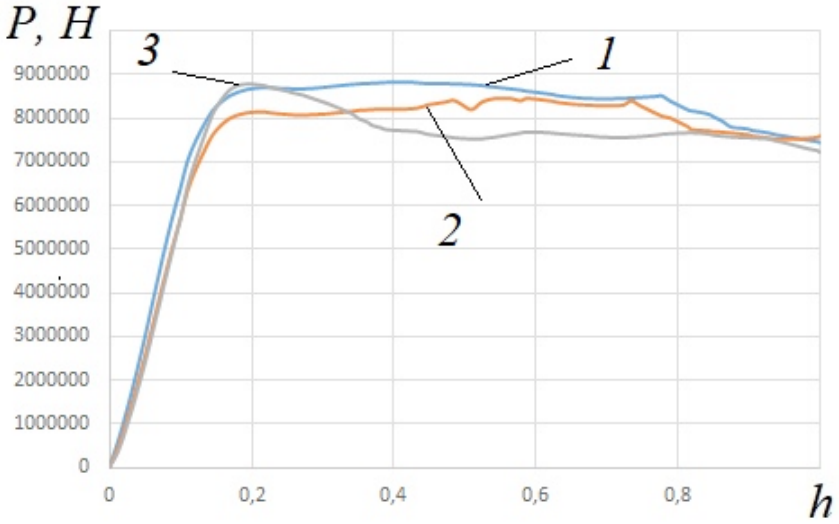


Рисунок 5. Зависимость «Сила-путь»:

1 – $h = 10$ мм; ($D_0 = 70$ мм; $D_м = 76$ мм; $D_п = 60$ мм; $V_м = 170$ мм/с)

2 - $h = 15$ мм ($D_0 = 70$ мм; $D_м = 76$ мм; $D_п = 60$ мм; $V_м = 170$ мм/с)

3 - $h = 15$ мм ($D_0 = 70$ мм; $D_м = 76$ мм; $D_п = 60$ мм; $V_м = 140$ мм/с)

На рисунках 6-7 представлены зависимости изменения силы обратного выдавливания от относительного хода инструмента для разных значений диаметров пуансона.

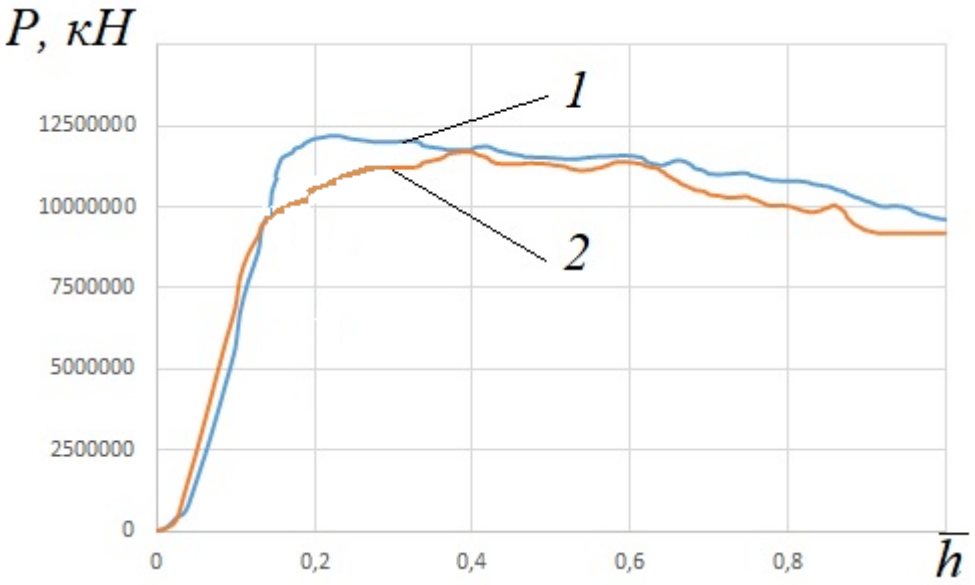


Рисунок 6. Зависимость «Сила-путь»:

1 – - $h = 15$ мм ($D_0 = 75$ мм; $D_м = 81$ мм; $D_п = 64$ мм; $V_м = 190$ мм/с)

2 – - $h = 15$ мм ($D_0 = 75$ мм; $D_м = 81$ мм; $D_п = 64$ мм; $V_м = 260$ мм/с)

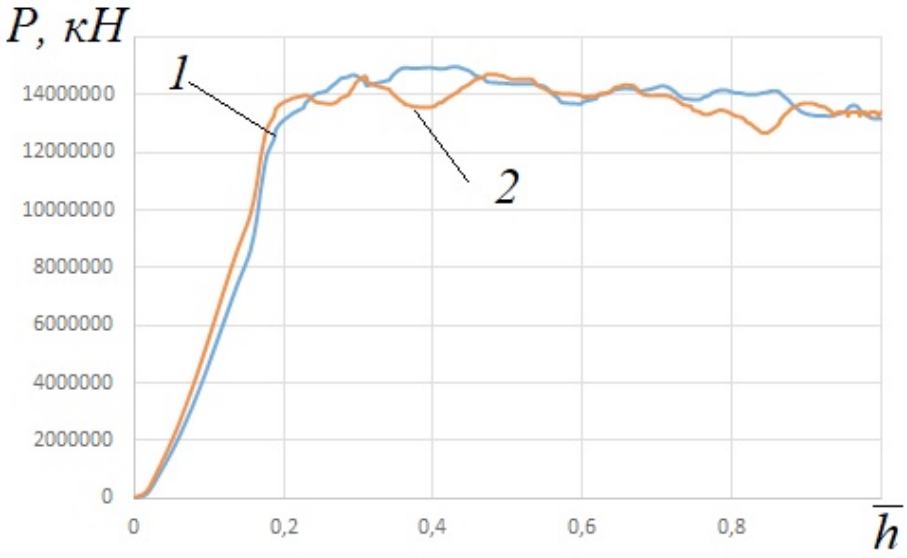


Рисунок 7. Зависимость «Сила-путь»:
1 – - $h = 15$ мм ($D_0 = 75$ мм; $D_м = 81$ мм; $D_п = 66$ мм; $V_м = 190$ мм/с)
2 – - $h = 15$ мм ($D_0 = 75$ мм; $D_м = 81$ мм; $D_п = 66$ мм; $V_м = 360$ мм/с)

Анализ рисунков 4-5 показал, что использование схемы с подталкиванием торца заготовки приводит к снижению силы относительно случая с гладкой матрицей на 17 % и на 22 % относительно стандартной схемы выдавливания. Это является несомненным преимуществом предлагаемой схемы выдавливания. Минимальных значений силы можно добиться путем правильного комбинирования высоты h и скорости перемещения матрицы (в нашем случае $D_0 = 70$ мм; $D_м = 76$ мм; $D_п = 60$ мм; $V_м = 170$ мм/с, $h = 15$ мм).

Анализ рисунков 6-7 показал, что использование предлагаемой схемы выдавливания при больших степенях деформации уже практически не влияет на изменение силы. Очевидно, что это связано с тем, что стенка весьма тонкая и схема подталкивания уже не эффективна. Кроме того в этом случае могут возникать значительные растягивающие напряжения, что является нежелательным.

Стоит также оговорится, что для обеспечения минимального значения силы требуется подбирать скорость перемещения матрицы. Она должна быть близкой к скорости течения металла. При скорости матрицы, меньшей, чем скорость течения металла образуется утолщение на торце заготовки и оно не сглаживается в процессе выдавливания. При больших скоростях деформирования, чем скорость течения металла не происходит подталкивания ввиду того, что сформировавшиеся утолщение мгновенно разравнивается.

На рисунке 8 представлены схемы к оценке скоростей течения металла, дающие представление о скоростях течения металла в заготовки на разных этапах деформирования при следующих условиях $D_0 = 75$ мм; $D_м = 81$ мм; $D_п = 66$ мм; $h = 15$ мм.

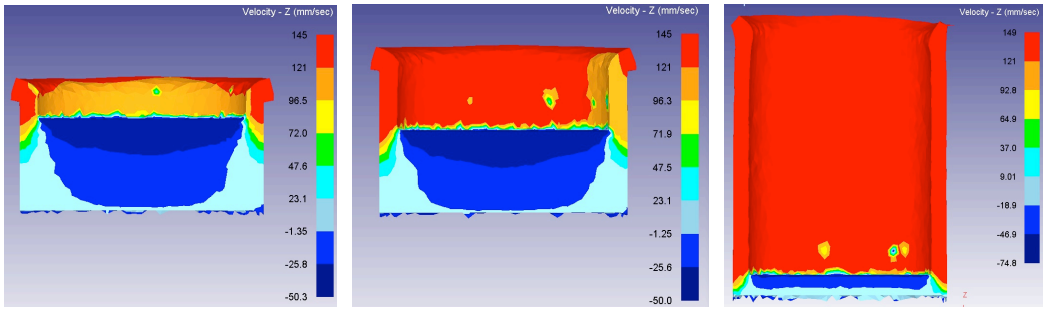
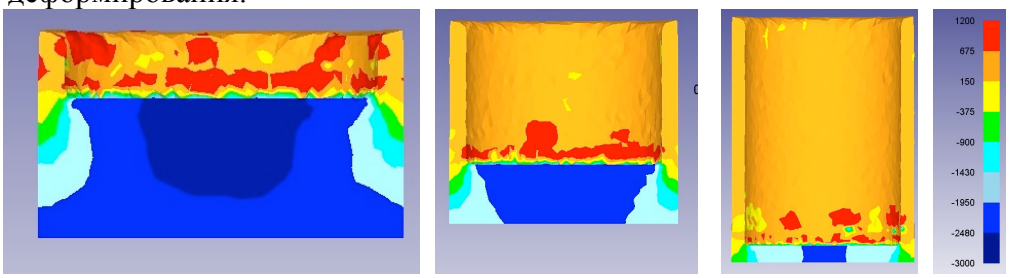
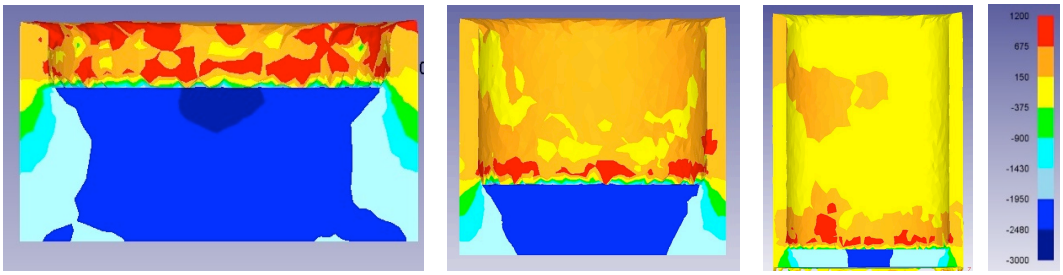


Рисунок 8. Схемы к оценке скоростей течения металла

На рисунках 9-10 представлены схемы к оценке напряжений в изделии при разных режимах деформирования.

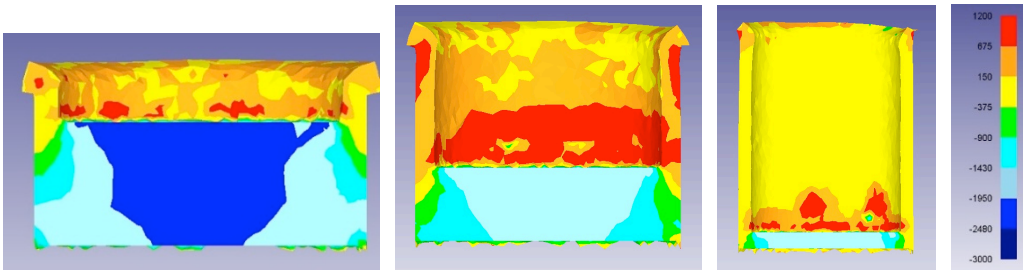


а

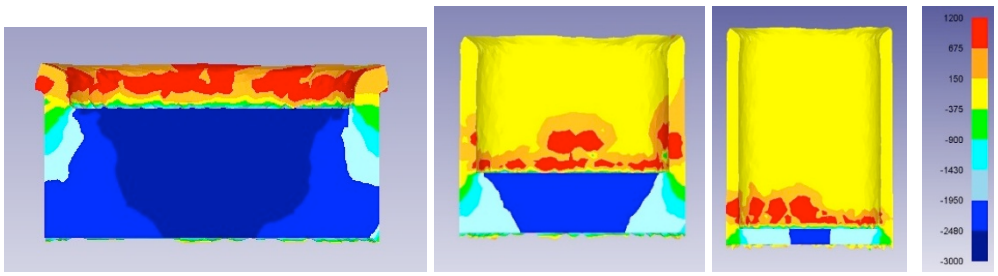


б

Рисунок 9. Схемы к оценке напряжений в изделии при разных режимах деформирования: а - без активного трения; б - с активным трением



а



б

Рисунок 10. Схемы к оценке напряжений в изделии с активным трением: а $-V_м = 140$ мм/с, $h = 15$ мм; б –, $V_м = 170$ мм/с, $h = 15$ мм

Анализ рисунков 9-10 показал, что использование схемы с подталкиванием торца заготовки практически не приводит к изменению максимальных величин растягивающих напряжений. Однако можно заметить, что в случае с подталкиванием в основной части заготовки напряженное состояние более равномерное, и значения напряжений несколько меньше, несмотря на похожую картину в целом в очаге деформации.

В заключении можно сказать, что предлагаемая схема позволяет добиться заметного снижения сил выдавливания (на 20…25%), но при определенных значениях степеней деформации, обеспечивающих достаточно толстую стенку для подталкивания. Данный метод можно использовать для реализации процессов обратного выдавливания толстостенных габаритных заготовок из стальных заготовок.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00401.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Яковлев С.П.* Обработка давлением анизотропных материалов / С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, В.А. Андрейченко. - Кишинев: Квант. - 1997. - 332 с.
2. *Попов Е.А.* Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1968. - 283 с.
3. *Чудин В.Н., Пасынков А.А.* Нестационарные процессы изотермической штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2018. №6. С. 23-28.
4. *Пасынков А.А., Борискин О.И., Ларин С.Н.* Теоретические исследования операции изотермической раздачи труб из труднодеформируемых цветных сплавов в условиях кратковременной ползучести // Цветные металлы. 2018. №2. С. 74-78.
5. *Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М.* Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. М., Металлургия, 1976. 488 с.
6. *Демин В.А., Черняев А.В., Платонов В.И., Коротков В.А.* Методика экспериментального определения механических и пластических свойств материала при растяжении с повышенной температурой // Цветные металлы. 2019. №5. С. 66-73.
7. *Черняев А.В., Усенко Н.А., Коротков В.А., Платонов В.И.* Определение влияния скорости деформации на сопротивление деформированию при статическом растяжении с повышенной температурой // Цветные металлы. 2019. №5. С. 60-66.
8 . *Baghbani Barenji A., Eivani A.R., Hasheminiasari M., Park N., Jafarian H.R.* Application of hot forming cold die quenching for facilitating equal channel angular pressing of AA2024 aluminum alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2019, vol 79130. p. 265-277
9. *Maeno T., Mori K., Ichikawa Y., Sugawara M.* Use of liquid lubricant for backward extrusion of cup with internal splines using pulsating motion // Journal of Materials Processing Technology. 2017, vol 244. p. 273-281
10. *Larin S.N., Pasynkov A.A.* Analysis of forming properties during the isothermal upsetting of cylindrical workpieces in the viscous-plasticity mode // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol 441.
11. *Xiangkun Fan, Liang Chen, Gaojin Chen, Guoqun Zhao, Cunsheng Zhang* 10 of 1060/6063 aluminum alloys based on porthole die extrusion process // Journal of Materials Processing Technology. 2017, vol 250. p. 65-72
12. *Demin V.A., Chernyaev A.V., Platonov V.I., Korotkov V.A.* Methodology for the experimental determination of the mechanical and plastic properties of a material under tension with elevated temperature // Non-ferrous metals. 2019, vol 5. p. 66-73
13. *Chernyaev A.V., Usenko N.A., Korotkov V.A., Platonov V.I.* Determination of the influence of the strain rate on the resistance to deformation during static tension with elevated temperature // Non-ferrous metals. 2019, vol 5. p. 60-66
14. *Lokesh Vendra S.S., Sunkulp Goel, Nikhil Kumar, Jayaganthan R.* A study on fracture toughness and strain rate sensitivity of severely deformed Al 6063 alloys processed by multiaxial forging and rolling at cryogenic temperature // Materials Science and Engineering. 2017, vol 68616. p. 82-92
15. *Junquan Yu, Guoqun Zhao, Liang Chen*. Analysis of longitudinal weld seam defects and investigation of solid-state bonding criteria in porthole die extrusion process of aluminum alloy profiles // Journal of Materials Processing Technology. 2016, vol 237. p. 31-47
16. *Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А.* Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев. Квант, 1997. 330 с.

УДК 621.941.1:621.9-1/-9

ЛЮБОМУДРОВ С.А.,
МИРГОРОДСКИЙ Л.,
ШИРИПА О.Ю.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
МИРГОРОДСКИЙ С.И.
Восточно-Казахстанский технический университет

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СЕДЛА ШИБЕРНОЙ ЗАДВИЖКИ НЕФТЕПРОВОДА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ДЛЯ РАБОТЫ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

Аннотация. В статье рассмотрена актуальная задача использование титанового сплава в задвижке и обеспечения требуемой шероховатости поверхности деталей. Были применены различные режимы обработки титанового сплава, позволяющие обеспечить требуемую шероховатость поверхности. Установлены зависимости шероховатости от скорости резания, подачи, глубины резания и характеристики режущего инструмента. Представлены результаты экспериментальной обработки.

Ключевые слова: титановый сплав; режимы резания; нефтедобыча; шиберная задвижка; коррозионная стойкость; шероховатость.

LYUBOMUDROV S.A.,
MIRGORODSKIY L.,
SHIRIPA O.Y.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
MIRGORODSKIY S.I.
D. Serikbayev East Kazakhstan state technical
university

PROVIDING THE REQUIRED SURFACE ROUGHNESS OF THE SLIDE VALVE VALVE OF THE TITANIUM ALLOY OIL PIPELINE FOR OPERATION IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

Abstract. The article discusses the actual problem of using titanium alloy in the slide gate valve and ensuring the required surface roughness of the parts. Various titanium alloy treatment modes have been employed to provide the required surface roughness. Roughness dependence on cutting speed, delivery, cutting depth and cutting tool characteristics are established. The results of experimental processing are presented.

Keywords: titanic alloy; cutting modes; oil production; slide gate valve; corrosion resistance; roughness.

Введение.

Добыча нефти часто сопровождается различными агрессивными примесями, которые оказывают негативное влияние на работоспособность задвижек. Остановка добычи и замена задвижки обходится достаточно дорого, поэтому находят применение задвижки из корозионностойкого титанового сплава. Химический состав нефти и газа при добыче на месторождении не изучается из-за дороговизны работ. Замена задвижки обходится дешевле работ лаборатории по изучению химического состава добываемой

нефти и газа.

Агрессивная среда и абразив воздействуют напрямую на запорные части задвижки. Около 95% выходов из строя задвижек связано с потерей герметичности запорной пары шибер – седло. Срок службы задвижки в зависимости от условий эксплуатации уменьшается до 3-12 месяцев. Возможный переход от нержавеющей стали (40Х, 30Х13, 95Х18) на титановый сплав должен увеличить срок службы задвижки [5].

Широкое применение в нефтедобывающей отрасли находят шиберные задвижки. Анализировались задвижки, полученные с месторождения «Западное Тузколь», которое находится в Западном Казахстане, где были выявлены проблемные места запорной арматуры. На рисунке 1 представлена трехмерная модель шиберная задвижка с Ду 65, которая была модернизирована установкой седел из титанового сплава [3].

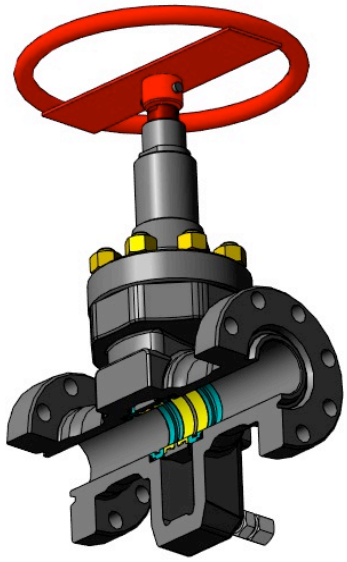


Рисунок – Трехмерная модель шиберной задвижки

Основной задачей является подбор рациональных режимов резания, обеспечивающих необходимую шероховатость, седла шиберной задвижки [1, 13]. По данному направлению проводились исследования.

Использование титанового сплава в шиберной задвижке.

Использование титанового сплава на всех деталях шиберной задвижки является не рациональным, ввиду его высокой стоимости. По этой причине, был проведен анализ всей конструкции и установлено, что наибольшему износу подвергается седло шиберной задвижки. На рис. 2 отчетливо видно каверны износа седла шиберной задвижки.

Механическая обработка титановых сплавов будет эффективна, если инструмент, смазочно-охлаждающая жидкость и режимы резания выбраны правильно [2]. На количество вибраций режущего инструмента влияют различные факторы [3]. К этим факторам можно отнести виды обработки выбранного материала, его пластичность, прочность, и значительное влияние режимов резания [4, 10]. На шероховатость поверхности, на ее качество и точность могут повлиять собственные затухающие колебания технологической системы, которые появятся в ней при любом случайном возмущении. Еще одной причиной колебаний технологической системы может стать неравномерность припуска и неоднородность обрабатываемого материала [14].

Для эксплуатации деталей в определенных условиях необходимо обеспечить качество поверхностного слоя, чтобы получить заданные функциональные свойства для поверхности деталей при их использовании.

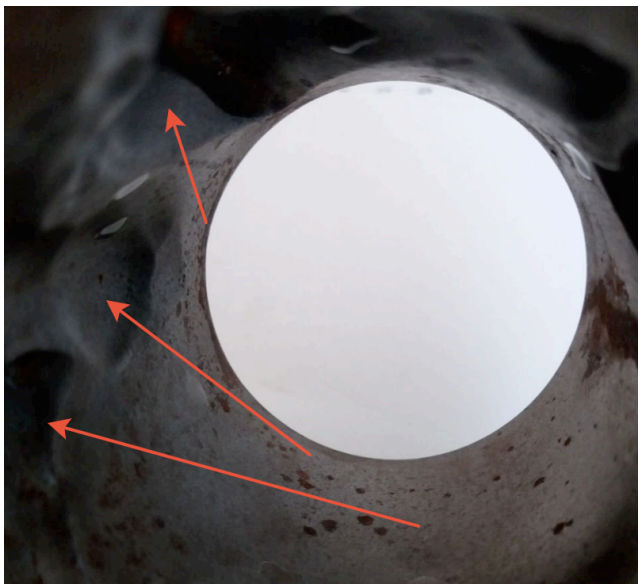


Рисунок 2 – Износ седла привел к потере герметичности шиберной задвижки

Влияние режимов резания на качество поверхности седла шиберной задвижки.

Нарост, который образуется на режущей кромке инструмента, влияет на процесс резания, так как происходит захват и отрыв слоев, которые расположены под режущей кромкой резца, также возникают и вибрации, все эти факторы снижают качество поверхности,ее шероховатость [6, 9].

Остальные параметры резания, такие как подача инструмента и радиус при вершине резца, также влияют на шероховатость поверхности.

Существуют причина возникновения микронеровностей, снижающих качество поверхности - это наличие колебаний, которые постоянно возникают в процессе резания., которые зависят от скорости резания при точении [8].

Рисунок 3 – Седло шиберной задвижки из титанового сплава ВТ6

Обработка седла (рис. 3) проводилась на станке с ЧПУ СТХ 510 ecoline. При обработке седла были использованы различные режимы и использовались разные пластины (табл. 1), в зависимости от вида обработки, был выбран инструмент с пластиной из твердого сплава. Данные режимы резания были выбраны исходя из имеющихся исследований обработки титана [7, 8, 15].

Таблица 1.

Режимы резания титанового сплава ВТ6

№	Вид обработки	Пластина	Глубина, мм	Подача, мм/об	Скорость резания, м\мин
1	Черновая	Sandvik) CNMG 12 04 08-PM 4325, CNMG 432-PM	2	0.15	50
	Чистовая	Sandvik)VNMG 16 04 04-SM 1115, VNMG331-SM 1115	0,15	0.1	60
2	Черновая	Sandvik) CNMG 12 04 08-PM 4325, CNMG 432-PM	2	0.25	50
	Чистовая	Sandvik)VNMG 16 04 04-SM 1115, VNMG331-SM 1115	0,1	0.15	60
3	Черновая	Sandvik) CNMG 12 04 08-PM 4325, CNMG 432-PM	2	0.15	50
	Чистовая	Sandvik)VNMG 16 04 04-SM 1115, VNMG331-SM 1115	0,2 0,15 0,1 0,05	0.1	60

Были проведены измерения шероховатости и плоскостности торцов седла с использованием плоскопараллельных концевых мер 5-го разряда ГОСТ 8.166-75 [2]. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты измерений

Номер седла	Шероховатость, Ra	Плоскостность, мм
1	0,8 – 1,2	0,05
2	0,85 – 1	0,045
3	0,8 - 1	0,035

Из таблиц видно, что наиболее высокое качество поверхности обеспечивается за счет уменьшения глубины резания и подачи при точении титанового сплава ВТ6 [10, 11].

Влияние смазочно-охлаждающей жидкости на качество поверхности седла шиберной задвижки.

Применение СОЖ (смазочно-охлаждающей жидкости) улучшает процесс механической обработки. При этом существенно снижается износ режущего инструмента, уменьшаются расходы энергии на процесс резания, а качество обработанной поверхности в разы лучше. Благодаря СОЖ, снижается образование наростов у режущей кромки инструментов, а условия для устранения стружки и других абразивных частиц из зоны резания, автоматизируются [13].

Для обработки седла было выбрана марка Blasocut исходя из имеющих исследований влияния СОЖ на силы резания при точении титановых сплавов [8].

Выводы.

1. Главная проблема повышения надежности и увеличения срока службы задвижки решается заменой материала седла на титановый сплав.

2. Для обеспечения требуемой шероховатости и геометрии поверхности седла шиберной задвижки были подобраны:

- оптимальные режимы резания в зоне устойчивого резания.
- выбрана марка СОЖ Blasocut, исходя из имеющих исследований влияния СОЖ на силы резания при точении титановых сплавов;
- подобран режущий инструмент на основании исследований влияния геометрии

инструмента на качество поверхностного слоя при точении титанового сплава.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахлюстина В.В.* Особенности обработки заготовок из титановых сплавов / В сборнике: world science: problems ando innovations - сборник статей XIX Международной научно-практической конференции: в 3 ч., 2018. - С. 168-171.
2. *Дунин-Барковский И.В., Карташева А.Н.* Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. - М.: Машиностроение, 2017. – 378 с.
3. *Евгенев Г.Б., Гаврюшин С., Грошев А.В., Овсянников М., Шильников П.С.* Основы автоматизации технологических процессов и производств. Т. 1. Информационные модели. – М., 2015.
4. *Ершов Д.Ю.* Оценка вибрационных процессов механических систем на этапе их проектирования в машиностроении / Записки горного университета. - 2014. - Т.209. - С.51-55.
5. *Иноземцев А.А.* Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель». Современные титановые сплавы и проблемы их развития / А.А. Иноземцев, И.Г. Башкатов, А.С. Коряковцев. - М.: ВИАМ, 2010. - С. 43–46.
6. *Карасев М.А.* Механическое взаимодействие между частицами грунта на микроструктурном уровне / Записки горного института. - 2012. - Т.198. - С. 202-207.
7. *Любомудров С.А.* Влияние скорости резания и геометрии инструмента на качество поверхностного слоя при точении титанового сплава / С.А. Любомудров, О.Ю. Ротаренко // Неделя науки СПбПУ. Материалы научного форума с международным участием. Ч. 1, 2015. - С. 255-258.
8. *Любомудров С.А.* Влияние параметров резания на качество поверхностного слоя при точении титановых сплавов // С.А.Любомудров, О. Ю. Ротаренко // научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ». Материалы научно-практической конференции. Ч. 2. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. - С. 281-285
9. *Максаров В.В.* Моделирование и управление динамическими свойствами технологических систем / В.В. Максаров, П.В. Леонидов // Записки горного университета. - 2014. - Т.209. - С. 71-78.
10. *Максаров В.В.* Повышение точности изготовления силовых гидроцилиндров механизированных крепей на основе виброустойчивой инструментальной системы / В.В. Максаров, Ю. Ольт // Записки горного университета. - 2015. - С. 71-84.
11. *Максаров В.В.* Технологическое обеспечение качества прецизионных поверхностей деталей типа «тел вращения» из титановых сплавов / Максаров В.В., Кошелева Е.В., Важенин А.Ю. // Металлообработка. - 2018. - №4. - С. 52-59.
12. *Кисель А.Г.* Повышение точности токарной обработки за счет применения смазочно-охлаждающих жидкостей / А.Г. Кисель, А.А. Ражковский, Д.С. Реченко, А.Ю. Попов // Технология машиностроения. - 2014. - С. 18-20.
13. *Хазиев А.Р.* Особенности обработки деталей из титанового сплава / В сборнике: Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, 2018. - С. 516-519.
14. *Jackson M.J. , Novakov T., Whitfield M., Robinson G., Handy R., Sein H., Ahmed W*. 2017 VFCVD diamond-coated cutting tools for micro-machining titanium alloy Ti6A14V *Springer-Verlag. London*.
15. Sisira *Kanta Pattnaik, Neeraj Kumar Bhoi, Sachidananda Padhi, Saroj Kumar Sarangi*. 2017 Dry machining of aluminum for proper selection of cutting tool: tool performance and tool wear *Springer-Verlag. London*.

УДК621.793.6

МИХАЙЛОВ А.В.,
ПРЯХИН Е.И.,
СИВЕНКОВ А.В.
Санкт-Петербургский горный университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НИКЕЛЕМ ИЗ СРЕДЫ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

Аннотация. Работа посвящена разработке математической модели поверхностного легирования никелем из среды легкоплавких металлических расплавов. Для достижения поставленных целей проведен анализ методов нанесения диффузионных покрытий, выполнен обоснованный подбор состава жидкометаллического транспортного расплава. По результатам исследования были выведены эмпирические формулы для определения толщины диффузионного слоя от температуры и времени технологического процесса для стали 45 и Ст3кп.

Ключевые слова: **л**оверхностное легирование; диффузионная металлизация; транспортный расплав; математическая модель; планирование эксперимента.

MIKHAILOV A.V.,
PRYAKHIN E.I.,
SIVENKOV A.V.
Saint-Petersburg Mining University

MATHEMATICAL MODELING FORTHE SURFACE NICKEL ALLOYING FROM THE FUSIBLE METAL MELTS

Abstract. The paper is dedicated to the development of the mathematical model for surface nickel alloying from the medium of fusible metal melts. In the course of the study the analysis of diffusion coating methods and selection of fusible transportmetal melt were carried out. Empirical formulas for determining the thickness of the diffusion layer depending on the temperature and time of the technological processfor steel 45 and steel 1.0036 were obtained as a results of the research.

Keywords: surface alloying; diffusion metallization; fusible transport metal melt; mathematical model; planning of experiment.

Активное развитие машиностроения, химической и нефтехимической промышленности в значительной степени повышает требования к эксплуатационным характеристикам металлоизделий. Традиционные методы химико-термической обработки зачастую не в состоянии обеспечить необходимые свойства, в частности коррозионную стойкость.

Эффективным методом защиты металлических изделий от коррозионного поражения является изоляция их поверхности от воздействия коррозионно-активных сред путем нанесения защитных покрытий [1-3].

В условиях эксплуатации или хранения металлические изделия находятся под воздействием различных сред (воздух, вода, масло, щелочь, кислота и т.д.), оказывающихпагубное действие на поверхность металла. Следствием такого воздействия, помимо ухудшения внешнего вида, является изменение механических свойств.

Одним из наиболее перспективных методов модификации поверхности, с целью повышения износостойкости, коррозионной стойкости, стойкости к кавитации и иным внешним воздействиям является технология поверхностного легирования из среды легкоплавких металлических расплавов одним или комбинацией насыщающих элементов.

Однако, для обеспечения должного уровня защиты металлических изделий получаемые диффузионные слои должны обладать требуемыми параметрами стойкости для тех условий и сред, в которых предполагается их эксплуатация.

Актуальность работы обусловлена достижением значительной экономической эффективности, где при должном качестве технологии, модифицирование поверхности изделий из доступных конструкционных материалов обходится в разы дешевле применения цельных изделий из материалов с высокими эксплуатационными характеристиками. В то же время, комбинирование свойств материала основы и измененного в результате нанесения покрытия поверхностного слоя, позволяет получать детали оборудования с превосходными свойствами, которые способны успешно работать в условиях как повышенных механических нагрузок, так и сочетания и раздельного влияния высоких температур и сред агрессивного воздействия [4, 5].

Несмотря на возможную универсальность применения диффузионных покрытий, методы их получения в научном аспекте разработаны недостаточно.

Рассматриваемая технология основана на явлении направленного изотермического переноса тугоплавких элементов (диффузантов) в среде расплавов легкоплавких металлических расплавов, взаимным проникновением этих элементов в поверхностные слои обрабатываемого изделия с образованием нового слоя [6, 7, 8]. При этом легкоплавкий расплав выступает лишь в роли носителя диффузанта к обрабатываемой поверхности, поэтому его принято называть «транспортным». Основными критериями осуществления процесса поверхностного легирования из среды легкоплавких металлов являются:

- нейтральность в отношении материала основы;
- возможность образования твердых растворов при взаимодействии материала основы и диффузанта. [6, 9, 10, 11].

Экспериментальные исследования показали, что наибольшая скорость формирования покрытий на основе никеля, а так же удовлетворительное условие незначительной растворимости основных компонентов конструкционных материалов происходит из: расплава свинца; эвтектики свинец-висмут; расплава свинца с добавлением (0,5-1 % масс) лития [12].

Так как в исследуемых сталях содержания Cr не влияет на ухудшения растворения оксидных пленок, присутствующих на поверхности легированных сталей, не требуется дополнительных активизирующих добавок и оксидные пленки хорошо растворяются расплавом свинца. В результате чего при насыщении в расплаве свинца формируется равномерное покрытие.

На основе теоретических и экспериментальных данных в качестве транспортного расплава был выбран расплав свинца с добавлением 3% никеля, что является оптимальной его концентрацией, так как при более высоких концентрациях происходит налипание отдельных частиц никеля на поверхность, что ухудшает качество поверхности изделия [15, 13, 14].

Основными данными, необходимыми для оценки кинетики процесса диффузионного насыщения при получении покрытий из жидкометаллических сред, являются: коэффициенты диффузии, энергии активации процесса, изменение концентрации или потока диффузанта на поверхности и распределение его концентрации в диффузионной зоне, и др.

В качестве методики моделирования процесса было выбрано аналитическое решение уравнений диффузии, основанное на первом и втором уравнениях Фика.

В результате проведенных расчетов были получены формулы для определения

толщины диффузионного слоя никеля от температуры и времени процесса поверхностного легирования из свинцового транспортного расплава:

$$\text{Для стали 45: } \delta = 0{,}134 * e^{\left(-\frac{2856{,}68}{T}\right)}\sqrt{\tau}. \quad (1)$$

$$\text{Для Ст3кп: } \delta = 0{,}27 * e^{\left(-\frac{4047{,}67}{T}\right)}\sqrt{\tau}. \quad (2)$$

Для сравнения расчетных и экспериментальных данных диффузионного никелевого покрытия были построены графические зависимости δ от t° и τ насыщения (рис. 1 и 2).

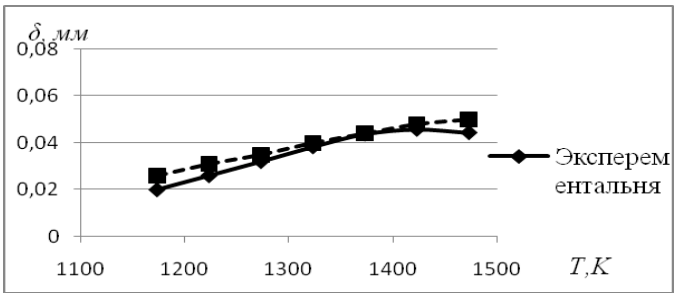


Рисунок 1 – Расчетная зависимость толщины никелевого покрытия стали Ст3кп при τ = 10 ч

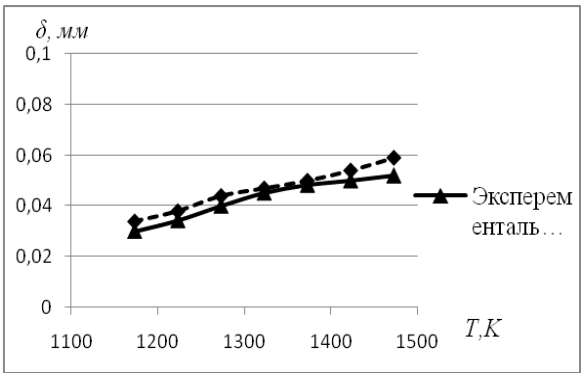


Рисунок 2 – Расчетная зависимость толщины никелевого покрытия стали 45 при τ = 10 ч

Графические зависимости показали что, наиболее близкие значения расчетных данных по отношению к экспериментальным находятся в интервале температур 1100-1200 ºС. Небольшой разброс данных расчетных толщин по отношению к экспериментальным говорит об адекватности представленной математической модели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ольт Ю., Максаров В.В., Красный В.А.* Исследование износостойкости подшипниковых узлов двигателей карьерных автосамосвалов, работающих в условиях фреттинг-коррозии / Записки горного института, 2019. - №235. - С. 70-77.
2. *Bobylyov E. & Storozhenko I.* 2019 Diffusion metallization of carbide cutting tools as a way to improve the surface treatment quality *Journal of Physics: Conference Series* 1399. 044084.
3. *Ivanov R. & Ivanova T.* 2016 Diffusion Coatings as Corrosion Inhibitors *Acta Scientifica Naturalis* 3 10 1515.
4. *Сивенков А.В., Михайлов А.В., Кончус Д.А., Пряхин Е.И.* Установка для нанесения покрытий в среде легкоплавких материалов. Пат: 2711701 Российская Федерация, МПК[57] F27B 1/10, C23C 10/18, C23C 2/08, C23C 2/10.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Санкт-Петербургский горный университет». №019127996; заявл. 03.04.2019; опубл. 21.01.2020 Бюл. №3. – 8с.: ил.
5. *Михайлов А.В., Сивенков А.В.* Разработка установки для нанесения покрытий в среде легкоплавких металлических растворов / Матариалы научно-практической конференции IPDME-2018. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2018.
6. *Шатинский В.Ф.* Получение диффузионных покрытий в среде легкоплавких металлов / В.Ф. Шатинский, О.М. Збожная, Г.Г. Максимович. – Киев: Наукова думка, 1976. - 97 с.
7. *Никитин В.И.* Физико-химические явления при воздействии жидких металлов на тверды. - М.: Атомиздат, 1967. - 442 с.
8. *Максимович Г.Г.* Диффузионные покрытия драгоценными металлами / Г.Г. Максимович, В.Ф. Шатинский, М.С. Гойхман. – Киев : Наукова думка, 1978. - 167 с.
9. *Шатинский В.Ф.* Защитные диффузионные Покрытия / В.Ф. Шатинский, А.И. Нестеренко. – Киев : Наукова думка, 1988. - 272 с.
10. *Сивенков А.В.* Повышение коррозионной стойкости деталей машиностроения путем нанесения защитных покрытий способом высокотемпературного диффузионного осаждения из среды легкоплавких расплавов: дис. канд. техн. наук: 05.02.01. СПб.: СЗТУ. 2009. – 149 с.
11. *Щербединский Г.В.* Физические аспекты формирования многофазных покрытий на металлических материалах / МиТОМ, 2002. - №10. - С. 29-30.
12. *Артемьев В.П.* Оценка некоторых параметров процесса диффузионного титанирования в среде легкоплавких металлов / Материалы 2-го Собрания металловедов России. Пенза, 1994. - С. 33-35.
13. Диффузия легирующих элементов в жидком железе / А.А. Касаткин, И.В. Гаврилин, 1978. - №2. - С. 76−79.
14. *Абдуллаев Р.Н.* Взаимная диффузия в расплавах системы калий-свинец в широком интервале концентраций / Р.Н. Абдуллаев, Р.А. Хайрулин, С.В. Станкус // Теплофизика и аэромеханика, 2014. - Т. 21. № 3. - С. 365-372.
15. *Чалов А.А.* Разработка упрочняющей химико-термической обработки деталей на основе многокомпонентного диффузионного покрытия: дис. канд. техн. наук: 05.02.01.- Краснодар, 2006. - 166 с.

УДК 621.9

ПАСЫНКОВ А.А.,
ЛАРИН С.Н.
Тульский государственный университет

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОБРАТНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

Аннотация. Процессы выдавливания прутковых заготовок являются наиболее применяемыми для изготовления металлических изделий в виде высокого стакана с тонкими или толстыми стенками. Процесс отличается высоким гидростатическим давлением, позволяющим добиться значительных степеней деформации. Однако стоит оговориться что при этом возникают значительные силы и нагрузки на инструмент. Реализации процессов выдавливания заготовок из труднодеформируемых сплавов позволяют значительно сократить силы деформирования и обеспечить формирование благоприятного напряженно-деформированного состояния. Этот процесс является довольно сложным, требующим теоретического обоснования. Интерес представляет обоснование процессов изотермического выдавливания толстостенных трубных заготовок, позволяющих получать изделия типа «Стакан» с относительно тонкими стенками и толстым дном с отверстием. В статье рассмотрен процесс изотермического обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок из высокопрочных цветных сплавов. Моделирование процесса выполнено с использованием программного комплекса на основе метода конечных элементов. Установлено влияние разных параметров на напряжения и деформации, изменяющиеся во время деформации в детали. Выполнен анализ силовых режимов процесса. Полученные результаты могут лечь в основу разработки технологий обратного выдавливания трубных заготовок в изотермических условиях.

Ключевые слова: обратное выдавливание, трубные заготовки, цветные сплавы, напряжения, деформации, силы, исследование.

PASYNKOV A.A.,
LARIN S.N.
Tula State University

STRESSED-DEFORMED STABILITY CONDITION FOR REVERSE EXTRACTION OF THICK-WALL PIPE BILLET

Abstract. The processes of extrusion of bar stocks are the most used for the manufacture of metal products in the form of a tall glass with thin or thick walls. The process is characterized by high hydrostatic pressure, which allows to achieve significant degrees of deformation. However, it should be noted that in this case significant forces and loads on the tool arise. Implementation of the processes of extrusion of workpieces from hardly deformed alloys can significantly reduce the deformation forces and ensure the formation of a favorable stress-strain state. This process is quite complex, requiring theoretical justification. Of interest is the justification of the processes of isothermal extrusion of thick-walled tubular blanks, allowing to obtain products of the type "Glass" with relatively thin walls and a thick bottom with a hole. The article discusses the process of isothermal extrusion of thick-walled tube blanks from high-strength non-ferrous alloys. The process modeling was performed using a software package based on the finite element method. The influence of various parameters on stresses and strains that change during deformation in the part is established. The analysis of the power modes of the process. The results obtained can underlie the development of technologies for the reverse extrusion of tube

blanks in isothermal conditions.

Key words: reverse extrusion, pipe billets, non-ferrous alloys, stresses, deformations, forces, research.

В машиностроительном производстве весьма распространены изделия, представляющие собой пустотелые цилиндры различных размеров с постоянной толщиной стенки и сквозным отверстием в дне [1-4]. Производство данных изделий наиболее рационально различными процессами обработки давлением и в частности обратное выдавливание, особенно когда к детали предъявляются повышенные требования, что обусловлено спецификой применения данных изделий [5-8]. Для выбора рациональной схемы выдавливания и наилучших режимов деформирования, с точки зрения минимальных сил, напряжений в изделии и достижения максимальных степеней деформирования было выполнено конечно-элементное моделирование процесса [9-12]. В статье рассмотрен процесс изотермического обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок из высокопрочных цветных сплавов [13-15]. На рисунке 1 представлена схема исследуемого процесса.

В процессе моделирования предполагалось использование трубных заготовок диаметрами $D_{заг}$=40, 60, 100 мм. Толщины труб ($D_{заг} - D_0$) принимались 15 мм. Кроме того, варьировались радиусы перехода деформирующего выступа в цилиндрическую часть и толщины выступов, принимаемые равными для толщины заготовки 15 мм. Варьировалась скорость деформирования с 1 до 10 мм/с, коэффициент трения с 0,05 до 0,25, изменение которого оценивалось по закону Зибеля.

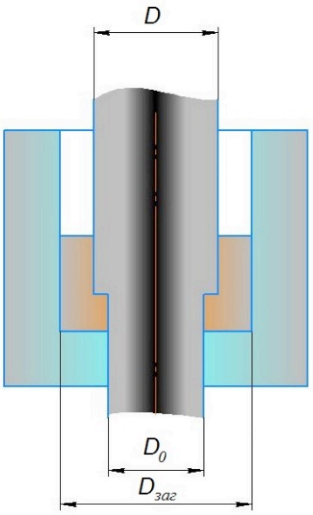
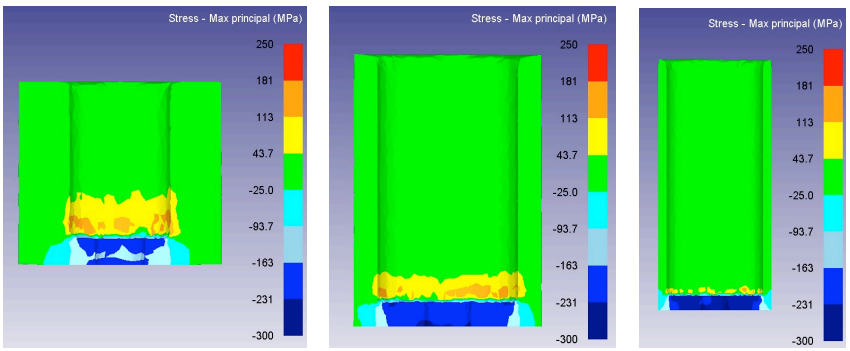


Рисунок 1. Схема процесса выдавливания трубной заготовки

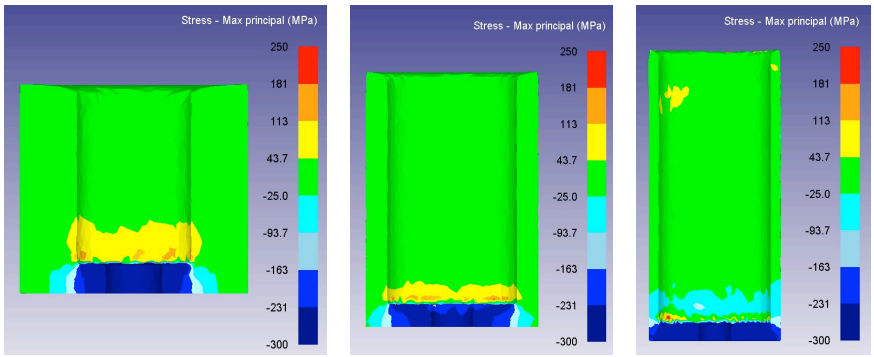
Исследовалось изменение максимальных по абсолютной величине средних нормальных напряжений, интенсивностей деформаций и сил процесса в зависимости от разных условий процесса.

На рисунках 2-4 представлены, полученные в ходе моделирования схемы к оценке максимальных по абсолютной величине средних нормальных напряжений для разных толщин и диаметров заготовок. В частности представлены схемы для заготовок с диаметром 40 мм и величинами редукции 0,5; 0,75; 0,85, которая принималась как отношение диаметров $D/D_{заг}$, для заготовок с диаметром 60 мм и величинами редукции 0,65; 0,85; 0,9; для заготовок с диаметром 100 мм и величинами редукции 0,8; 0,9; 0,95.



$r = 0{,}5$ $r = 0{,}75$ $r = 0{,}85$

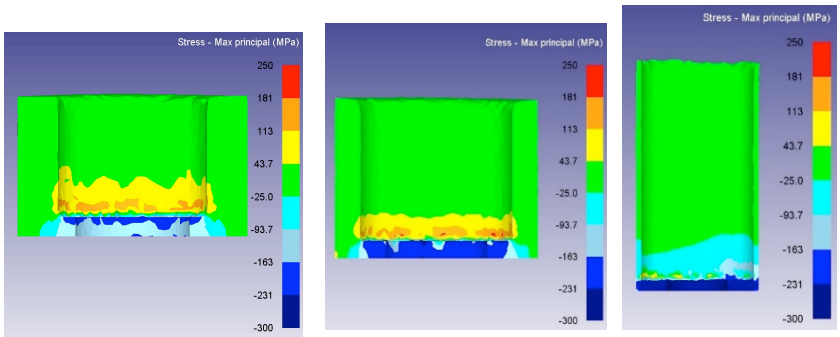
ВТ6



$r = 0{,}5$ $r = 0{,}75$ $r = 0{,}85$

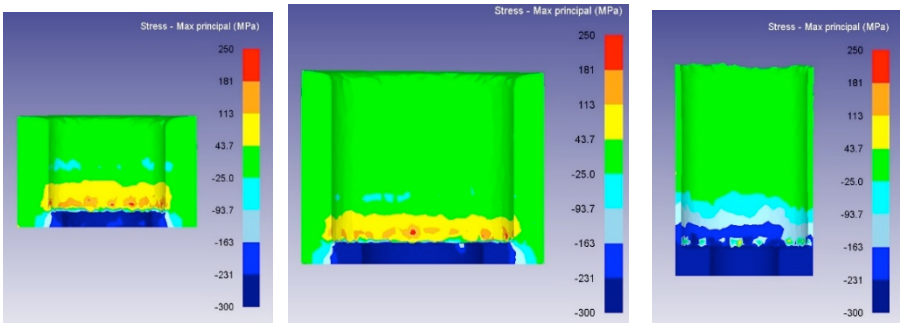
АМг4

Рисунок 2. Схемы к оценке нормальных напряжений ($D_{заз} = 40$ мм, $t = 15$ мм)



$r = 0{,}65$ $r = 0{,}85$ $r = 0{,}9$

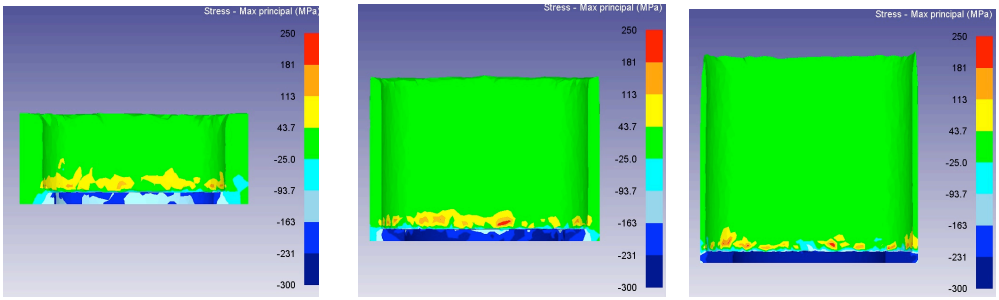
ВТ6



$r = 0{,}65$ $r = 0{,}85$ $r = 0{,}9$

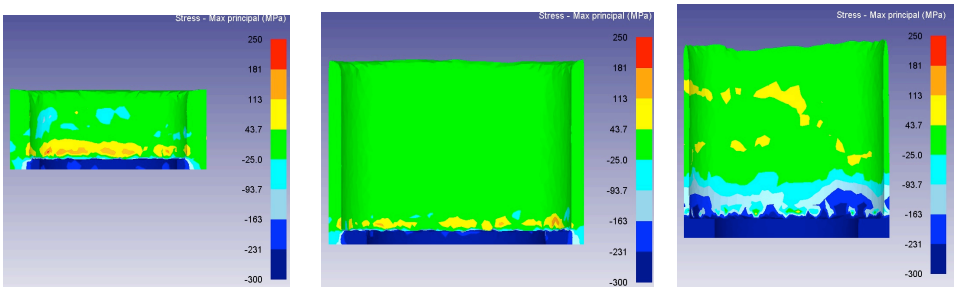
АМг4

Рисунок 3. Схемы к оценке нормальных напряжений ($D_{заз} = 60$ мм, $t = 15$ мм)



$r = 0{,}8$ $r = 0{,}9$ $r = 0{,}95$

ВТ6



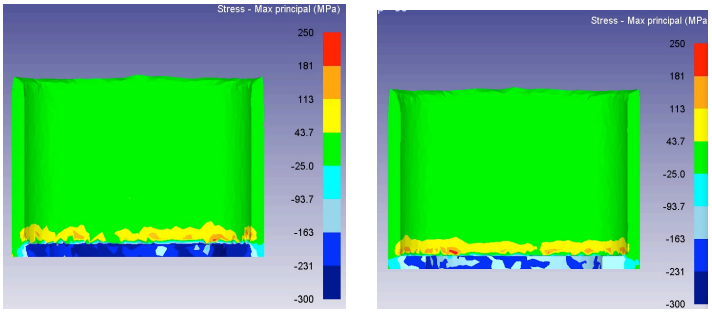
$r = 0{,}8$ $r = 0{,}9$ $r = 0{,}95$

АМг4

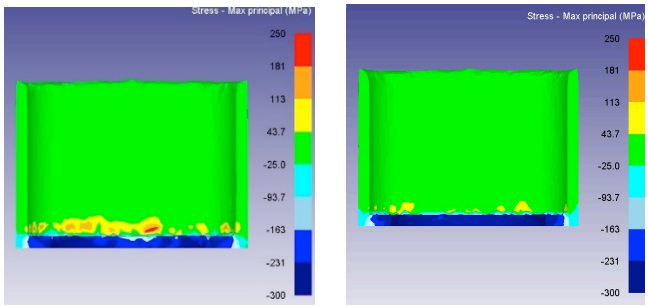
Рисунок 4. Схемы к оценке средних напряжений
($D_{заз} = 100$ мм, $t = 15$ мм)

Анализ полученных результатов показал, что увеличение редукции в целом не приводит к заметному росту максимальных нормальных напряжений, но рост ее величины ведет к уменьшению зоны распространения растягивающих напряжений. Не смотря на то, что площадь растягивающих напряжений (на рисунках помечена желтым и красным цветами) уменьшается при увеличивающейся величине редукции локальные возникают очаги со значительными растягивающими напряжениями. Стоит сказать, что напряжения в изделиях как из титанового, так и из алюминиевого сплавов соизмеримы. Сжимающие напряжения при увеличении редукции, наоборот растут, как по величине (примерно 50 %), так и по площади действия. Стоит отметить, что в рассматриваемых случаях не наблюдается превышения критических растягивающих напряжений.

На рисунке 5 представлены схемы к оценке максимальных по абсолютной величине средних нормальных напряжений для разных значений скорости деформирования и коэффициента трения заготовок диаметром $D_{заз} = 100$ мм, толщиной $t = 15$ мм и величине редукции $r = 0{,}9$. Скорость деформирования 10 мм/с соответствует обычным условиям. Скорость деформирования 1 мм/с соответствует режиму кратковременной ползучести.

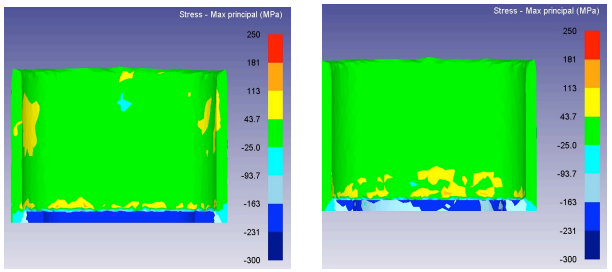


$V = 10$ **мм/с,** $\mu = 0{,}05$ $V = 1$ **мм/с,** $\mu = 0{,}05$

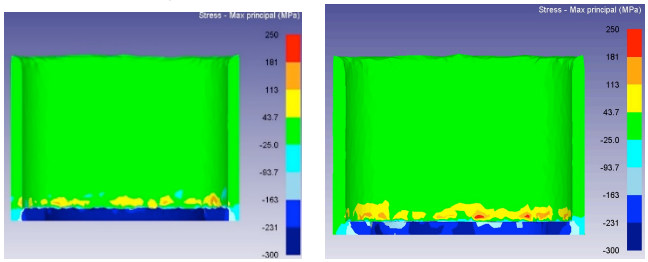


$V = 10$ **мм/с,** $\mu = 0{,}25$ $V = 1$ **мм/с,** $\mu = 0{,}25$

ВТ6



$V = 10$ **мм/с,** $\mu = 0{,}05$ $V = 1$ **мм/с,** $\mu = 0{,}05$



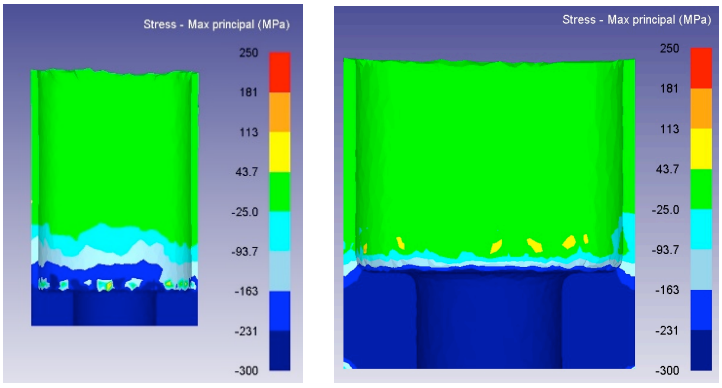
$V = 10$ **мм/с,** $\mu = 0{,}25$ $V = 1$ **мм/с,** $\mu = 0{,}25$

АМг4

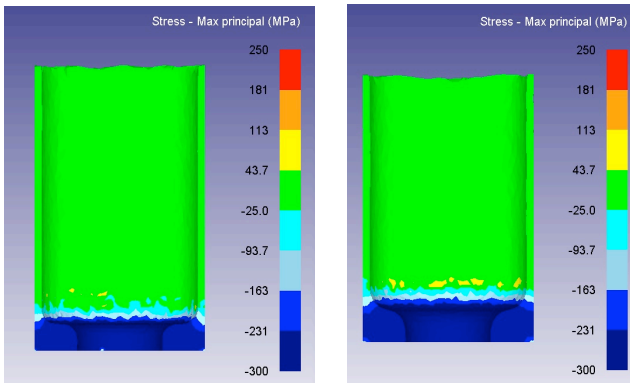
Рисунок 5. Схемы к оценке средних нормальных напряжений
($D_{заз} = 100$мм, $t = 15$ мм, $r = 0{,}9$)

В результате анализа было установлено, что снижение коэффициента трения с 0,25 до 0,05 при скорости деформирования 10 мм/с приводит к снижению напряжений на 10%. Снижение величины скорости деформирования до 1 мм/с при коэффициента трения 0,25 ведет к уменьшению сжимающих напряжений на 20 %. Снижение и скорости деформирования и коэффициента трения приводит к уменьшению сжимающих напряжений на 50 %. В целом можно сказать, что режим кратковременной ползучести с обеспечением минимальных коэффициентов трения обеспечивает значительное уменьшение сжимающих напряжений в изделии. Величины напряжений для алюминиевого сплава сопоставимы по величине и по характеру действия для деталей из титанового сплава. Стоит отметить, что в рассматриваемых случаях не наблюдается превышения критических растягивающих напряжений.

На рисунке 6 представлены схемы к оценке максимальных по абсолютной величине средних нормальных напряжений для разных значений скругления кромок пуансона.



$r = 1$ мм $r = 3$ мм



$r = 5$ мм $r = 7$ мм

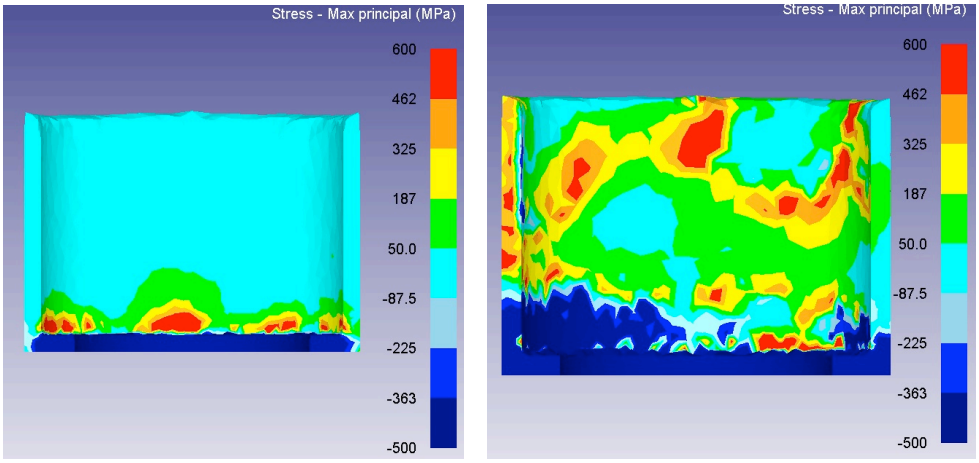
АМг4

Рисунок 6. Схемы к оценке средних нормальных напряжений

($D_{заг} = 60$ мм, $t = 15$ мм, $r = 0{,}9$)

В результате анализа было установлено, что увеличение радиуса скругления кромок пуансона не влияет на величины напряжений. Однако его увеличение приводит к снижению неравномерности напряжений в изделии.

На рисунке 7 представлены схемы к оценке максимальных по абсолютной величине средних нормальных напряжений для заготовок с диаметром 100 мм и величиной редукции 0,95. Схемы справедливы для случая штамповки заготовок в холодном состоянии.



АМг4 ВТ6

Рисунок 7. Схемы к оценке средних напряжений

($D_{заг} = 100$ мм, $t = 15$ мм, $T = 20°C$)

Полученные схемы позволяют понять насколько важно использование режима изотермической штамповки для исследуемых сплавов. По представленным выше

рисункам напряжения в заготовке намного выше допускаемых. Соответственно возможны нарушения сплошности изделий при штамповке.

На рисунке 8 представлены, полученные в ходе исследования зависимость силы процесса от относительной величины хода инструмента для разных температурных условий.

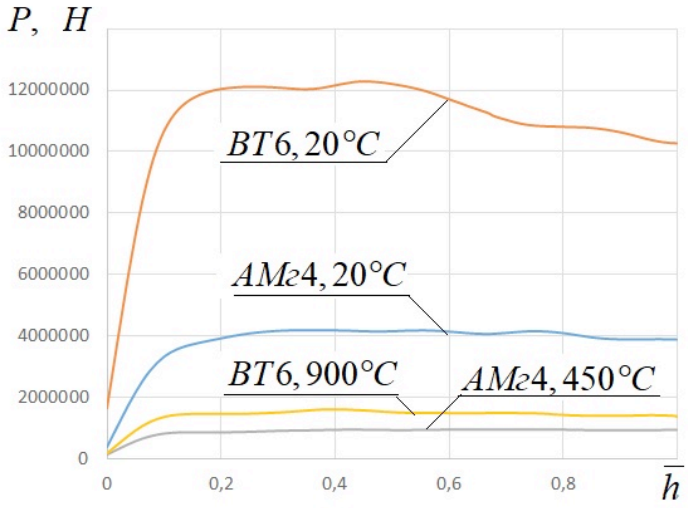


Рисунок 8. Зависимость силы процесса от относительной величины хода инструмента

Анализ предоставленной выше зависимости позволил установить, что изменение температурных условий деформирования исследуемых сплавов показал разные результаты. Как при деформировании алюминия, так и для титана с обеспечением нагрева заготовки сила снижается в 3 раза и 6 раз соответственно, обеспечивая наилучшие условия протекания процесса. Наибольших величин сила достигает при относительной величине хода 0,25 и далее либо не снижается, либо снижается незначительно.

На рисунках 9-11 представлены, полученные в ходе исследования зависимости силы процесса от величины редукции для разных значений диаметра заготовки.

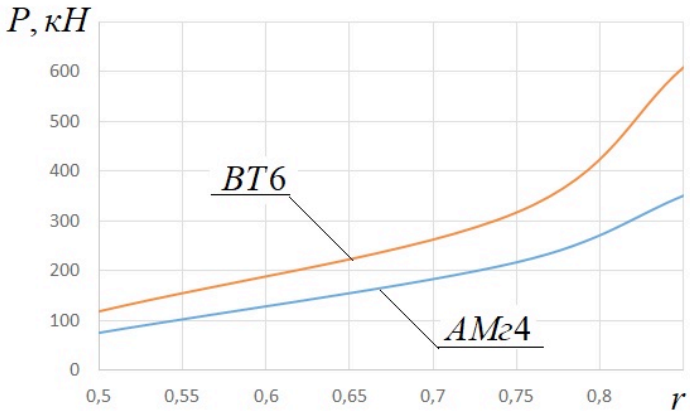


Рисунок 9. Зависимость силы процесса от редукции ($D_{заг} = 40$ мм, $t = 15$ мм)

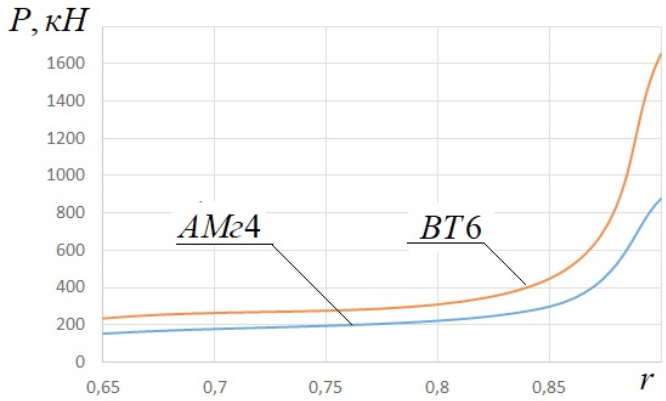


Рисунок 10. Зависимость силы процесса от редукции ($D_{заз} = 60$ мм, $t = 15$ мм)

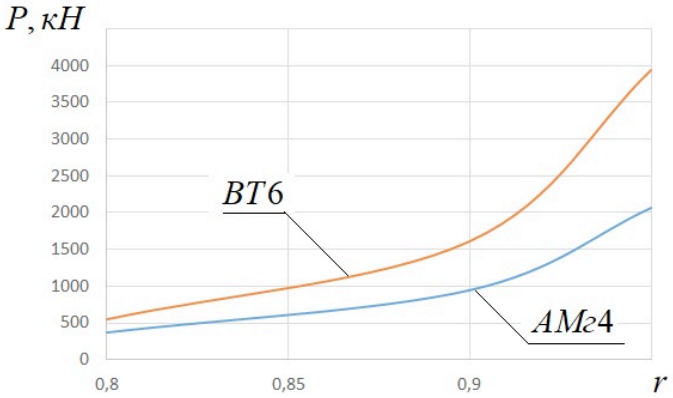


Рисунок 11. Зависимость силы процесса от редукции ($D_{заз} = 100$ мм, $t = 15$ мм)

Анализ представленных на рисунках 9-11 графических зависимостей показал, что рост величины редукции приводит к увеличению сил деформирования. В частности до значений редукции 0,75 при $D_{заз} = 40$ мм сила как для алюминиевого, так и для титанового сплавов растет в два раза, затем начинается более интенсивный рост силы (сила больше первоначального значения в 5…6 раз). До значений редукции 0,85 при $D_{заз} = 60$ мм сила растет на 50 %. Увеличение величины редукции с 0,85 до 0,9 сила вырастает более чем в 5 раз. До значений редукции 0,9 при $D_{заз} = 100$ мм сила растет в 2…3 раза. Увеличение величины редукции с 0,9 до 0,95 сила вырастает более чем в 8 раз.

В качестве заключения хотелось бы отметить, что обеспечение нагрева заготовок и поддержание их постоянной температуры в процессе деформирования позволяет значительно снизить растягивающие напряжения, критические значения которых при обычных условиях приводят к разрушению материала. Кроме того, нагрев и невысокие скорости деформирования позволяют значительно снизить силу выдавливания, что в итоге положительно сказывается на эффективности производства изделий.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00541.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория пластических деформаций металлов / [Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.
2. Zhichao Sun, Jing Cao, Huili Wu, Zhikun Yin Inhomogeneous deformation law in forming of multi-cavity parts under complex loading path // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Volume 254, Pages 179-192.

3. Springer P, Prahl U Characterisation of mechanical behavior of 18CrNiMo7-6 steel with and without under warm forging conditions through processing maps analysis // Journal of Materials Processing Technology, 2016, Volume 237. P. 216-234.
4. Zhengyang Cai, Min Wan, Zhigang Liu, Xiangdong Wu, Bolin Ma, Cheng Cheng Thermal-mechanical behaviors of dual-phase steel sheet under warm-forming conditions // International Journal of Mechanical Sciences. 2017, Volume 126. P. 79-94.
5. Verena Krusel, Peter Birnbaum, Andreas Kunke, Rafael Wertheim Metastable material conditions for forming of sheet metal parts combined with thermomechanical treatment // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2016. Volume 65 Issue 1. P. 301-304.
6. Aksenov S A, Chumachenko E N, Kolesnikov A V, Osipov S A Determination of optimal gas forming conditions from free bulging tests at constant pressure Journal of Materials Processing Technology. 2015. Volume 217. P. 158-164.
7. Kyung-Hun Leea, Byung-Min Kim Advanced feasible forming condition for reducing ring spreads in radial–axial ring rolling International Journal of Mechanical Sciences. 2013. Volume 76. P. 21-32.
8. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
9. Пасынков А.А., Борискин О.И., Ларин С.Н. Теоретические исследования операции изотермической раздачи труб из труднодеформируемых цветных спавов в условиях кратковременной ползучести // Цветные металлы. 2018. №2. С. 74-78.
10. Larin S.N., Pasynkov A.A. Analysis of forming properties during the isothermal upsetting of cylindrical workpieces in the viscous-plasticity mode // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 441, Issue 1, 2 November 2018.
11. Alves L.M., Afonso R.M., Silva C.M.A., Martins P.A.F. Boss forming of annular flanges in thin-walled tubes. Journal of Materials Processing Technology. 2017, Volume 250, December Pages 182-189
12.. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. М., Металлургия, 1976. 488 с.
13. Su-Hai Hsiang, Chao-Shun Liao Study on hot extrusion of tubes // Journal of Materials Processing Technology. 2017, vol 63, p 254-259
14. Lokesh Vendra S.S., Sunkulp Goel, Nikhil Kumar, Jayaganthan R. A study on fracture toughness and strain rate sensitivity of severely deformed Al 6063 alloys processed by multiaxial forging and rolling at cryogenic temperature // Materials Science and Engineering. 2017, vol 68616. p. 82-92
15 . Junquan Yu, Guoqun Zhao, Liang Chen Analysis of longitudinal weld seam defects and investigation of solid-state bonding criteria in porthole die extrusion process of aluminum alloy profiles // Journal of Materials Processing Technology. 2016, vol 237. p. 31-47

УДК 669.1.017

ПЕРЕГУДОВ А.А.,
ВОЛОГЖАНИНА С.А.,
ИГОЛКИН А.Ф.
Университет ИТМО

ВЛИЯНИЕ ВИДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ СТАЛИ 45ХН2МФА

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния режимов термической и термомеханической обработки на механические свойства конструкционной легированной стали 45ХН2МФА, используемой для изготовления торсионных валов, эксплуатируемых в том числе в условиях низких климатических температур. Показано, что комплекс свойств, учитывающих сопротивление малым пластическим деформациям и хладостойкость до температур -60 °С, может обеспечить закалка и отпуск под напряжением.

Ключевые слова: сталь 45ХН2МФА, торсионный вал; термическая обработка; динамический изгиб; хрупкое разрушение; работа разрушения.

PEREGUDOV A.A.,
VOLOGZHANINA S.A.,
IGOLKIN A.F.
ITMO University

INFLUENCE OF TYPES OF HEAT TREATMENT ON THE IMPACT STRENGTH OF 45CRNI2MOVN STEEL

Abstract. The paper presents the results of a study of the influence of thermal and thermomechanical processing modes on the mechanical properties of structural alloy steel 45CrNi2MoVN, used for the manufacture of torsion shafts, operated in low climatic temperatures. It is shown that a set of properties that take into account the resistance to small plastic deformations and cold resistance to temperatures of -60 °C can provide quenching and tempering under stress.

Keywords: elastic element; torsion shaft; heat treatment; dynamic bending; brittle fracture; work of destruction.

Введение.

В настоящее время развитие современной техники диктует необходимость использовать торсионные валы в условиях знакопеременной рабочей нагрузки, в том числе и в условиях низких климатических температур. Торсионные валы, широко применяют в энергетическом, транспортном машиностроении и горнодобывающей технике [1-3]. Торсионный вал – это упругий элемент, представляющий собой вал, работающий на кручение. По условиям работы торсионы нагружаются крутящим моментом, т. е. воспринимают деформацию чистого кручения, причем рабочая нагрузка может быть направлена как в одну, так и в обе стороны [4-9]. Для изготовления торсионов часто используют конструкционную легированную сталь 45ХН2МФА. Для обеспечения сопротивления малым пластически деформациям сталь подвергают закалке с последующим низким отпуском [10-17].

Цели исследования.

Целью исследования является выбор метода обработки стали 45ХН2МФА, который позволит обеспечить комплекс свойств торсионных валов для эксплуатации в условиях знакопеременных нагрузок и низких климатических температур.

Методика исследования.

Для проведения исследований был взят прокат диаметром 45 мм стали 45ХН2МФА в отожженном состоянии одной плавки. Сталь имела следующий химический состав, масс. %: C-0,44; Si-0,23; Mn – 0,64; Cr – 0,95; Ni – 1,52; Mo – 0,24; V – 0,14; Cu < 0,025; P < 0,020; S < 0,010.

Исследование образцов осуществлялось после следующих вариантов термической обработки (ТО): 1) закалка с 860 °С, охлаждение в масле, отпуск в интервале температур 200-400 °С в течение 1 часа; 2) двойная закалка с 860°С, охлаждение в масле, отпуск в интервале температур 200-400 °С в течение 1 часа; 3) высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) - образцы нагревали до температуры 1100 °С, после чего деформировали кручением со степенью деформации порядка 40 % и сразу охлаждали в масле, затем проводили отпуск в интервале температур 200-400 °С в течение 1 часа; 4) закалка с 860 °С, охлаждение в масле и отпуск под напряжением (ОПН) в интервале температур 200-400 °С в течение 0,5 часа. При проведении ОПН образцы одним концом устанавливали в неподвижную опору внутри печи, а второй конец нагружали крутящим моментом через вал, проходящий сквозь отверстие в крышке печи. Затем нагревали до температуры соответствующего отпуска, выдерживали, снимали нагрузку и охлаждали на воздухе. Величина крутящего момента подбиралась так, чтобы напряжения составляли (0,7-0,8) $\tau_{0,3}^{t}$. Здесь $\tau_{0,3}^{t}$ – величина предела текучести при кручении для каждой температуры отпуска (t), определенная предварительно на отдельных образцах.

Применение различных способов термомеханической обработки с деформацией кручением не позволяет использовать стандартные образцы прямоугольного сечения для оценки ударной вязкости из-за искажения профиля при кручении и неравномерности упрочнения по сечению образца. Поэтому сравнение сопротивления хрупкому разрушению после различных видов термической обработки при испытании на ударный изгиб проводилось на нестандартных образцах круглого сечения с острым надрезом. При изготовлении образцов острый надрез выполняли специальным резцом с углом при вершине 45° и радиусом закругления вершины 0,25 мм.

Обсуждение полученных результатов.

Изменение работы разрушения круглых образцов от температуры отпуска после различных видов термической обработки представлено на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что наибольшая работа разрушения при динамическом изгибе наблюдается после высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), немного ниже после отпуска под напряжением, еще ниже после закалки и самое низкое сопротивление хрупкому разрушению образцы имеют после двойной закалки. После ВТМО работа разрушения образцов в интервале температур отпуска 200-300 °С практически не изменяется, а при дальнейшем повышении температуры отпуска плавно повышается. После закалки и отпуска, а также отпуска под напряжением характер изменения работы разрушения одинаков, кривые изменений работы разрушения имеют слабо выраженный минимум при 300 °С. После двойной закалки повышение температуры отпуска в интервале 200-400 °С приводит к незначительному повышению сопротивления хрупкому разрушению.

Для определения влияния температуры испытания на сопротивление хрупкому разрушению образцы испытывали на ударный изгиб в интервале температур от -60 до +20 °С. Предварительно образцы подвергались закалке, двойной закалке, ВТМО и отпуску

под напряжением по режимам, позволяющим для каждого вида термообработки получить наилучшие упругие свойства, а главное, наименьшую остаточную деформацию после закручивания на аварийный угол. Термообработку по этим режимам проводили на образцах для исследования упругих свойств при кручении, из которых вырезали образцы требуемой длины и наносили острый надрез.

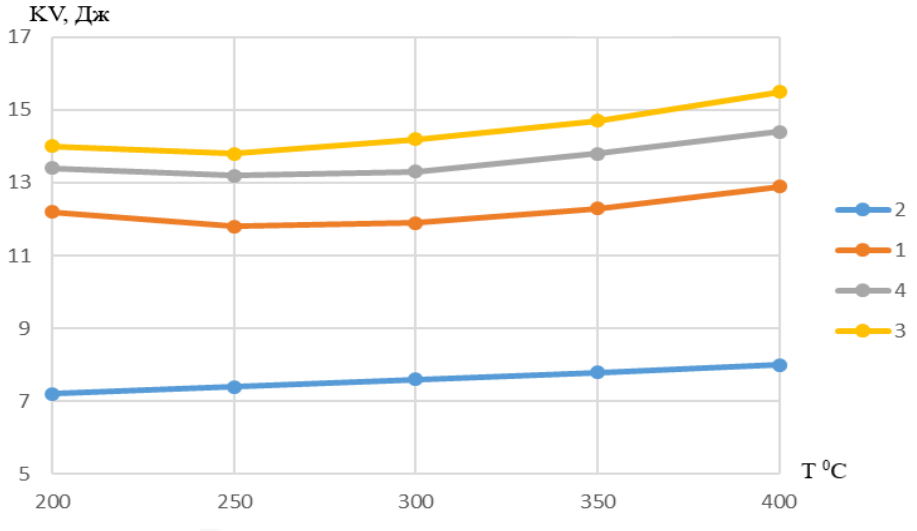


Рисунок 1 – Изменение работы разрушения при ударном изгибе после различных видов термообработки при различных температурах отпуска:
1 – закалка, 2 - двойная закалка, 3 – ВТМО, 4 - отпуск под напряжением

Изменение работы разрушения образцов при различных температурах испытания представлено на рис. 2. Сравнение работы разрушения показало, что в интервале температур от -60 до +20°С наибольшая работа разрушения наблюдается после ВТМО и отпуска 300 °С.

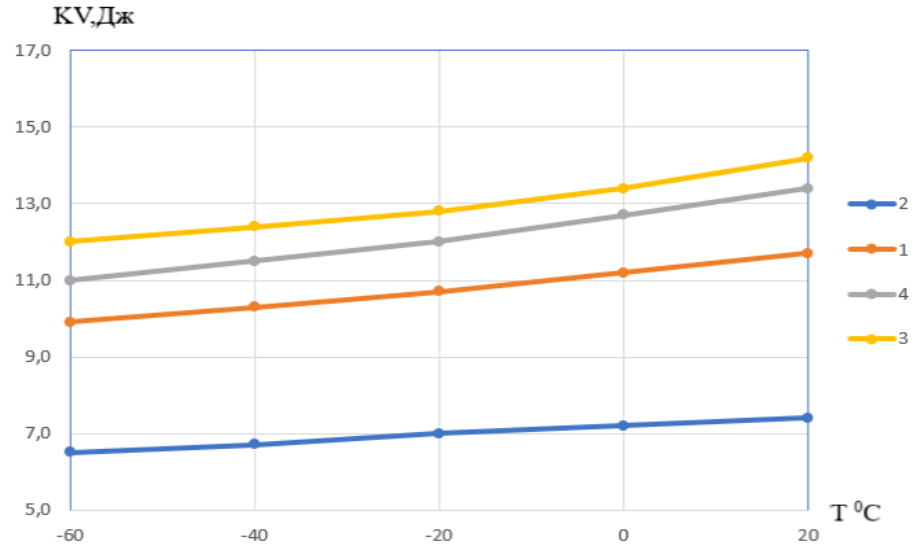


Рисунок 2 – Влияние температуры испытания на работу разрушения при ударном изгибе после различных видов термообработки:
1 – закалка и отпуск 300 °С, 2 - двойная закалка и отпуск 200 °С,
3 – ВТМО и отпуск 300 °С, 4 - отпуск под напряжением при 300 °С

После отпуска под напряжением работа разрушения образцов выше, чем после обычного отпуска при этой же температуре. Самое низкое сопротивление хрупкому разрушению наблюдается после двойной закалки и отпуска, причем если после закалки, ВТМО и отпуска под напряжением видна зависимость ударной вязкости от температуры испытания, то после двойной закалки величина ударной вязкости при различных температурах испытания практически одинакова.

фрактографическое исследование изломов позволило выявить существенные различия в характере разрушения образцов после применяемых видов термообработки, несмотря на почти одинаковые результаты визуального исследования.

После двойной закалки и испытания при температуре +20 °С, -20 °С и -60 °С вид излома носит идентичный характер – излом полностью хрупкий, ямок на изломе не наблюдается.

После ВТМО при температуре испытания +20 °С имеет вязкий характер ямочного типа. При понижении температуры испытания до -60 °С появляется в небольших количествах площади плоскостей скола.

После закалки и отпуска под напряжением характер излома смешанный, хрупко-вязкий, наряду с мелкоямочной структурой видны плоскости скола. При этих видах термообработки с понижением температуры испытания увеличиваются размеры плоскостей скола и соответственно уменьшается доля вязкого разрушения, в меньшей степени для отпуска под напряжением и в большей степени после закалки и отпуска.

Выводы.

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшая работа разрушения при испытаниях на динамический изгиб наблюдается после высокотемпературной термомеханической обработки, что дополнительно подтверждается при фрактографическом исследовании характера разрушения образцов. Однако, для торсионов, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, необходимо учитывать еще и сопротивление малым пластическим деформациям, которые на более высоком уровне обеспечивает отпуск под напряжением. Следовательно, для обеспечения комплекса свойств торсионных валов из стали 45ХН2МФА, работающих в обе стороны в условиях низких климатических температур, может быть рекомендована термическая обработка, состоящая из закалки с 860 °С с охлаждением в масле и отпуск под напряжением при температуре 300 °С.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rachschdadt A.G.* 1982 Steel Springs and Alloys. m. Metallurgiya. - P. 230.
2. *Pastukhova G.P., Rachschdadt A.G., Kaplun Y.A.* 1982 The Alloys' Dynamic Ageing. m. *Metallurgiya* P. 223.
3. *Stolyarov V.V.* 2009 Bauschinger Effect in Ultrafine-Grain Metals *The scientific and technical development Bulletin* 3(19) 52-58.
4. *Kolbasnikov N.G., Zotov O.G., Martyashov I.S., Sulyagin R.V.* 2012 Research on Bauschinger Effect, Physical Simulation of Conditioning the Microalloyed Steel properties in the Pipe Production process *Steel* 8.
5. *Zhuravlyov M.M.* 2014 The Engineering and Exploration of the Strengthening and Stabilizing Technology for processing the low-structured details like torsion shafts *the PhD in Technical Sciences inaugural dissertation. Saratov: Saratov State Technical University*. P. 135.
6. *Bernstein M.L., Zaimovsky V.A.* 1979 The Metals' mechanical properties. m., *Metallurgiya* 495.
7. *Dumanskiy I.O., Prokhorov A.V.* 2015 The Dynamic Ageing of Carboniferous Pearlite Class Harmonic Steels With the Aid of Fast Heating *Age-Hardening, Coating And Repair Technologies: Theory And Practice. The 17th International Research-to-Practice Conference*

Write-Ups. SPb., Polytechnic University Publishing House 310-314.
8. *Andreev A.K., Igolkin A.F., Vologzhanina S.A., Smirnova Y.A.* 2016 The Effect of Heat Treatment on Toughness of 45ХН2МФА Steel to Small Plastic Strain *Material Distortion and Rupture* 34-38.
9. *Igolkin A.F., Andreev A.K., Vologzhanina S.A., Smirnova Y.A.* 2015 The Effect of Heat Treatment Mode on CrNiMd Steel Elastic Properties and Cold Resistance *VII International Research-to-Practice Conference "Low-Tempreature and Food Technologies in the XXI Century" (Saint Petersburg, November 17-20, 2015): Conference Write-Ups* 1 244-247.
10. *Andreev A.K., Igolkin A.F., Vologzhanina S.A., Smirnova Y.A.* 2016 Enhancement Of Elastic Elements Properties For the Equipment Exploited in a Variety of climatic conditions *Cold Resistance, New Technologies for Technique and Constructions of North and The Arctic Region: The Write-Ups of All-Russian Conference with International Participation (Yakutsk, September 29-30, 2016)* 57-63.
11. *Ryabov V.V., Kniaziuk T.V., Mikhailov M.S., Motovilina G.D., Khlusova E.I.* 2017 Structure and properties of new wear-resistant steels for agricultural machine building *Inorganic Materials: Applied Research* 8(6) 827-836.
12. *Belyaev A.N., Efremov D.* 2017 The suppression of slightly damped torsional oscillations in autonomous power systems *Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. 7910854* 1483-1487.
13. *Smirnova Y.A., Andreev A.K., Igolkin A.F., Vologzhanina S.A.* 2018 *Tyazheloe mashinostroenie* 3 28-32.
14. *Andreyev A.K., Smirnova J.A., Igolkin A.F., Vologjanina S.A.* 2018 Influence of Emergency Load on the Residual Strain Value of Torsion Shafts *International Review of Mechanical Engineering* 12(9) 802-806.
15. *Андреев А.К., Смирнова Ю.А., Иголкин А.Ф., Вологжанина С.А.* Влияние аварийной нагрузки на величину остаточной деформации торсионных валов / Современное машиностроение. Наука и образование, 2017. - № 6. - С. 603-612.
16. *Ильина Е.Е., Продан Н.В., Вологжанина С.А.* Использование пульсаций давления колеблющегося газового потока для обработки термоупрочненных образцов стали 40Х / Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2016. - Т.16. №4(104). - С. 635-641.
17. *Ilina E.E., Prodan N.V., Vologzhanina S.A., Volobuev I.A.* 2017 Application of Pulsations of Oscillating Gas Flow Pressure for Processing the Heat-Strengthened Samples of Steel *International Journal of Applied Engineering Research* 12(23) 13108-13112.

УДК 621.391

ПИИРАЙНЕН В.Ю.,
Санкт-Петербургский горный университет
ДЕНИСОВ В.М.,
ТИМОФЕЕВ А.В.
ООО «Флагман Гео», Санкт-Петербург

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ И СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Аннотация. В статье рассматривается новый концептуальный подход к созданиюсовременной производственной и социально-культурной инфраструктуры в нефтегазодобывающих районах Крайнего Севера, основанный на использовании передовых материалов и технологий интеллектуального мониторинга, а также организации перманентного контроля и диагностики технического состояния вновь создаваемых и эксплуатируемых объектов.

Ключевые слова: криолитозона**,** слабые грунты, легкий бетон, топологическое самозаклинивание, мониторинг, интеллектуальный контроль, техническая диагностика.

PIIRAYNEN V.Y.,
Saint-Petersburg Mining University
DENISOV V.M.,
TIMOFEEV A.V.
“Flagman Geo” Ltd., Saint-Petersburg, Russia

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND NEW MATERIALS FOR INDUSTRIAL AND SOCIAL INFRASTRUCTURE OF FAR NORTH

Abstract. The article considers a new conceptual approach to creation of modern production and social-cultural infrastructure in gas-and oil producing regions of Far North. The concept is based on the use of advanced materials and technologies of intellectual monitoring, and also uses permanent control and diagnostics of technical condition of newly created and operated objects.

Keywords: cryolithozone, soft soils, lightweight concrete, topological interlocking, monitoring, intelligent control, technical diagnostics.

Введение.

Пристальное внимание, уделяемое в последние годы промышленному освоениюсеверных территорий, связано в значительной степени с огромными запасами разведанных там углеводородов и стратегическим значением для страны Северного морского пути. Ключевыми моментами успешного продвижения данного направления являются обеспечение транспортной доступности территорий и создание современной производственной и социально-культурной инфраструктуры. Решение поставленных задач без применения новых материалов и технологий представляется крайне затруднительным.

Значительная часть северных территорий находится вкриолитозоне, которая претерпевает в последние десятилетия серьёзные структурные изменения.

В настоящее время, вследствие климатических изменений, в криолитозоне критически затруднены процессы обслуживания существующей, а также создание новой

производственной и социальной инфраструктуры: зданий, дорог, буровых площадок и трубопроводов, рабочих посёлков и городов. Здания, в результате воздействия сезонных процессов таяния/замерзания, подвергаются значительным циклическим нагрузкам, ведущим к их ускоренному разрушению. Дороги лежат на слабых грунтах: существующие дороги постоянно деформируются, а строительство новыхобходиться крайне дорого из-за отсутствия на месте необходимых компонентов классической дорожной одежды (щебень, песок и т.п.). В летний период дорожное строительство приходится вести практически на болотах. С аналогичными проблемами приходится сталкиваться при строительстве вертолётных площадок, которые играют огромную роль в логистическом обеспечении процессов разведки, добычи и транспортировки нефти и газа. Точно такая же ситуацияобстоитс обустройством оснований трубопроводных систем.

Обсуждение.

В настоящей работе представлен проект, предусматривающий решение части вышеперечисленных проблем за счет использования двух концепций:

1. Концепт использования в строительстве, в том числе дорожном, опорного основания нового типа, состоящего из нескольких слоёв, включающих нижний несущий монолитный слой из «лёгкого» высокопрочного бетона и последующие сегментированные сборные слои из самозаклинивающихся износостойких и ударопрочных элементов.

2. Концепт организации сквозного интеллектуального мониторинга базовой критической инфраструктуры,включая буровые и вертолетные площадки, дороги, трубопроводы, рабочие посёлки и др., с целью обеспечения перманентного контроля и оперативной идентификации их напряженно-деформационного статуса, а такжепрогнозирования развития деградационных трендов их состояния.

Данный вид мониторинга предлагается реализовать на основе технологии IIoT(промышленный интернет вещей). В настоящее время этот подход переживает период бурного роста и созрел для эффективного практического применения, в том числе с привлечением ряда технологий искусственного интеллекта в рамках концепта предсказательного обслуживания (ML PdM: предсказательное обслуживание, основанное на технике машинного обучения).

Объединение двух концептов в единую концепцию не является случайным.По мнению авторов, слияние этих технических решений в единое целое способно создать синергетический эффект, который позволит обеспечить высокие результаты при строительстве на Севере новых объектов производственной и социальной инфраструктуры, а также обеспечить качественную и бесперебойную эксплуатациюуже существующих объектов.

Главной целью проекта является разработка прорывной технологии строительства и интеллектуального контроля состояния оснований и фундаментов базовой инфраструктуры нефтегазодобывающих регионов, что позволит создать условия для надежного функционирования производственной и бытовой инфраструктуры в условиях резкого изменения климата, а такжеобеспечить перманентную транспортную доступность северных территорий.

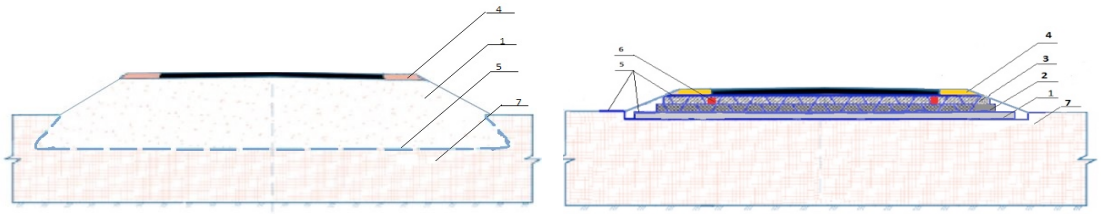
Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **первоочередные задачи**:

1. Максимально снизить влияние фактора слабых грунтов на показатели надёжности фундаментов и оснований производственной и социальной инфраструктуры (дороги, здания, взлётно-посадочные и буровые площадки, оборудование и трубопроводы транспортных систем и др.), с одновременной организацией своевременного обнаружения разрушительных трендов и их оперативного устранения.

2. Организовать сквозной интеллектуальный мониторинг критической инфраструктуры с использованием современных методов превентивного сервисного обслуживания и контроля.

Для решения **первой задачи** предлагается при создании инфраструктурных объектов (в том числе при строительстве опорных конструкций различного назначения)использовать многослойные основания, нижний несущий слой которых изготавливается из высокопрочного легкого бетона, апоследующие слои, чередующиеся с геотканным полотном, выполняются сборными из самозаклинивающихся элементов [1], образующих единую немонолитную конструкцию из износостойких и ударопрочных материалов. При этом слои, расположенныевыше несущего,оснащаются различными сенсорами (инклинометры, инклинометрические косы, виброметры, датчики температуры и другие),что позволяет организовать непрерывный мониторинг технического состояния объекта, используя стандарты IIoT-платформы с целью создания единой информационной среды, включая каналы передачи и сбора данных.

Для сравнения в качестве примера на рис. 1 представлена схема насыпи при строительстве автодорог н на болотах II типа, по современной традиционной (а) и концептуальноновой технологии (б).



а) б)

Рисунок 1 – Насыпь на болотах II типа

Конструкция дорожной одежды, согласно новой концепции представляет собой «слоёный пирог», состоящий из бетонного несущего основания 1, на который уложены немонолитные опорные слои 2 и 3, равномерно распределяющие нагрузку по всему объёму дорожной одежды, как сверху от двигающегося транспорта и перепада температур, так и снизу от вспучивания и оттаивания грунтов. Поверх опорных слоёв укладывается асфальтобетонное или песчано-гравийное дорожное покрытие 4. Между всеми слоями прокладывается полотно из геоткани 5, нижний несущий слойуложен на полотно из геоткани. В один из опорных слоёв устанавливаются тензодатчики 6, фиксирующие и передающие по беспроводной сети информацию о техническом состоянии дороги и сведения о транспортном потоке.

В качестве материала нижнего слоя используется самовыравнивающийся расширяющийся лёгкий пенобетон, имеющий прочностные характеристики многократно превосходящие аналогичныедля обычных бетонов, что позволяет в 3-4 раза снизить толщину несущего основания дороги и, соответственно, сократить срокии затраты на строительство, не смотря наотносительно повышенную стоимость этого материала [2].

Особенностью бетона является то, что он применяется в жидком состоянии и может укладываться на неподготовленные поверхности. В случае использованияпри строительстве дорог на слабых грунтах достаточно уложить его непосредственно на грунт, предварительно постелив геополотно в качестве основания, и установив ограничительную опалубку.

Надёжное функционирование относительно тонкого нижнего монолитного несущего слоя 1 обеспечивается укрытием его немонолитным опорным слоем из самозаклиненных блоков 2 остеоморфной формы (рис. 2) с большой площадью выпукло-вогнутых поверхностей [3]. Этот опорный слой воспринимает и демпфирует (равномерно распределяет) напряжения, возникающие в результате вспучивания или оттаивания грунта. Блоки данного слоя изготавливаются методом скоростной 3D-печати из недорогого строительного материала или отливаются из того же лёгкого высокопрочного бетона.

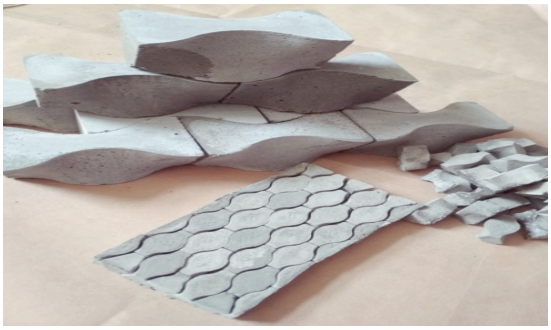


Рисунок 2 – Бетонные остеоморфные блоки

Следующий опорный слой 3, предшествующий слою внешнего дорожного покрытия 4, изготавливается из высокопрочного пластика методом 3D-печати или вакуумного формования, и представляет собой, по аналогии с предыдущим слоем, немонолитную опорную конструкцию из самозаклиненных блоков остеоморфной формы.

Слои 2 и 3 имеют неодинаковую толщину, что обусловлено различными нагрузками и напряжениями, которые слои испытывают и должны демпфировать.

Немонолитная сегментированная конструкция в опорном слое 3 позволяет устанавливать в нём тензометрические датчики, которые по мере необходимости могут без особых затруднений заменяться.

Верхний слой дорожной одежды в виде асфальтобетонного или иного покрытия выполняется по традиционной технологии дорожного строительства.

Уверенность в эффективности предложенного многослойного основания базируетсяна ранее проведённых исследованиях [3-5] и результатах предварительных прочностных испытаний (рис. 3) трёхслойных бетонно-пластиковых сэндвич-пластин, представленных в табл. 1. Входе испытаний было показано кратное увеличение характеристик при переходе от монолитно-сегментированного к полностью сегментированному варианту сборки.

а) б)

Рисунок 3 – Испытание сэндвич-пластин на растяжение при изгибе:
а - сегментированная конструкция; б - монолитно-сегментированная конструкция

Таблица 1.

Результаты предварительных прочностных испытаний трёхслойных бетонно-пластиковых сэндвич-пластин

Конструкция	**$l_{расч}$, см**	**b, см**	**h, см**	**F, кгс**	**$R_{изг}$, кгс/см²**
Монолитно-сегментированная	10	8	4	250	19,5
Сегментированная	10	8	4	550	42.9

$$R_{изг} = \frac{F \times l}{b \times h^2}$$

Для решения **второй задачи,** основываясь на принципах комплексного мониторинга протяженных объектов [6], предлагается оснастить элементы инфраструктуры сенсорами различного типа. В состав этой группы сенсоров входят: инклинометры, инклинометрические гирлянды, виброметры, датчики температуры и другие. Это позволяет организовать непрерывный мониторинг технического состояния инфраструктуры (зданий, дорог, мостов, трубопроводов, ТЭЦ) на базе единой IIoT платформы. Предполагается разработать ***единую информационную среду***, включая каналы передачи и сбора данных, а также создание распределенных банков данных технологической, экологической и мониторинговой информации по всем объектам критической инфраструктуры рабочих поселков и производственных площадок.

Информационная среда ***предназначена*** для аккумулирования измерений параметров текущего состояния каждого элемента инфраструктуры, рабочих параметров каждой единицы технологического оборудования, а также результатов мониторинга экологической обстановки. Таким образом, будет сформирована BigData среда целого региона, аккумулирующая в себе гетерогенные данные непрерывного мониторинга инфраструктуры и обеспечивающая сбор данных для функционирования группы автоматических интеллектуальных сервисов.

Интеллектуальные сервисы ***предназначены*** для своевременного обнаружения разрушительных деградационных трендов отдельных элементов инфраструктуры и оборудования, а также оперативное устранение их причин. Общая схема организации сенсорной сети представлена на рис. 4.

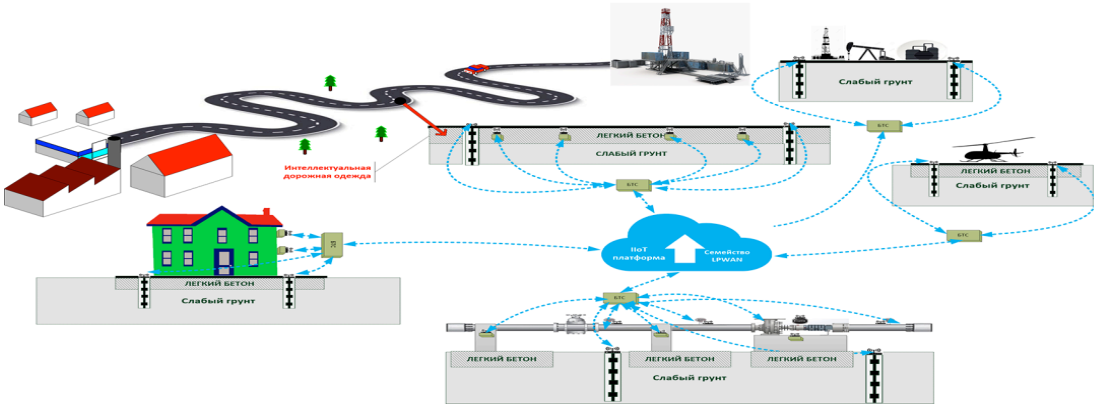


Рисунок – Схема сенсорной сети в стандарте IIoT

Основные функции интеллектуальных сервисов контроля инфраструктуры:

1. ***Комплексный интеллектуальный контроль технического состояния зданий, сооружений и инженерных конструкций***. Обеспечение своевременного принятия мер по устранению возникающих негативных тенденций, ведущих к ухудшению этого состояния.

2. ***Контроль экологической обстановки*** в границах города (вредные выбросы в атмосферу, уровень загазованности, радиационная обстановка и прочее).

3. ***Оперативный контроль (техническая диагностика)*** текущих режимов функционирования сложного технологического оборудования (насосное оборудование, двигатели, водопроводное хозяйство и прочее), входящего в состав критической городской инфраструктуры.

4. ***Автоматическое обнаружение предотказных состояний*** технологического оборудования, входящего в состав критической городской инфраструктуры на основе использования некоторых математических моделей (анализ временных рядов, методы обнаружения модельных разладок и прочее), а также подходов с использованием методов Искусственного Интеллекта (AI). В том числе: различные методы автоматической классификации состояния сложных систем на основе искусственных нейронных сетей

различной топологий (ANN), бустинговых методов (XGBoost, CatBoost и их различных вариаций) [10-13].

5. ***Оптимизация планов сервисного обслуживания технологического оборудования*** с использованием концепции MLPdM (Machine Learning Predictive Maintenance). Переход к ***превентивному сервисному обслуживанию*** с использованием современных достижений MLPdM [7, 8].

Заключение. Описанные в статье шаги по созданию современной производственной и социальной инфраструктуры являются, по мнению авторов, крайне важными для освоения северных территорий в нефтегазодобывающих регионах страны, поскольку именно там, как не где, велико влияние факторов слабых грунтов на надёжность фундаментов и оснований инфраструктурных объектов(зданий, оборудования, дорог, ЛЭП и т.п.), и где своевременное обнаружение разрушительных трендов и их оперативное устранение имеет огромное экономическое значение.

Исследования и разработки отечественных и зарубежных учёных в области новых материалов и создания единой информационной среды на базе комплекса методов и подходов Искусственного Интеллекта дают основания рассчитывать на скорейшее положительное решение рассмотренных в данной работезадач.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Piiraynen V.*, *Estrin Y.* 2017 New Approch to Read Construction in 0il-Producing Regions of Western Siberia *IOP Science* 87.
2. https://www.monolithic.org/blogs/presidents-sphere/salt-water-concrete-a-reality
3. *Dyskin A.*, *Estrin Y., Pasternak E.* 2019 Topological Interlocking Materials *Architectured Materials in Nature and Engineering, Springer Series in Materials Science* 282 23-49.
4. *Molotnikov A., Gerbrand R., Bouaziz O., Estrin Y.* 2013 Sandwich Panels with a Core Segmented into Topologically Interlocked Elements *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS* 15(8) 728-731.
5. *Пиирайнен В.Ю.* Топологическое самозаклинивание как принцип инженерного дизайна пристроительстве морских и прибрежных сооружений / В.Ю. Пиирайнен, Ю.З. Эстрин // Записки Горного института. - 2017. - Т.226. - С. 480-486.
6. *Timofeev A., Denisov V.* 2016 Multimodal Heterogeneous Monitoring Of Super-Extended Objects *Modern View. Recent Advances in Systems Safety and Security, Edited by Grigore Stamatescu, 06/: chapter Volume 62 of the series Studies in Systems, Decision and Control: pages; Springer International Publishing* 97-116.
7. *Timofeev A., Denisov V.* 2020 Machine Learning Based Predictive Maintenance of Infrastructure Facilities in the Cryolithozone *Pricop E., Fattahi J., Dutta N., Ibrahim M. (eds) Recent Developments on Industrial Control Systems Resilience. Studies in Systems Decision and Control, Springer, Cham* 255.
8. *Тимофеев А.В.* Идентификация стадии деградации оборудования в системах сервисного обслуживания превентивного типа / А.В. Тимофеев, В.М. Денисов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2019. - №6.

УДК 539.4.016.3: 669.146:536.4

ПРЯХИН Е.И.
Санкт-Петербургский горный университет
ЦУКАНОВ Д.В.,
СМИРНОВА Д.Л.
НИЦ «Курчатовский институт» -
ЦНИИ КМ «Прометей»

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ПОКОВОК ИЗ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫХ МАРОК СТАЛИ В ХОДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАКАЛКИ ЗАГОТОВОК БОЛЬШИХ СЕЧЕНИЙ

Аннотация. В работе проведено исследование изменения механических свойств в ходе охлаждения, моделирующего окончательную термообработку поковок – закалку. Данное исследование позволило оценить, возникающие напряжения в поковках, во взаимосвязи со структурой, и выполнить рекомендации по проведению окончательной термической обработки.

Ключевые слова: ротор; турбина; закалка; окончательная термообработка; крупногабаритное производство; тяжелое машиностроение.

PRYAHIN E.I.
Saint-Petersburg Mining University
TSYKANOV D.V.,
SMIRNOVA D.L.
NRC “Kurchatov Institute” -
CRISM “Prometey”

ASSESSMENT OF STRESS LEVEL IN THE HARDENING OF WORKPIECES OF LARGE CROSS SECTIONS AND RECOMMENDATIONS ON REFRIGERATION TECHNOLOGY

Abstract. The study of changes in mechanical properties during cooling, simulating the final heat treatment of forgings-quenching. This study allowed us to evaluate the resulting stresses in forgings, in relation to the structure, and to implement recommendations for the final heat treatment.

Keywords: rotor; turbine; quenching; final heat treatment; large-size production; heavy engineering.

В ходе производства крупногабаритных поковок, во время закалки возникают риски возникновения разнонаправленных напряжений по сечению, которые могут привести в растрескиванию и даже к разрушению поковки. Данные процессы связаны с тем, что поверхность охлаждается быстрее, а центральные сечения поковки медленнее.

Целью работы являлось изучение изменения механических свойств металла поковок из среднелегированной стали 3Cr-Ni-Mo-V композиции в процессе охлаждения, для выдачи рекомендаций по снижению уровня напряжений при закалке крупногабаритных заготовок (валов, роторов, штамповых плит и др.).

Анализируемые положения:

– анализ изменения $\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$, δ_5, ψ в ходе охлаждения;

– взаимосвязь изменения механических свойств с кинетикой бейнито–мартенситного превращения;

– анализ сопутствующих процессов (релаксация напряжений за счет процесса самоотпуска α-фазы и снижения уровня текущих напряжений в процессе релаксации - напряжений микроуровня).

Ранее проводилось экспериментальное определение механических свойств при растяжении в ходе изотермического аустенито-бейнитного и аустенитно-мартенситного превращений стали мартенситного класса Cr-Ni-Mo-V композиции и изучение оптимальности температурного режима сварки, с помощью рентгеноструктурного анализа с определением интегральной ширины линии β, связанной с микронапряжениями и изменением дисперсности блоков мозаики, при моделировании термического цикла в металле (нагрев 1200 °С, охлаждение и изотермическая выдержка в диапазоне температур 100 ÷ 500 °С, с последующим испытанием на разрыв). Было показано, что оптимальным диапазоном температур, с точки зрения снижения уровня напряжений был температурный уровень в районе 300 °С [1].

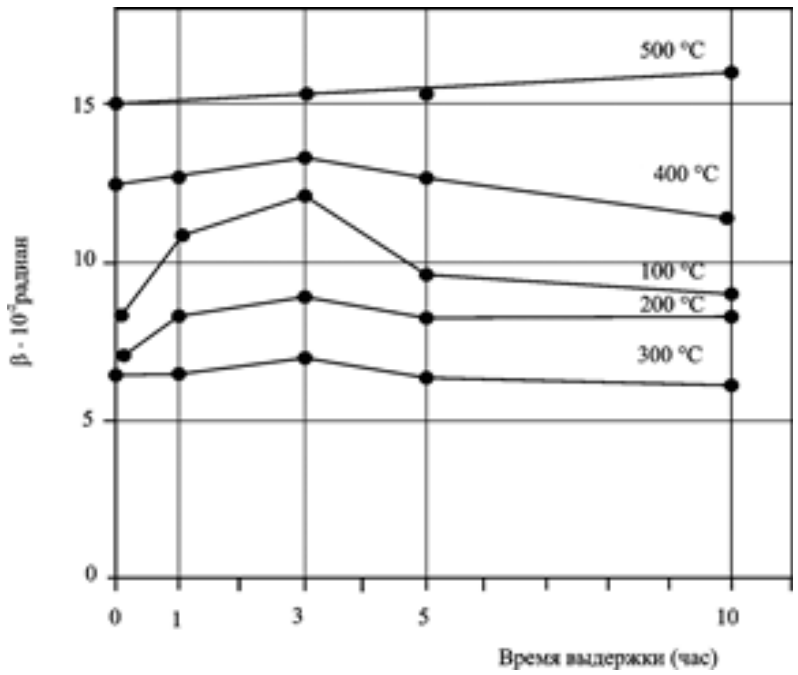


Рисунок 1 – Зависимость интегральной ширины линии β стали мартенситного класса Cr-Ni-Mo-V композиции после аустенитизации при температуре 1200 ºС и изотермической выдержки продолжительностью до 10 ч при температуре ºС: 1 - 300; 2 - 200; 3 - 100; 4 - 400; 5 - 500, при последующем охлаждении

Для данной работы была выбрана подобная методика изучения процессов.

Исследования выполняли путем нагрева образцов из среднелегированной стали 20Х3НМФА, до температуры под закалку 900 °С в муфельной печи, с последующим быстрым переносом в печь испытательной машины, уже нагретой до выбранной температуры 250, 300, 400, 500 °С. Когда образец охлаждался до температуры печи испытательной машины, т. е. температура образцов достигала 250, 300, 400, 500 °С, образцы подвергали испытаниям на разрыв. При испытаниях производились построения диаграмм растяжения [2-4].

После были произведены анализ полученных диаграмм и металлографические исследования зон разрывов образцов (табл. 1).

Отмечается, что с понижением температуры испытания, в ходе этого охлаждения происходит γ→α превращение с преобладанием большей доли α – структуры в диапазоне 500 ÷ 300°С, где при температуре 300°С превращение практически заканчивается. Это

видно и из соотношения $\sigma_{0,2}/\ \sigma_В$ – оно возрастает, достигая практически 0,8 и это при высоких характеристиках относительного удлинения и относительного сужения. Явление повышенной пластичности в ходе бейнито–мартенситного превращения наблюдается совершенно явно.

Таблица 1

Результаты механических свойств

Температура испытания, °С	500	400	300	250
Скорость охлаждения от $T_{аust}$ до $T_{испытания}$, °С/сек	0,06	0,09	0,09	0,07
$\sigma_{0,2}/\ \sigma_В$, МПа	0,655	0,739	0,797	0,830
$\sigma_В$, МПа	754	1044	1127	1086
$\sigma_{0,2}$, МПа	494	772	898	901
δ, %	20,8	17,9	20,8	13,4
ψ, %	72,6	57,0	63,1	49,1

По итогам работы сделаны выводы:

– рекомендуется производить охлаждение в закалочной среде до момента, когда температура в центре поковки (теплоинерционная точка) будет не ниже 250–300 °С;

– при этом превращение аустенита в бейнит будет проходить в меньших сечениях при меньшем уровне напряжений;

– в ходе А→Б превращения в диапазоне температур 400–250 °С наблюдается явление сверхпластичности, сопровождающееся самоотпуском «закаленных структур» и понижением уровня микронапряжений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цуканов В.В.* Современные стали и технологии в энергомашиностроении. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2014.
2. ГОСТ 9651-84. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. - М.: Изд-во стандартов, 1984. – 41 с.
3. Фазовые и структурные превращения в стали и обоснование режимов термической обработки крупногабаритных заготовок в машиностроении. Учебное пособие / В.В. Цуканов, Г.Ю. Калинин // СПб.: ФГУП «ЦНИИ КМ Прометей, 2012. – 126 с.
4. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. Изд. - 3-е изд. перераб. и доп. / Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. - М.: Металлургия, 1983.

УДК 539.4.016.3: 669.146:536.4

ПРЯХИН Е.И.
Санкт-Петербургский горный университет
ЦУКАНОВ Д.В.,
СМИРНОВА Д.Л.
НИЦ «Курчатовский институт» -
ЦНИИ КМ «Прометей»

КИНЕТИКА ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕЖИМА ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЗАКАЛКЕ

Аннотация. С целью изучения превращений аустенита, происходящих в металле по сечению поковки из стали 20Х3НМФА при закалке, в работе применены модельные скорости охлаждения, моделирующие реальные. Результаты сравнены с термокинетической диаграммой, получаемой с постоянными скоростями охлаждения. Произведена оценка сходимости температурных параметров превращений при модельных скоростях и при постоянных.

Ключевые слова: ротор; турбина; закалка; окончательная термообработка; крупногабаритное производство; тяжелое машиностроение.

PRYAHIN E.I.
Saint-Petersburg Mining University
TSYKANOV D.V.,
SMIRNOVA D.L.
NRC “Kurchatov Institute” -
CRISM “Prometey”

KINETICS OF TRANSFORMATION OF AUSTENITE OF MEDIUM-ALLOY STEELS IN THE SIMULATION OF COOLING MODE DURING QUENCHING

Abstract. In order to study the transformations of austenite occurring in the metal along the cross-section of 20H3NMFA steel forgings during quenching, we used model cooling rates that simulate real ones. The results are compared with a thermokinetic diagram obtained with constant cooling rates. The convergence of the temperature parameters of transformations at model velocities and at constants is estimated.

Keywords: rotor; turbine; quenching; final heat treatment; large-size production; heavy engineering.

В ходе закалки крупных поковок в любой закалочной среде (вода, масло, комбинировано) охлаждение металла происходит с различными скоростями в различных зонах по сечению. Для оценки структурного состояния в ходе процесса закалки крупногабаритной поковки сечением около 1000 мм было предпринято исследование фазовых и структурных превращений при постоянных скоростях охлаждения (по принятой методике при построении стандартных термокинетических диаграмм – ТКД) и при модельных скоростях охлаждения свойственным скоростям охлаждения реальной заготовки (рис. 1). Эксперименты проводились на дилатометре [1-4].

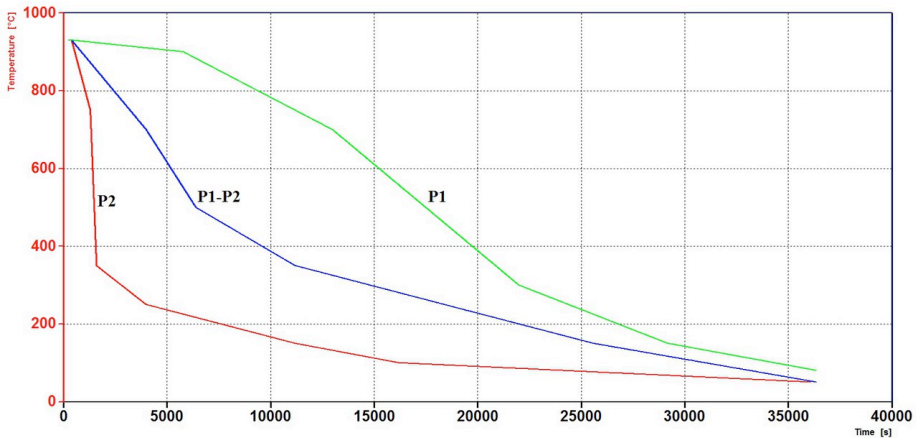


Рисунок 1 – Изменение температуры в процессе охлаждения при закалке заготовки сечением 1000 мм:
Р1 – центр; Р1-Р2 – ½ радиуса; Р2 - поверхность

Анализ микроструктуры образцов полученных после построения ТКД подтвердил ожидаемые результаты: при скоростях охлаждения от 5 °С/сек до 0,1 °С/сек наблюдается мелкодисперсная структура бейнито–мартенситной смеси, при меньших скоростях охлаждения в структуре начинают присутствовать мелкие выделения феррита округлой формы с величиной в пределах до 15 ÷ 20 μm. Эти выделения феррита соответствуют начальной зоне превращения аустенита между A_{r3} ÷ A_{r1} (диапазоном до 60 ÷ 80 °С), дальнейшее охлаждение и превращение аустенита происходит в бейнито–мартенситной зоне [5].

Представленные расчетные режимы охлаждения центра, ½ радиуса и поверхности показывают неравномерную скорость охлаждения поковки. По этим режимам охлаждения были построены дилатометрические кривые превращений для 3-х зон поковки (рис. 2). Показано наличие критических точек феррито–перлитного превращения A_{r3} и A_{r1} в центре и ½ радиуса, и связанное с этим незначительное количество феррита в микроструктурах этих образцов. В образце, моделирующего поверхность, произошло только бейнито–мартенситное превращение.

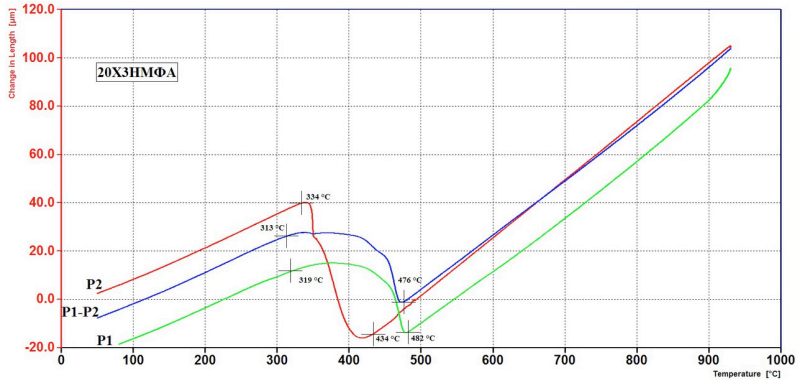


Рисунок 2 – Дилатометрические кривые превращений при моделировании охлаждения при закалке заготовки сечением 1000 мм:
Р1 – центр; Р1-Р2 – ½ радиуса; Р2 – поверхность

Сведенные в одну диаграмму результаты полученные при постоянной скорости охлаждения (ТКД) и при имитации закалки, показали хорошую сходимость как по температурным зонам диффузионного превращения (A_{r3} ÷ A_{r1}), так и по характеру полученных микроструктур (рис. 3).

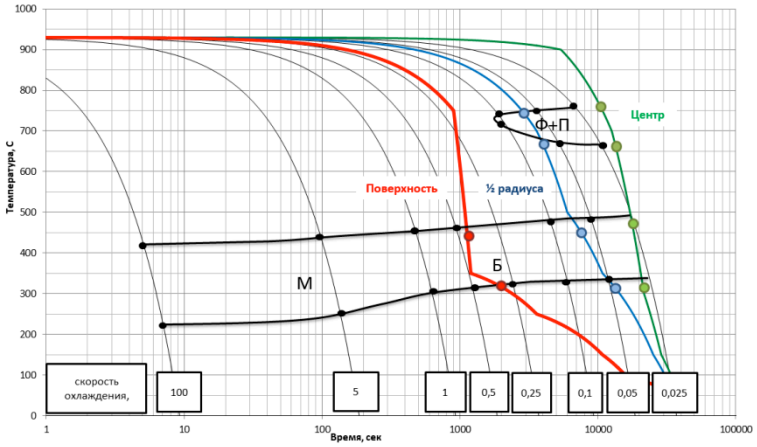


Рисунок 3 – Сравнение термокинетической диаграммы и температурно-кинетических параметров превращений при закалке

Однако для анализа проходящих превращений в крупногабаритных поковках рекомендуется производить анализ на основе именно моделирующих скоростей, данные результаты можно использовать, для оценки полноты превращений и выдачи рекомендаций по режиму окончательной термической обработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цуканов В.В., Сивенков А.В.* Основы промышленного производства крупногабаритных металлургических полуфабрикатов. Раздел: основные виды термической обработки крупных поковок в промышленности. Уч. пособие. - СПб.: НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», 2018. - 108 с.
2. *Цуканов В.В.* Современные стали и технологии в энергомашиностроении. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2014.
3. *Цуканов В.В., Смирнова Д.Л.* Оценка кинетики превращений аустенита в крупногабаритных заготовках из среднелегированной стали Cr-Ni-Mo-V композиции в ходе закалки / Г12 «Гагаринские чтения – 2019»: Сборник тезисов докладов. – М.: МАИ, 2019, с. 923.
4. *Попов А.П., Попова А.Е.* Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. – М: Машгиз, 1961.
5. *Барахтин Б.К., Немец А.М.* Справ. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. - СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 490 с.

УДК 539.4.016.3: 669.146:536.4

ПРЯХИН Е.И.
Санкт-Петербургский горный университет
ЦУКАНОВ Д.В.,
СМИРНОВА Д.Л.
НИЦ «Курчатовский институт» -
ЦНИИ КМ «Прометей»

ОЦЕНКА УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЗАКАЛКЕ ЗАГОТОВОК БОЛЬШИХ СЕЧЕНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕХНОЛОГИИ ОХЛАЖДЕНИЯ

Аннотация. В работе проведено рассмотрение уровня напряжений при закалке стальных заготовок больших сечений, особенно на заключительных стадиях охлаждения – диапазоне температур бейнито–мартенситного превращения при малых скоростях снижения температуры металла в данном диапазоне температур. Предложена схема температурного режима по переходу от температуры конца охлаждения при закалке на режим отпуска.

Ключевые слова: цилиндр; ротор; напряжения; мартенситное превращение; бейнитное превращение; закалка; самоотпуск; окончательная термообработка.

PRYAHIN E.I.
Saint-Petersburg Mining University
TSYKANOV D.V.,
SMIRNOVA D.L.
NRC “Kurchatov Institute” -
CRISM “Prometey”

ASSESSMENT OF STRESS LEVEL IN THE HARDENING OF WORKPIECES OF LARGE CROSS SECTIONS AND RECOMMENDATIONS ON REFRIGERATION TECHNOLOGY

Abstract. In this paper, we consider the stress level when quenching steel billets of large cross sections, especially at the final stages of cooling-the temperature range of bainite-martensitic transformation at low rates of metal temperature reduction in this temperature range. The scheme of the temperature regime for the transition from the temperature of the end of cooling during quenching to the tempering mode is proposed.

Keywords: cylinder; rotor; stresses; martensitic transformation; bainite transformation; quenching; self-release; final heat treatment.

При охлаждении при закалке крупных поковок возможны принципиально три базовых охлаждения:

1. охлаждение в водяной среде (возможен вариант в водяной среде с растворенными в ней полимерами);
2. охлаждение в масле;
3. предварительное кратковременное охлаждения в водяной среде, далее в масле.

Применение разных схем охлаждения для различного вида термообрабатываемых заготовок имеет свое предназначение в связи с общим требованием к итоговому состоянию заготовки: достижение достаточной прокаливаемости по рабочему сечению и недопущение повышенного уровня напряжений и связанной с ними возможностью

получения закалочных трещин [1-3]. Для обеспечения данной концепции рассмотрим возможность, в данном примере, применить охлаждение в масляной ванне цилиндрической заготовки диаметром 1000 мм из легированной стали типа 20Х3НМФА, имеющей достаточную прокаливаемость (во всяком случае, по результатам испытания механических свойств) в указанном сечении. Расчет уровня напряжений в ходе охлаждения по рассмотренным скоростям охлаждения (рис. 1) производился по двум вариантам охлаждения:

1. классическое (общепринятое) охлаждение - до температуры ≈ 80 °С в центре теплоинерционной зоны;

2. по предложенной авторами схеме – охлаждение до температуры центра теплоинерционной зоны ≈ 275 °С, т.е. до температуры окончания бейнито–мартенситного превращения.

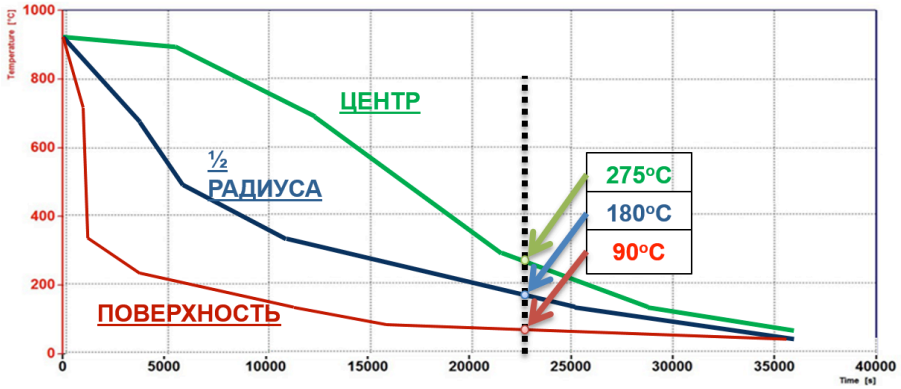


Рисунок 1 – Изменение температуры в процессе охлаждения при закалке заготовки сечением 1000 мм:
центр; ½ радиуса; поверхность

В обоих случаях рассматривается ситуация по расчету напряжений исходя из данных по объему фазовых превращений и разницы температуры между поверхностью и центром сечения. В качестве смягчающего мероприятия (т.е. снижения уровня напряжений) может быть релаксация напряжений за счет пластического течения при повышенной пластичности, за счет фазового превращения и процесса самоотпуска в ходе замедленного снижения температуры [4].

При нагреве на отпуск из предлагаемого состояния заготовки ротора (находящегося при температуре ≈ 300 °С достаточно долгое время) достигается экономия от отсутствия необходимости большого тепловложения при нагреве на отпуск, если бы нагрев производился после классической схемы с ≈ 100 °С по средней температуре заготовки ротора.

Предложенная схема термической обработки показана на рис. 2.

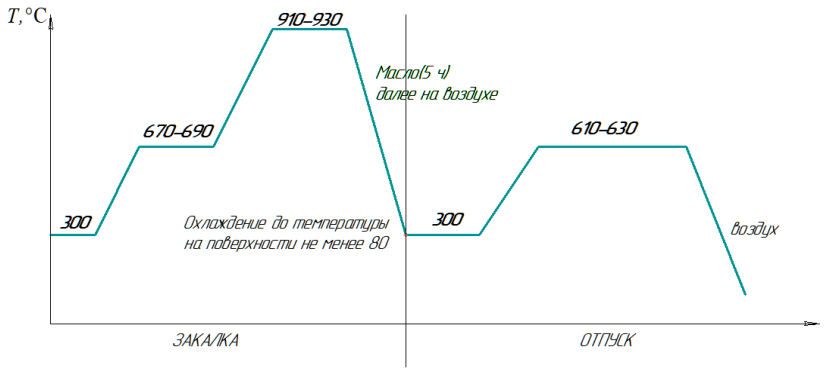


Рисунок 2 – Схема окончательной термической обработки

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цуканов В.В.* Современные стали и технологии в энергомашиностроении. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал», 2014.
2. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов. - 3-е изд., перераб и доп. - М.: Металлургия, 1978.
3. *Барахтин Б.К., Немец А.М.* Справ. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. - СПб.: НПО «Профессионал», 2006. - 490 с.:
4. *Омельяненко Л.П., Савельева И.Г., Цуканов В.В.* Оптимизация режимов закалки крупных поковок из стали Cr-Ni-Mo-V композиции / «Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий» Научно-технический семинар. «ЛДНТ», Ленинград, 1990. С. 13-17.

УДК 535.662.13

РОМАНОВ В.В.,
ОДИНЦОВА Г.В.,
ЗАХАРЕНКО Е.А.,
МОСКВИН М.К.
Университет ИТМО

ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ МЕТКИ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ЦЕЛЬЮ ЗАЩИТЫ ОТ ПОДДЕЛОК

Аннотация. В работе рассматриваются методы формирования цветной идентификационной метки на поверхности металлических изделийпри помощи лазерного излучения короткими лазерными импульсами наносекундной длительности с длинной волны 1,06 мкм. Методы основаны на тепловом воздействии лазерного излучения и формировании оксидных пленок и самоорганизующихся поверхностных структур. За счет такого воздействия реализуются два принципа формирования изображения идентификационной метки, основанные на эффектах интерференции света в тонких пленках и дифракции света на периодических структурах. Такие метки, сформированные непосредственно на поверхности металлических изделий, позволяют упростить процессы управления материальными потоками и открывают возможности использования их в качестве защиты изделий от подделок.

Ключевые слова: лазерное окисление, поверхностные периодические структуры (ППС), идентификационные метки.

ROMANOV V.V.,
ODINTSOVA G.V.,
ZAKHARENKO E.A.,
MOSKVIN M.K.
ITMO University

LASER FORMATION OF IDENTIFICATION TAGS ON METAL PRODUCTS FOR PROTECTION AGAINST COUNTERFEIT

Abstract. In this paper, we discuss formation methods of identification tags on a metal surface. For this short-pulsed nanosecond laser irradiation at a wavelength of 1.06 μm was utilized. The principal is based on the thermal effects of laser radiation leading to the oxide film formation and periodic surface structures self-organization. Two mechanisms of identification tag formation are realized: the first one is based on thin-film-interference of light, and another one is described by light diffraction on near-wavelength periodic structures. Such tags are formed directly on the metal products surface, thus it allows to simplify and speed up the marking process and manage goods movement over the whole production and distribution cycle of goods. Therefore, this work opens the possibility of using laser direct marking as a promising protection method against counterfeit.

Keywords: laser oxidation, laser-induced periodic surface structures (**LIPSS**), identification tags.

Неотъемлемой частью любого современного производства является организация материальных потоков посредством маркировки продукции. Маркировка продукции

позволяет оперативно получать информацию о товарах, отслеживать их перемещение на протяжении всего жизненного цикла, а также предотвращать их фальсификацию [1].

В настоящей работе продемонстрирована экспериментальная реализация методов формирования идентификационной метки с использованием промышленной лазерной установки МиниМаркер 2 (ООО «Лазерный Центр») на базе волоконного иттербиевого лазерного источника (IPG Photonics): длина волны λ = 1,06 мкм, длительность импульса τ = 4 - 100 нс, частота следования импульсов f = 20-99 кГц, скорость сканирования V до 8700 мм/с. Принципиальная схема лазерной установки и траектории сканирования пучком по поверхности образца представлены на рис. 1. Сканирование проводилось как с перекрытием лазерных импульсов (с шагом сканирования по осям X и Y: $Mx=V/f$, $My=1/L$, где V - скорость перемещения лазерного луча, f - частота лазерных импульсов), так и без перекрытия воздействием серией импульсов неподвижным источником (контролировалось количество импульсов в точку: $N = f \cdot t$, где t – общее время воздействия). Для поворота направления поляризации и управления периодическими структурами в схему дополнительно была установлена полуволновая пластина.

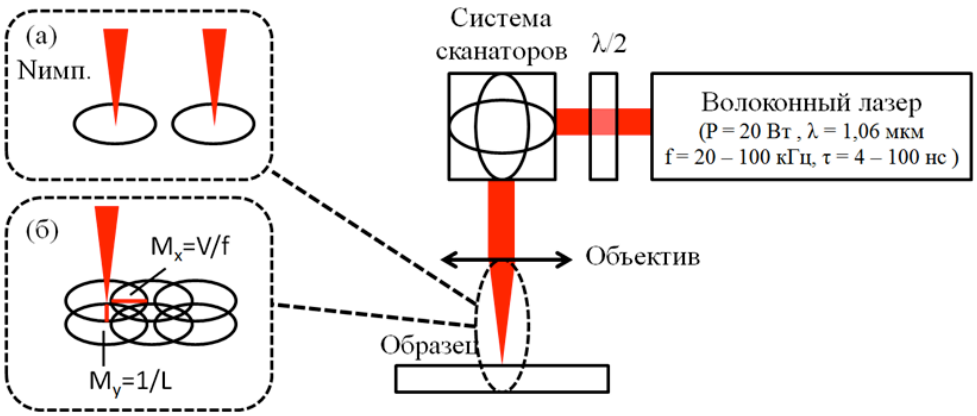


Рисунок 1 – Принципиальная схема лазерной установки и траектории сканирования пучком по поверхности образца:
а) без перекрытия лазерных импульсов; б) с перекрытием лазерных импульсов

Первый механизм формирования идентификационной метки основан на явлении интерференции света в тонких пленках оксидов металла. За счет теплового воздействия лазерного излученияповерхность металла окисляется на воздухе, и в зависимости от температуры и длительности воздействия на ее поверхности образуется многокомпонентная оксидная пленка различного состава, в зависимости от глубины диффузии кислорода в металл [2, 3]. Однако цвет поверхности обусловливается не только измененными химическими свойствами поверхности, но главным образом за счет различных толщин создаваемых оксидных пленок, где наблюдается интерференция света, преобладающая над обычным поглощением и отражением света [4, 5]. На рис. 2 представлен пример цветовой палитры получаемой на поверхности титана марки ВТ1-0.

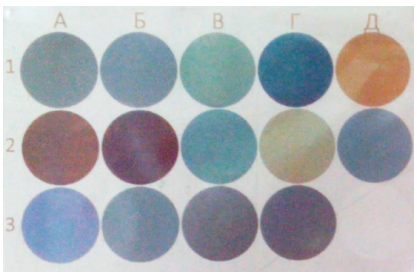


Рисунок 2 – Пример палитры цветов, получаемой на поверхности титана марки ВТ1-0, после лазерной обработки

Таким образом, за счет обработки лазерным излучением с различными параметрами, можно создать на поверхности металлов различные цвета, а за счет системы сканирования используемой в лазерной установке, можно создавать сложные изображения.

Второй механизм формирование идентификационной метки связан с эффектом дифракции на лазерно-индуцированныхпериодических поверхностных структурах (ППС), рис. 3. Управление самоорганизацией ППС позволяет формировать дифракционные элементы на различных поверхностях полупроводников и металлов [6, 7]. Механизм самоорганизации структур основан на возбуждении поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) падающим излучением на границу раздела воздух-металл [8]. В результате интерференции ПЭВ и падающей волны формируются поверхностные периодические структуры. При воздействии короткими импульсами порог формирования структур связан с порогом плавления поверхности металла [9]. Период структур зависит от угла падения и длины волны лазерного излучения [6]. Направленность структур выстраивается перпендикулярно поляризации лазерного излучения.

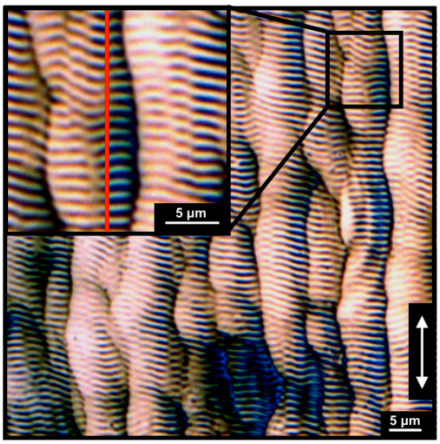


Рисунок 3 – Микрофотография поверхностных периодических структур

При векторном сканировании по области в режимах формирования ППС с перекрытиями по осям X/Y формируется непрерывная дифракционная решетка. Благодаря повороту направления структур, путем изменения поляризации света за счет поворота полуволновой пластинки, можно сформировать области, которые при наблюдении приобретают различные цвета (рис. 4).

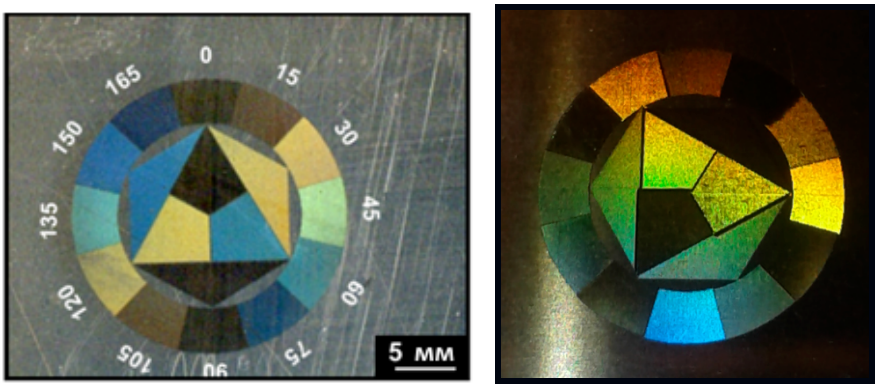


Рисунок 4 – Фотография изображения с различным направлением ППС в разных областях

Совмещая методы записи и контролируя параметры лазерного воздействия и направление самоорганизующихся структур, возможна запись идентификационной метки отвечающей различным уровням защиты: визуальный (изменение цвета при рассмотрении

под различными углами), колориметрический (точное совпадение колориметрических координат при сравнении с ранее разработанным шаблоном), структурный (управление периодом структур, различные методы записи: запись точек и векторное сканирование) [11]. На рис. 5 продемонстрирована цветная лазерная маркировка на промышленных изделиях, выпускаемых автомобильной промышленностью, на рис. 6 продемонстрирован цветной QR-код.

Рисунок 5 – Промышленные изделия с цветной лазерной маркировкой

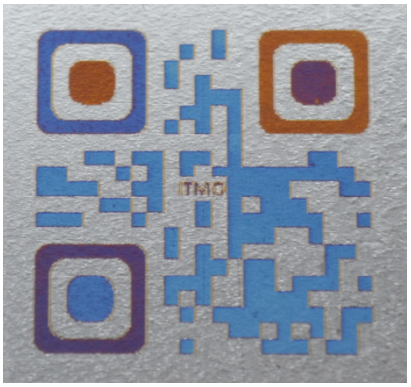


Рисунок 6 – Цветной QR-код на поверхности титана марки ВТ1-0

На рис. 7 показан пример метки с комбинированным изображением. С изменением направления освещенности или угла наблюдения проявляется различное изображения. Так же при считывании отдельные структурные элементы приобретают различные цвета в соответствие с направлением ППС.

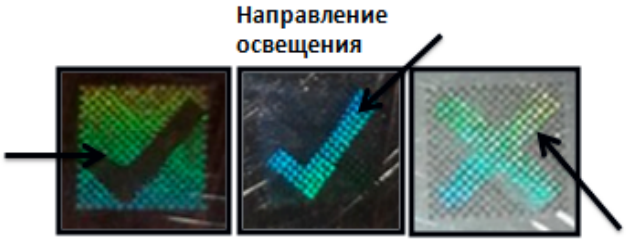


Рисунок 7 – Пример дифракционной метки с изменяющимся изображением в зависимости от направления освещения

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зуева О.Н., Донскова Л.А.* Идентификация как основа управления материальными потоками в логистической системе / Управленец. -2016. - №.1(59).
2. *Veiko V. et al.* 2014 Controlled oxide films formation by nanosecond laser pulses for color marking *Optics express* 22(20) 24342-24347.

3. *Liu H., Lin W., Hong M.* 2019 Surface coloring by laser irradiation of solid substrates *APL Photonics* 4(5) 051101.
4. *Ageev E.I. et al.* 2017 Influence of light incident angle on reflectance spectra of metals processed by color laser marking technology *Optical and Quantum Electronics* 49(2) 50.
5. *Вейко В.П. и др.* Метод изменения цвета поверхности титана при локальном окислении наносекундными лазерными импульсами / Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2016. - Т.59. №.3.
6. *Ionin A.A. et al.* 2012 Femtosecond laser color marking of metal and semiconductor surfaces *Applied Physics A*. 107(2) 301-305.
7. *Li G. et al.* 2015 Femtosecond laser color marking stainless steel surface with different wavelengths *Applied Physics A.* 118(4) 1189-1196.
8. *Либенсон М.Н.* Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона / Соросовский образовательный журнал. - 1996. - Т.10. - С. 92.
9. *Veiko V. et al.* 2017 Metal surface coloration by oxide periodic structures formed with nanosecond laser pulses *Optics and Lasers in Engineering* 96 63-67.
10. *Ageev E.I. et al.* 2018 Controlled nanostructures formation on stainless steel by short laser pulses for products protection against falsification *Optics express* 26(2) 2117-2122.

УДК 621.793.6

СЕРДЮК Н.А.,
МИХАЙЛОВ А.В.,
ШАРАФУТДИНОВА Г.Р.,
ПРЯХИН Е.И.,
СИВЕНКОВ А.В.
Санкт-Петербургский горный университет

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ИЗ ЛЕГКОПЛАВКИХ РАСПЛАВОВ

Аннотация. В данной статье изучается вопрос повышения эксплуатационных характеристик изделий современного машиностроения. Для этого был проведен анализ диффузионного метода повышения прочностных характеристик поверхностных слоев стальных изделий. По результатам исследования определены преимущества поверхностного легирования методом диффузионной металлизации из расплавов легкоплавких металлов.

Ключевые слова: поверхностное легирование; диффузионная металлизация; транспортный расплав; диффузионное покрытие.

SERDIUK N.A.,
MIKHAILOV A.V.,
SHARAFUTDINOVA G.R.,
PRYAKHIN E.I.,
SIVENKOV A.V.
Saint-Petersburg Mining University

RELEVANCE OF SURFACE ALLOYING METHODS FROM FUSIBLE MELTS

Abstract. This article examines the issue of improving the performance characteristics of modern mechanical engineering products. For this purpose, the analysis of the diffusion method for increasing the strength characteristics of the surface layers of steel products was carried out. Based on the results of the study, the advantages of surface doping by diffusion metallization from melts of low-melting metals were determined.

Keywords: surface alloying; diffusion metallization; fusible transport metal melt; diffusion coating.

Для решения актуальной задачи повышения эксплуатационных характеристик современных машин и механизмов, при одновременном снижении материалоемкости в настоящее время используют различные методы повышения прочностных характеристик поверхностных слоев, которые позволили бы обеспечить использование оборудования и изделий в условиях сочетания влияния высоких температур, механических нагрузок, давлений в различных агрессивных средах.

При обширном многообразии способов изменения поверхности в настоящее время разработано большое количество способов создания поверхностных защитных слоев: в вакууме, газовых и жидких средах, напыление и многие другие.

Диффузионная металлизация, как метод поверхностного легирования – наиболее перспективен для повышения работоспособности изделий из конструкционных металлов и сплавов, позволяющий эффективно влиять на эксплуатационные свойства

поверхностных слоев изделий легирующими элементами [1, 2]. Метод из жидкой фазы позволяет сократить длительность технологического процесса, в заданном направлении и в широком интервале влиять на свойства поверхностных слоев изделий. Так, с помощью данного метода возможно повышение коррозионной стойкости, прочностных характеристик и иных служебных свойств изделий при низких затратах на легирующие элементы. Также толщины получаемого слоя достаточно для восстановления поверхности изделий, подвергшихся незначительному износу, что в свою очередь позволяет производить дефектовку деталей механизмов и продлевать срок их службы [3, 4].

Способы диффузионной металлизации позволяют в широких пределах изменять механические свойства поверхностных слоев детали, повышать коррозионную стойкость, жаростойкость, обеспечивают возможность формирования на поверхности изделий диффузионных покрытий на изделиях любой конфигурации.

Основными параметрами, определяющими эффективность диффузионной металлизации, являются состав, структура, толщина, распределение элементов по глубине покрытия, а также изменения в составе, структуре и свойствах основного материала, происходящие при диффузионной металлизации. Эти параметры зависят от способов диффузионной металлизации, от природы диффундирующего или диффундирующих элементов и режимов процесса металлизации. При этом способ диффузионной металлизации чаще всего определяет свойства и качество получаемых покрытий. Среди способов диффузионной металлизации наиболее эффективным для повышения стойкости деталей машин является способ нанесения покрытий из среды легкоплавких жидкометаллических растворов. Данная технология позволяет получать покрытия на изделиях самой сложной конфигурации, при наличии на нем острых кромок, малых отверстий. При этом образующиеся покрытия, характеризуются равномерностью по толщине, стабильностью состава, свойств и высоким качеством [5, 6].

Технология диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов является промышленно реализуемой. При наличии оборудования, разработанного в [1, 3, 7], возможно совмещение процесса нанесения покрытий с термической обработкой, регулировка качества получаемых покрытий, минимизация затрат и длительности процесса.

В основе диффузионного поверхностного насыщения легирующими элементами из легкоплавких металлических расплавов лежит изотермический, селективный переноса элементов покрытия, растворенных в легкоплавком расплаве, на поверхность изделия. Сущность переноса заключается в растворении металлических и неметаллических элементов в металлическом расплаве одного материала и переносе их на поверхность другого нерастворимого или менее растворимого в расплаве металла или сплава при выдержке данной системы при постоянной температуре [5].

В настоящее время многие вопросы, касающиеся диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических растворов достаточно не изучены. Сюда относятся вопросы выбора транспортного расплава, элемента покрытия, кинетики формирования покрытия, влияния покрытий и термического воздействия на материал изделия, возникающего при диффузионной металлизации, на работоспособность изделия а также вопросы оптимизации режимов диффузионной металлизации, последующей термической обработки и создания эффективного технологического оборудования для реализации данной технологии в промышленности [6, 7].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сивенков А.В., Михайлов А.В., Кончус Д.А., Пряхин Е.И.* Установка для нанесения покрытий в среде легкоплавких материалов. Пат: 2711701 Российская Федерация, МПК57 F27B 1/10, C23C 10/18, C23C 2/08, C23C 2/10.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-

Петербургский горный университет». №019127996; заявл. 03.04.2019; опубл. 21.01.2020 Бюл. №3. – 8с.: ил.
2. *Лахтин Ю.М.* Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. - М.: Металлургия, 1985. - С. 204-206.
3. *Сивенков А.В.* Повышение коррозионной стойкости деталей машиностроения путем нанесения защитных покрытий способом высокотемпературного диффузионного осаждения из среды легкоплавких расплавов: дис. канд. техн. наук: 05.02.01. - СПб.: СЗТУ, 2009. - 49 с.
4. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация / В.П. Багмутов, С.Н. Паршев, Н.Г. Дудкина, И.Н. Захаров. - Новосибирск: Наука, 2003. - 318 с.
5. *Воробьева Г.А., Складнова Е.Е., Леонов А.Ф., Ерофеев В.К.* Инструментальные материалы. - СПб.: Политехника, 2005. - 260 с.
6. *Соколов А.Г., Артемьев В.П.* Диффузионная металлизация как способ повышения работоспособности инструмента / 9 международная практическая конференция-выставка «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». СПбГПУ, 2007. - С. 208-215.
7. *Михайлов А.В., Сивенков А.В.* Разработка установки для нанесения покрытий в среде легкоплавких металлических растворов / Материалы научно-практической конференции IPDME-2018 – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2018.

УДК 691.215.1

СТЕЛЬМАХ С.А.,
ХОЛОДНЯК М.Г.,
ЩЕРБАНЬ Е.М.
Донской государственный технический университет
НАЖУЕВ М.П.
Дагестанский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗВЕСТНЯКОВ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ИХ ДОБЫЧЕ И ПРИМЕНЕНИИ

Аннотация. В статье рассмотрено современное состояние минерально-сырьевой базы полезных ископаемых и рынок строительных материалов Ростовской области. Исследовано влияние различных факторов на физико-механические свойства местных известняков. Выполнен анализ научно-технической литературы, посвященной процессам разрушения горных пород при различных нагрузках. По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что пробы испытанного известняка с повышенным содержанием кубовидных зерен обладают характеристиками, сопоставимыми с характеристиками испытанного гранитного щебня. Сделан вывод о конкурентоспособности и целесообразности применения известняков Ростовской области в строительной отрасли, с учетом надлежащего выполнения предлагаемых технологических мероприятий при его производстве.

Ключевые слова: горная порода; физико-механические свойства горных пород; разрушение породы; коэффициент внутреннего трения; известняк; гранит; заполнители для бетона.

STEL'MAKH S.A.,
KHOLODNYAK M.G.,
SHCHERBAN' E.M.
Don State Technical University
NAZHUEV M.P.
Daghestan State Technical University

STUDYING THE EFFECT OF SOME FACTORS ON THE STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF THE ROSTOV REGION LIMESTONES IN THE COURSE OF THEIR PRODUCTION AND USE

Abstract. The paper considers the current state of the mineral raw material base and the construction material market of the Rostov Region. The effect of various factors on the strain-stress behavior of local limestones has been investigated. The scientific and technical literary sources devoted to the processes of rock failure under various loads have been analyzed. The experimental studies have shown that the tested samples of limestone with a high content of cuboidal grains have characteristics comparable to those of the crushed granite stone. It has been concluded that the use of the Rostov Region limestones in the construction industry is competitive and feasible, provided the proper implementation of the engineering measures proposed in their production.

Keywords: rock; stress-strainbehaviorofrocks;rockfailure; internal frictioncoefficient; limestone; granite; concreteaggregates.

В Ростовской области имеется сравнительно мощная минерально-сырьевая база полезных ископаемых, обеспечивающая целый ряд отраслей и предприятий разведанными запасами минерального сырья. На базе разведанного минерального сырья широко развита горнодобывающая промышленность. В области работают предприятия по добыче и переработке флюсовых и конверторных известняков. Известняки являются экологически чистым и высококачественным сырьем для многих отраслей производства, в том числе: в качестве флюсов в черной и цветной металлургии, в производстве высокомарочных цементов, строительного щебня, окрашенные разновидности могут использоваться как облицовочный и поделочный камень [1-5].

Целью данного исследования было изучение влияния различных факторов на физико-механические свойства известняков Ростовской области при их добыче и применении в строительной отрасли. Значения этих характеристик и долговечность строительных материалов из указанной породы могут быть обусловлены как технологическими, так и эксплуатационными факторами.

В связи с этим, задачами исследования явились определение влияния схемы переработки известняка на дробильно-сортировочной установке при получении кубовидного щебня с наименьшей лещадностью – технологический фактор; и рассмотрение вопроса целесообразности использования отвальных горных пород в строительной отрасли – эксплуатационный фактор.

Методами исследования выступили анализ литературных научно-технических источников и экспериментальные лабораторные испытания различных образцов породы на различные физико-механические характеристики.

Упругость щебня из пород крупного заполнителя прямо, а неупругость обратно пропорциональна статической прочности образцов и изменяется в достаточно широких пределах. Высоким внутренним трением обладает известняк. Применение заполнителей с высоким коэффициентом внутреннего трения ведет к повышению общей неупругости бетона и, как следствие, к повышению его сопротивляемости разрушению при ударе, то есть ударной стойкости [6].

В настоящее время существуют повышенные требования к процентному содержанию зерен лещадной формы и тенденция перехода к выпуску кубовидного щебня с малым содержанием некондиционных зерен [5].

Такой переход может достигаться введением в технологическую схему производства дополнительной стадии измельчения, что негативно сказывается на расходе горной массы сырья из-за увеличения выхода мелких продуктов дробления. По экспертным оценкам объем таких фракций 30-35 млн $м^3$ в год. При этом используется только 10-12 % отсевов. Остальное сырье поступает в отвалы. В качестве устранения данной проблемы целесообразно применение трехстадийной прямоточной схемы дробления с комплексом для промывки щебня вместо распространенной двухстадийной замкнутой схемы дробления, что проводит к упрочнению зерен щебня, делая его более однородным по структуре, и увеличению выхода кубовидного продукта более чем на 15-20%. Применение трехстадийной технологии дробления с комплексом промывки и центробежной дробилки в качестве кубизатора позволяет сократить выход зерен лещадной формы, избежать переизмельчения, удалить из общей массы слабые некондиционные зерна [7-10].

Известняки Ростовской области характеризуются выдержанным строением, однородны по химическому составу и структурно-текстурным показаниям. Вредные примеси отмечаются в незначительных количествах, а серосодержащие минералы отсутствуют. Особо следует отметить, что известняки Ростовской области обладают высокими показателями физико-механических свойств. На основе этих данных

целесообразно фракции менее 5 мм перерабатывать в известняковую крошку с целью их эффективного применения в различных сферах [11-13].

Авторами в научно-исследовательской лаборатории ДГТУ исследовалось влияние фактора формы зерен известняка одного из месторождений Ростовской области на его физико-механические характеристики [14].

В начале исследования экспериментальная проба известняка фракций 10–20 и 20-40 мм рассортировывалась на отдельные пробы, отличающиеся процентом содержания соответственно лещадных и кубовидных зерен. Количество и составы экспериментальных проб приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Количество и составы экспериментальных проб известняка

№ п/п	Соотношение лещадных и кубовидных зерен известняка, кг	Соотношение лещадных и кубовидных зерен известняка, %
1	35 / 0	100 / 0
2	26,25 / 8,75	75 / 25
3	17,5 / 17,5	50 / 50
4	8,75 / 26,25	25 / 75
5	0 / 35	0 / 100

В качестве эталонной пробы принималась проба гранитного щебня, производимого в Воронежской области, соответствующая требованиям нормативно-технических документов.

Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты экспериментальных исследований

Номер пробы (согласно табл. 1)	Дробимость в сухом состоянии, %	Дробимость в водонасыщенном состоянии, %	Сопротивление удару на копре	Морозо-стойкость, циклов	Истираемость, %
1	18,8	19,8	7,62	132	41,5
2	15,5	16,0	7,04	164	32,2
3	13,5	13,8	6,71	187	27,5
4	12,6	12,7	6,54	202	25,2
5	12,2	12,1	6,46	210	24,0
Эталонная	11,8	11,9	6,42	218	22,9

По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что пробы испытанного известняка с повышенным содержанием кубовидных зерен обладают характеристиками, сопоставимыми с характеристиками испытанного гранитного щебня. Сделан вывод о конкурентоспособности и целесообразности применения известняков Ростовской области в строительной отрасли, с учетом надлежащего выполнения предлагаемых технологических мероприятий при их производстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Ростовской области / минприродыро.рф

2. *Тюменцева О.В.* Минералы и горные породы: учебное пособие. - Омск: СибАДИ, 2013. - 72 с.

3. *Ананьев В.П.* Инженерная геология: учебник для строит. спец. вузов / В.П. Ананьев, А.Д. Потапов. 4-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2007. - 575 с.
4. *Ананьев В.П.* Основы геологии, минералогии и петрографии: учебник для вузов / В.П. Ананьев, А.Д. Потапов. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 2005. - 398 с.
5. *Гальперин А.М.* Геология. Ч. 4. Инженерная геология: Учебник для вузов / А.М. Гальперин, В.С. Зайцев. - М.: Горная книга, 2009. - 563 с.
6. *Невский В.А.* Усталость и деформативность бетона. Монография. - М: Вузовская книга, 2012. - 264 с.
7. *Дудин В.Ф.* Влияние неупругости бетонов на сопротивляемость ударным нагрузкам / В.Ф. Дудин, В.А. Невский, Ю.А. Пискунов // Бетон и железобетон. - 1969. - №8. - С. 18-21.
8. *Сорокин Е.С.* К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / ЦНИИ строительных конструкций. - М.: Госстройиздат, 1962. - 132 с.
9. *Холодняк М.Г.* Влияние схемы переработки известняка на дробильно-сортировочной установке при получении кубовидного щебня с наименьшей лещадностью / М.Г. Холодняк, Е.В. Мальцев // Строительство-2013. Материалы междунар. науч.-практ. конф. РГСУ. Ростов н/Д. - 2013. - С. 122-124.
10. *Лысенко Е.И.* Структурные особенности и физическая стойкость бетонов на известняково-ракушечных заполнителях / Е.И. Лысенко. дис. канд. техн. наук. Ростов н/Д: РИСИ, 1971. - 165 с.
11. *Кашников Ю.А.* Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин. - М: Недра-Бизнесцентр, 2007. - 466 с.
12. *Оловянный А.Г.* Механика горных пород. Моделирование разрушений. - СПб.: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2012. - 280 с.
13. *Ильинов М.Д.* Влияние нарушенности горных пород на их реологические свойства / М.Д. Ильинов, Ю.М. Карташов, А.Т. Карманский, В.А. Козлов // Записки Горного института. - 2010. - Т.185. - С. 10-13.
14. *Shuyskiy A.I.*, Stelmakh S.A., Shcherban E.M., Kholodnyak M.G. 2018 Investigation of the Influence of the Initial Composition of Heavy Concrete Designed for the Manufacture of Ring-Section Products on its Properties *Materials Science Forum* 931 508–514.

УДК 669.15-194.3

ТЕПЛУХИН В.Г.,
КОЗАРЬ И.И.,
ТРЕТЬЯКОВ В.П.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

О ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ СТАЛИ 95Х18 ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ДЕТАЛЯХ ГОРНОГО И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. Высокоуглеродистая коррозионностойкая и износостойкая сталь 95Х18 широко применяется в различных областях техники благодаря комплексу высоких механических и эксплуатационных свойств. В большинстве случаев при рекомендации стали 95Х18 для применения, в первую очередь, учитывается ее коррозионная стойкость и способность к упрочнению и повышению твердости при закалке с низким отпуском. Сталь 95Х18 не принято использовать для крупногабаритных деталей оборудования. Существует возможность существенного регулирования твердости поверхности и вязкости сердцевины за счет выбора режима термической обработки. Предлагается применение поверхностной закалки токами высокой частоты стали 95Х18 после объемной закалки и соответствующего отпуска для изготовления массивных износостойких деталей горного и металлургического оборудования, в первую очередь для рабочих валков станов горячей прокатки.

Ключевые слова: поверхностная закалка; высокоуглеродистая сталь; износостойкость; остаточный аустенит; рабочие валки.

TEPLUKHIN V.G.,
KOZAR I.I.,
TRETYAKOV V.P.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

SURFACE HARDENING OF 95KH18 STEEL FOR MINING AND METALLURGY EQUIPMENT

Abstract. Steel of the type 95Kh18 (similar to 440B, 440C steel) is high carbon wear-resisting stainless steel. It is widely using in different fields of engineering due to high complex of mechanical properties and operating ability.This steel is usually recommending for application as corrosion-proof steel with hardening by quenching and tempering to martensite structure. Steel 95Kh18 is not considering for large-scale parts of equipment. It is possible to arrangethe hardness of surface and ductility of metal core by heat treatment. We propose to use induction surface hardening afterfurnace quenching and propertempering for the massive parts of mining and metallurgical equipment. Primary it respects to working mill rolls.

Keywords: surface quenching; high carbon steel; wear resistance; retained austenite; working mill rolls.

Сталь 95Х18 обладает комплексом свойств [1], обеспечивающим ей широкое применение в различных областях техники. Высокая прокаливаемость, отличные режущие свойства, износостойкость и коррозионная стойкость в умеренно-агрессивных средах определяют ее использование в качестве материала для дорожек и рабочих тел нержавеющих подшипников качения, охотничьих, промысловых и промышленных ножей

для резки ткани, меха, полимеров, картона и пищевых продуктов [2]. Валы, оси, втулки и другие детали, требующие высокойизносостойкости в агрессивных средах находят применение в оборудовании машиностроительной, авиационной и нефтедобывающей промышленности [3, 4]. Аналоги этой стали присутствуют среди марок всех стран мира [5, 6].

Как правило, сталь применяется после закалки и низкого отпуска и имеет структуру мартенсита с некоторым количеством карбидов и остаточного аустенита. Для снижения количества остаточного аустенита проводится обработка холодом.

Для повышения износостойкости, триботехнических свойств и предела выносливости проводится поверхностная обработка закаленных изделий из стали 95Х18. Используются химико-термическая обработка, ионно-лучевое азотирование, гиперзвуковая металлизация, лазерная обработка [7, 8] и даже поверхностное пластическое деформирование [9]. Индукционная поверхностная закалка также входит в число методов повышения качества поверхности высокохромистых сталей мартенситного класса [7]. Однако все эти методы обработки поверхности предназначены для повышения эксплуатационных характеристик узлов трения, изготовленных из стали 95Х18 в закаленном состоянии.

Практически не рассматривается возможность изготовления крупногабаритных изделий.

Высокое содержание углерода и легирующих элементов обусловливают сложность фазового состава стали 95Х18. В результате термической обработки может формироваться структура, включающая различные количества мартенсита, аустенита остаточного, первичных и вторичных карбидов, а также феррита [10]. Возможность изменения структуры в зависимости от режима термической обработки позволяет регулировать механические и эксплуатационные свойства. Следовательно может быть расширена область применения стали.

Промышленными партнерами перед нами ставились две конкретные задачи. Первая, разработка предложений по изменению материала для рыхлителей, работающих на золотодобывающем предприятии в зоне вечной мерзлоты. Вторая, разработка технологии изготовления рабочих валков для станов горячей прокатки. Высказано предположение о допустимости применения для обоих изделий стали 95Х18. Результатом должно стать получениекрупногабаритных изделийс твердой износостойкойповерхностью и умеренно вязкой сердцевиной, стойкой к знакопеременным нагрузкам. Предлагается использовать для обеспечения свойств сердцевины термическую обработку, отличную от закалки и низкого отпуска. Требования к поверхности могут быть обеспечены закалкой токами высокой или токами промышленной частоты. Аргументами для выбора такого направления исследований являются:

- для крупногабаритных изделий из стали 95Х18 возможно обеспечить при закалке метастабильную структуру во всем сечении изделия;
- при образовании значительного количества аустенита в сердцевине возможно повышение ударной вязкости;
- индукционная поверхностная закалка обеспечивает минимальную деформацию после получения мартенситной структуры на поверхности;
- доля мартенсита в структуре стали после поверхностной закалки больше, чем при объемной закалке;
- связь между поверхностью и сердцевиной при поверхностной закалке надежней, чем в биметаллических материалах;
- присутствие остаточного аустенита в поверхностном слое благоприятно влияет на износостойкость и трибологические свойства поверхности [11, 12];
- коррозионная стойкость стали 95Х18 обеспечивает повышение сопротивления усталости [13];
- сталь 95Х18 хорошо обрабатывается резанием в отожженном состоянии [2, 14];

- сталь 95Х18 обладает высокой жаростойкостью, что важно в случае рассмотрения технологии изготовления рабочих валков для горячей прокатки [15].

В данной работе ставится задача предварительной оценки перспективы использования 95Х18 для выполнения указанных практических задач. В настоящее время начата разработка технологии изготовления прокатных валков.

Требования, предъявляемые к различным валкам для горячей прокатки, материалы и способы изготовления валков являются предметом постоянного изучения [15-17]. Находят применение валки из кованной и литой стали, отбеленного чугуна, высокохромистого чугуна и высокохромистой стали, стали ледебуритного класса, в том числе быстрорежущей стали и твердого сплава [15, 16]. Отмечается, что предпочтительно изготовление биметаллических валков, когда для изготовления бочки и оси валка применяются разные материалы [15]. Для этого применяются различные сложные технологии: механическая запрессовка оси валка, центробежноелитье (горизонтальное и вертикальное), различные методы наплавки, горячее изостатическое прессование порошка на кованную ось. Наибольшее распространение получило вертикальное электрошлаковое центробежное литье [16]. Указывается на тенденцию к уменьшению числа и укрупнению компаний, занимающихся производством валков. Доля валков (в том числе опорных) российского производства оценивается в пределах 25% [17].

Сталь 95Х18 является достаточно хорошо изученной, широко применяемой на практике. Свойства стали могут изменяться в широких пределах. Изменяя режим термической обработки, возможно получить износостойкую поверхность с достаточным количеством остаточного аустенита для сохранения фрикционных свойств, что необходимо в реверсивных клетях прокатных станов. Для повышения ударной вязкости сердцевины необходимо проведение исследования зависимости структуры и механических свойств металла после аустенитизации [10] и отжига с субкритической температуры.

Предполагается выполнение исследований влияния термической обработки на фазовый состав и механические свойства, триботехнические исследования и испытание макета рабочих валков на испытательном стане горячей прокатки листа в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Subbiah R., Lokesh K., Singh S.K., Chatterjee S., Eswaraiah D.* 2019 Investigation on Microstructure and Mechanical Properties of Treated AISI 440 Steel by Tempering Process – a Review *Materialstoday: Proceedings* 18(7) 2802-2805.
2. *Сорокин В.Г.* Стали и сплавы. Марочник. Справ изд. / В.Г. Сорокин и др.; научн. Ред. В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
3. *Никифорова С.М.* Новые режимы обработки высокохромистых сталей с высокой износостойкостью для буровых установок / С.М. Никифорова, М.С. Хадыев, А.С. Жилин и др. // Технические науки: Фундаментальные исследования. - 2016. - №10. - С. 73-77.
4. *Stromchnik E., Majdich F., Kalin M.* 2019 Water-LubricateedBehaviour of AISI 440C Stainless Steel and a DLC Coating for an Orbital Hydraulic Motor Application *Tribology International* 131 128-136.
5. *Вегст К.* Ключ к сталям / К. Вегст, М. Вегст; под ред. Э.Ю. Колпишона. – СПб.: Профессия, 2006. – 724 с.
6. *John E. Bringas.* Handbook of Comparative World Steel Standards / John E. Bringas, editor. Third edition. – ASTM DS 67B, 2004. – 663 p.
7. Surface Hardening of Stainless Steels / Alenka Kosmach // Materials and Applications Series. Second Edition, 2015. – 18 p.
8. *Тарасова Т.В.* Исследование влияния воздействия лазерного излучения на микроструктуру и свойства коррозионно-стойкой стали / Т.В. Тарасова, С.Д. Кузьмин,

И.С. Белашова и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Инновационное машиностроение. - 2017. - №5(149). - С. 221-225.
9. *Ласица А.М.* Оптимизация параметров поверхностного пластического деформирования деталей из стали 95Х18 с использованием компьютерного моделирования / А.М. Ласица, В.Г. Чуранкин, А.А. Федоров, В.В. Деркач // Динамика систем, механизмов и машин. - 2016. - №1. - С. 187-191.
10. *Abeer Adel Salih, Mohd Zaidi Omar, Syarif Junaidi, Zainuddin Sajuri* 2011 Effect of Different Heat Treatment on the SS440C Martensitic Stainless Steel *Australian Journal of Basic and Applied Sciencies* 5(12) 867-871.
11. *Филиппов М.А.* Использование остаточного аустенита для повышения абразивной износостойкости высокохромистых сталей / М.А. Филиппов, М.А. Гервасьев, С.М. Никифорова и др. // Актуальные проблемы в машиностроении. - 2016. - №3. - С. 434-439.
12. *Tsvetkova G., Skotnikova M.* 2017 Engineering and research of wearability coating on the basis of high-strength steel *Proceedings of 9th International Scientific Conference, BALTTRIB 2017 - Dedicated to 100th Anniversary of Restitution of Lithuania* 166-171.
13. *Adasoriya N.D., Hemmingsten T., Pavlou D.* 2017 Fatigue Strength Degradation of Metals in Corrosive Environments *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering* 276.
14. *Lyubomudrov S.A., Khrustaleva I.N., Tolstoles A.A., Maslakov A.P.* 2019 Improving the efficiency of technological preparation of single and small batch production based on simulation modeling *Journal of Mining Institute* 240 669-677.
15. *Синнаве М.* Новые марки прокатных валков и тенденции развития их производства / М. Синнаве // Сталь. - 2003. - №7. - С. 48-52.
16. *Быстров В.А.* Условия эксплуатации и износ валков прокатного стана горячего металла / В.А. Быстров, П.К. Дьяков, А.Г. Уманец // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2014. - №5. - С. 24-29.
17. *Гостев К.* Современные валки на станах 2000 Череповецкого и Магнитогорского металлургических комбинатов / К. Гостев // Металлург. - 2008. - №9. - С. 53-56.

УДК 621.365.52.029.45

ФЕДИН М.А.,
КУВАЛДИН А.Б.,
КУЛЕШОВ А.О.,
КОНДРАШОВ С.С.
НИУ «МЭИ», Москва, Россия

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПЛАВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация. Разработан алгоритм решения электромагнитной задачи индукционного нагрева для оплавления проводящего покрытия. Проведен анализ распределения параметров электромагнитного поля в заготовке с применением пакета ELCUT. Получены зависимости интегральных электрических характеристик индукционной установки от частоты и температуры. Разработан экспериментальный стенд, проведено физическое моделирование и осуществлена верификация результатов теоретических исследований.

Ключевые слова: индукционный нагрев; нанесение защитных покрытий; термонапряжения; режим работы; электрические характеристики; экспериментальный стенд.

FEDIN M.,
KUVALDIN A.,
KULESHOV A.,
KONDRASHOV S.
NRU «MPEI» Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF A METHOD OF CALCULATION OF AN INDUCTION INSTALLATION FOR MELTING CORROSION-RESISTANT COATINGS

Abstract. An algorithm for solving the electromagnetic problem by the finite element method is developed. The analysis of the distribution of the electromagnetic field parameters in the workpiece using the ELCUT package is carried out. The dependences of the integrated electrical characteristics of the induction installation on the frequency and temperature are obtained. An experimental stand was developed, physical modeling was carried out, and the results of theoretical studies were verified.

Keywords: induction heating; applying protective coatings; thermal stresses; mode of operation; electrical characteristics; experimental stand.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня для предотвращения воздействия коррозии на металлические конструкции и эффективного продления срока службы изделия применяют такие технологии как электролитическое осаждение, гуммирование, покраска, газотермическое напыление и другие. Безусловно, для использования подобных способов защиты металлов от коррозионных процессов необходимы значительные материальные затраты, а, кроме того, энергоемкое оборудование и высококвалифицированный обслуживающий персонал. Ввиду этого, анализ методов нанесения покрытий показывает, что одним из самых простых в реализации, эффективных, и, что немаловажно, экономичных способов является газопламенное порошковое напыление. Однако этот способ нанесения покрытия имеет и свои недостатки. При приложении высоких контактных давлений, невысокая

адгезионная прочность может стать причиной нарушения сплошности поверхности, проявляясь в виде отслоений и сколов частиц покрытия в процессе эксплуатации, что ограничивает работоспособность. Кроме того, технология газопламенного напыления имеет ограничения по своему применению: при нанесении покрытия на цилиндрические поверхности диаметром от 150 мм и более применение ацетиленовой горелки для расплавления напыленного порошка невозможно из-за больших тепловых потерь пламени [1]. Для нанесения защитных покрытий на детали диаметром более 150 мм, а также для увеличения адгезионной прочности, уменьшения пористости, ликвидации нерасплавленных частиц порошка в структуре покрытий и обеспечения равномерного распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя данную технологию предлагается дополнить установкой индукционного нагрева [2], которая позволит осуществить быстрый нагрев поверхности до температуры оплавления нанесенного покрытия. Такое решение позволит наносить твердое коррозионностойкое покрытие на ответственные детали механизмов, работающих в условиях агрессивной среды.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЁТА, УЧИТЫВАЮЩЕГО ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЙ

В процессе индукционного нагрева в заготовке из-за неравномерного распределения выделяющейся мощности возникает неравномерное распределение температуры, что приводит к термонапряжениям сжатия и термонапряжениям растяжения. Если их значения превышают предел упругости (или предел текучести) материала, то изделие деформируется, а при превышении предела прочности на сжатие или растяжение - разрушается.

Исходя из этого, применение индукционного нагрева для оплавления напыленного покрытия предполагает исследование термических напряжений, возникающих в заготовке в процессе нагрева.

В качестве объекта исследования и моделирования выбрана индукционная установка, которая используется для оплавления напыленного коррозионностойкого покрытия Castolin Eutalloy RW 12496 цилиндрической заготовки из стали 45. Геометрические размеры заготовки: диаметр – 16 мм, общая длинна – 120 мм, длина защитного покрытия, наносимого на заготовку – 100 мм, толщина наносимого покрытия – 1 мм, твёрдость HRC заготовки до нанесения защитного покрытия – 21.

Рисунок 1 – Алгоритм расчета термонапряжений

При моделировании процесса нанесения защитного покрытия в программах *ELCUT* и *InductionSystems* [3, 4] примем следующие допущения:

1. Деталь вращается со скоростью 20 об/мин, и это обеспечивает равномерное распределение покрытия.

2. Поскольку производитель Castolin не приводит никаких данных об электропроводности и магнитной проницаемости порошка Eutalloy RW 12496, будем использовать данные современных исследований аналогичных порошков системы Ni-Cr-B-Si-Fe [5] и примем удельное электрическое сопротивление порошкового покрытия равным $2 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Алгоритм расчета термонапряжений (рис. 1) основывается на использовании данных, полученных в ходе решения дифференциальных уравнений электромагнитных и тепловых процессов.

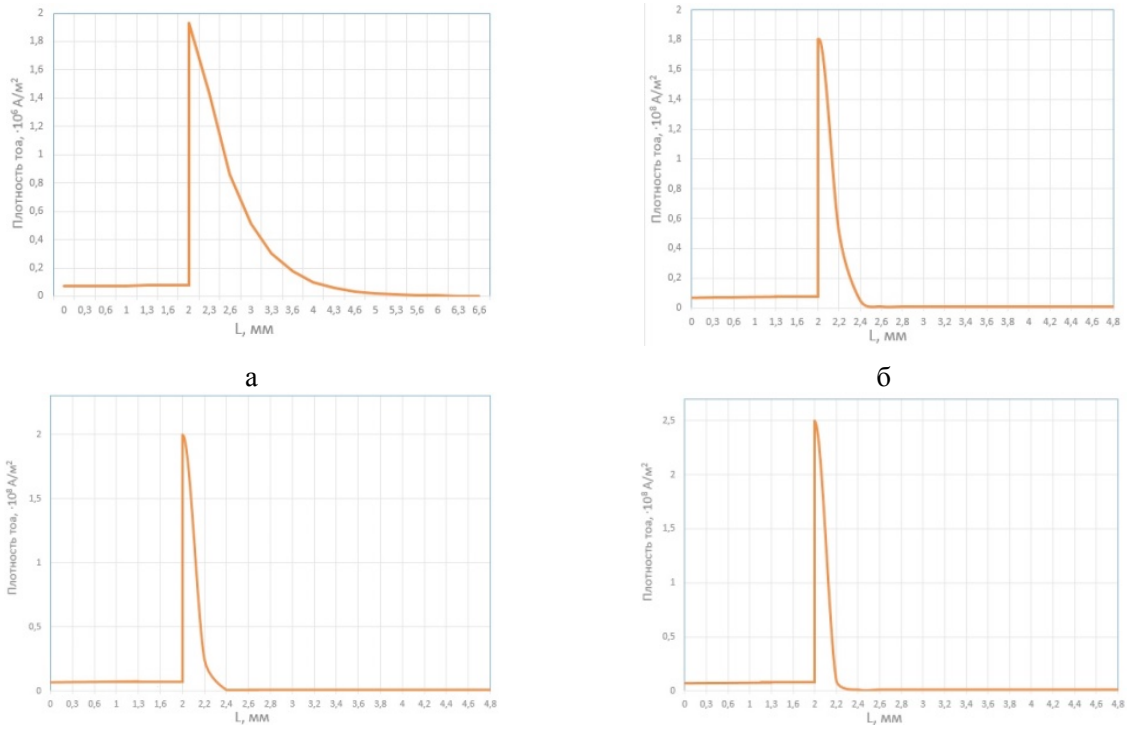
Для разработки температурного режима, учитывающего возникновение температурных напряжений, проведем анализ распределения электромагнитного и

температурного поля в процессе нагрева заготовки. Для этого воспользуемся универсальным конечно-элементным пакетом программ *ELCUT*.

РЕШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЗАДАЧИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАКЕТА ПРОГРАММ ELCUT

Для выбора рациональной частоты для оплавления с учетом свойств материала детали и напыляемого материала в пакете программ *ELCUT* было произведено моделирование на частотах 1 кГц, 35 кГц, 100 кГц и 1 МГц.

При анализе графиков плотности тока (рис. 2) в режимах нагрева на частоте 100 кГц и 1 МГц наглядно просматривается преимущество применения повышенных частот. Плотность тока максимальна в месте сплавления поверхностей материалов на частотах 35 кГц, 100 кГц, 1 МГц. Значение тепловыделения в этих случаях также максимально в зоне сцепления. Однако, анализ тепловых процессов в программе *InductionSystems* показал, что применение нагрева на таких частотах нецелесообразно ввиду возникновения больших температурных напряжений в стальной заготовке. В связи с этим предлагается использовать частоту 35 кГц.



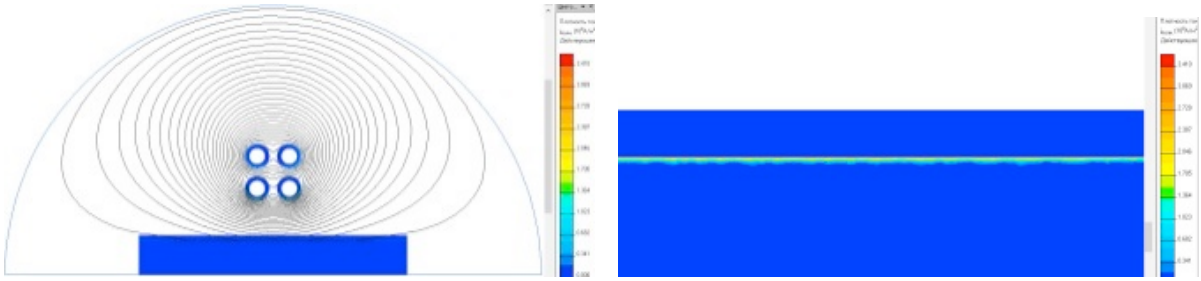
а б в г

Рисунок 2 - Результаты решение электромагнитной задачи:
а – 1 кГц; б – 35 кГц; в – 100 кГц; г – 1 МГц

Электрические параметры для электромагнитной задачи: частота – 35 кГц, ток индуктора – 380 А, электропроводность индуктора – $5{,}6 \cdot 10^7$ См/м, электропроводность покрытия – $5 \cdot 10^5$ См/м.

Как видно из результатов моделирования (рис. 3), максимальная плотность тока наблюдается на стыке покрытия с деталью. Плотность тока, наводящегося в покрытии и в изделии, существенно ниже значения плотности тока в зоне сцепления.

Как и ожидалось, происходит это по причине различия электрофизических свойств покрытия и детали. В частности, удельное электрическое сопротивление покрытия существенно выше величины удельного электрического сопротивление стальной заготовки. Фактически наблюдается эффект индукционного нагрева двухслойного проводящего тела, заключающийся в перераспределении дифференциальных параметров электромагнитного поля по слоям загрузки [4].



а б

Рисунок 3 – Результаты решения электромагнитной задачи:
а – для всей расчетной области, б – увеличенный фрагмент

Результаты моделирования показывают, что покрытие достигло нужной температуры оплавления 1100 °С. Несмотря на это, необходимо провести проверку на термические напряжения.

Расчеты термонапряженного состояния в программе *InductionSystems* показывают, что максимум термонапряжений приходится на момент времени $\tau = 20$ с, когда максимальное значение напряжения $\sigma = 295$ МПа, при этом $\sigma < \sigma_{текуч.}$ – значение напряжения меньше предела текучести. Напряжения на поверхности во время нагрева не превышают половины предела текучести.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПЛАВЛЕНИЮ НАПЫЛЕННОГО КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ

Для проведения экспериментальных исследований в НИУ МЭИ создан стенд на базе индукционной установки CEIA PW3 180/50 и частотно-регулируемого привода (рис. 4). Индукционная установка представляет собой твердотельный генератор серии PowerCube 180/50 мощностью 12 кВт, который управляется микрокомпьютером. Энергия подается на небольшую нагревательную голову HH13, с которой соединен индуктор, осуществляющий оплавление [6, 7].

Рисунок 4 – Экспериментальный стенд на базе установки CEIA PW3 180/50

Для измерения температуры заготовки использовался оптический пирометр SH60/SL-200 с диапазоном рабочих температур 600–2000 °С. В результате экспериментальных исследований установлено, что для уменьшения возникающих термонапряжений нагрев необходимо проводить в две стадии непрерывно-

последовательным способом. Первая стадия нагрев с 20 °С до 770 °С при удельной поверхностной мощности 200 кВт/м^2 в течение 45 с при частоте 35 кГц, вторая стадия нагрев с 770 °С до 1100 °С при удельной поверхностной мощности 350 кВт/м^2 в течение 60 с при частоте 35 кГц.

После оплавления заготовки было произведено измерение твердости покрытия. Твердость покрытия равна 53 HRC.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При индукционном нагреве изделия ограничивающими факторами, формирующими оптимальный температурный режим, являются: температура нагрева, скорость нагрева и допустимые перепады температур по сечению изделия. При нагреве с невысокой скоростью увеличивается общее время нагрева изделия, и снижается производительность процесса. С другой стороны, при повышенной скорости нагрева необходимо учесть возникновение термических напряжений из-за существенных температурных перепадов. Обычно режим индукционного нагрева рассчитывается так, чтобы возникающие термонапряжения не превышали значений предела текучести.

В результате моделирования получено решение электромагнитной и тепловой задач в программе *ELCUT*, на их основе проведен сравнительный анализ и выбор частоты тока для последующего определения режима оплавления покрытия.

Опираясь на результаты механической задачи, полученные в программе *InductionSystems*, предложен оптимальный режим оплавления напыленного коррозионностойкого покрытия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кудинов В.В., Бобров Г.В.* Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
2. Установки индукционного нагрева / Под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 325 с.
3. *Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р.* Скоростные режимы индукционного нагрева итермонапряжения в изделиях. Монография. - Новосибирск: «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. - 273 с.
4. *Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О., Ахметьянов С.В.* Расчет электрических характеристик индукционных тигельных печей с проводящим ферромагнитным тиглем с учетом двухслойности загрузки / Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. XV Международная научно-практическая интернет-конференция. - 2017. - С. 109-112.
5. *Антошин Е.В.* Газотермическое напыление покрытий. — М.: Машиностроение, 1974.
6. *Балдаев Л.Х.* Газотермическое напыление: учебное пособие / Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов, В.А. Вахалин; под общ. ред. Л.Х. Балдаева. — М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
7. *Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О., Ахметьянов С.В., Кондрашов С.С., Чэнь Б.* Исследование процесса индукционного нагрева для оплавления напыленных проводящих покрытий / Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XVII международной научно-практической конференции. - 2019. - С. 109-113.

УДК 621.365.52.029.45

ФЕДИН М.А.,
КУВАЛДИН А.Б.,
КУЛЕШОВ А.О.,
КУЗОВЛЕВ И.В.,
КОНДРАШОВ С.С.
НИУ «МЭИ», Москва, Россия

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ СИНТЕЗА НИТРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Рассмотрено моделирование индукционного нагревателя для синтеза нитридных материалов. Разработана математическая модель электрических и тепловых процессов, реализованная в виде структурной схемы, для каждого этапа нагрева, позволяющая определить частоту тока и мощность источника питания, а также согласовать индуктор с источником питания.

Ключевые слова: индукционный нагреватель; нитрид бора; высокочастотный синтез; проводящий тигель.

FEDIN M.A.,
KUVALDIN A.B.,
KULESHOV A.O,
KUZOVLEV I.V.,
KONDRASHOV S.S.
NRU «MPEI» Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL MODEL OF AN INDUCTION HEATER FOR SYNTHESIS OF NITRIDE MATERIALS

Abstract. The simulation of an induction heater for the synthesis of nitride materials is considered. A mathematical model of electrical and thermal processes is developed, implemented in the form of a structural diagram for each heating stage, which allows determining the current frequency and power of the power source, as well as matching the inductor with the power source.

Keywords: induction heater; boron nitride; high frequency synthesis; conductive crucible.

Нитрид бора и материалы на его основе занимают заметное место в ряду важнейших инструментальных материалов и являются основой многих современных технологий. Он нашел широкое применение в реакциях промышленного органического синтеза при крекинге нефти, в изделиях высокотемпературной техники, в производстве полупроводников, получении высокочистых металлов, газовых диэлектриков, как средство для тушения возгораний и в других областях. Из нитрида бора изготовляют высокоогнеупорные материалы, проявляющие как полупроводниковые, так и диэлектрические свойства. Потребление нитрида бора в мире растет с каждым годом, поэтому появляется необходимость разработки способа его производства. Развитием известных методов получения графитоподобного нитрида бора является карбамидный процесс, описываемый формулой $(NH2)_2CO+H_3BO_3+N_2=NB+CO_2+H_2$. В таком процессе азотирование шихты проводят при температурах 1810…1850°С, что обеспечивает

возможность получения графитоподобного нитрида бора с приемлемой себестоимостью [1–3].

Для равномерного нагрева исходной шихты целесообразно применить электротехнологическую установку с индукционной тигельной печью с графитовым тиглем, которая позволит обеспечить нагрев исходной шихты до заданной температуры. Нагрев шихты для получения нитрида бора является многоступенчатым и осуществляется по следующему принципу: 1 – нагрев до температуры 1300 °С, когда начинается разложение исходных веществ на ионы; 2 – выдержка при температуре 1300 °С; 3 – нагрев до температуры 1600 °С, когда идет процесс разложения молекул исходных веществ, начинается образование новых молекул, происходит обильное выделение аммиака, углерода; 4 – выдержка при температуре 1600 °С; 5 – нагрев до температуры 1800 °С, когда начинается образование кристаллов нитрида бора; 6 – выдержка при температуре 1800 °С, когда происходит образование молекул нитрида бора.

Разработка высокотемпературных установок на базе индукционных тигельных печей с проводящим тиглем для проведения высокочастотного синтеза нитридных материалов требует детального описания и моделирования электромагнитных и тепловых полей. При создании электротепловых моделей индукционных нагревателей особое внимание уделяется разработке методики электрического расчета. Для расчета интегральных параметров системы «индуктор – проводящий тигель» целесообразно применить метод конечных элементов, реализованный в пакете *ELCUT*. Данный пакет позволяет производить электрический и тепловой расчет интегральных параметров с учетом изменения теплофизических свойств материала тигля (графита) и исходной шихты [4, 5].

На рис. 1, в качестве примера показана расчетная область для решения электромагнитной задачи, поделенная на конечные элементы. На оси симметрии (граница 1 на рис. 1) задается граничное условие Неймана $\frac{dH}{dr} = 0$ (отсутствие тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля), на внешних границах (граница 2) – нулевое граничное условие Неймана A = 0 (полагается равным нулю значение магнитного потенциала, т.е. поле локализовано в пределах расчетной области).

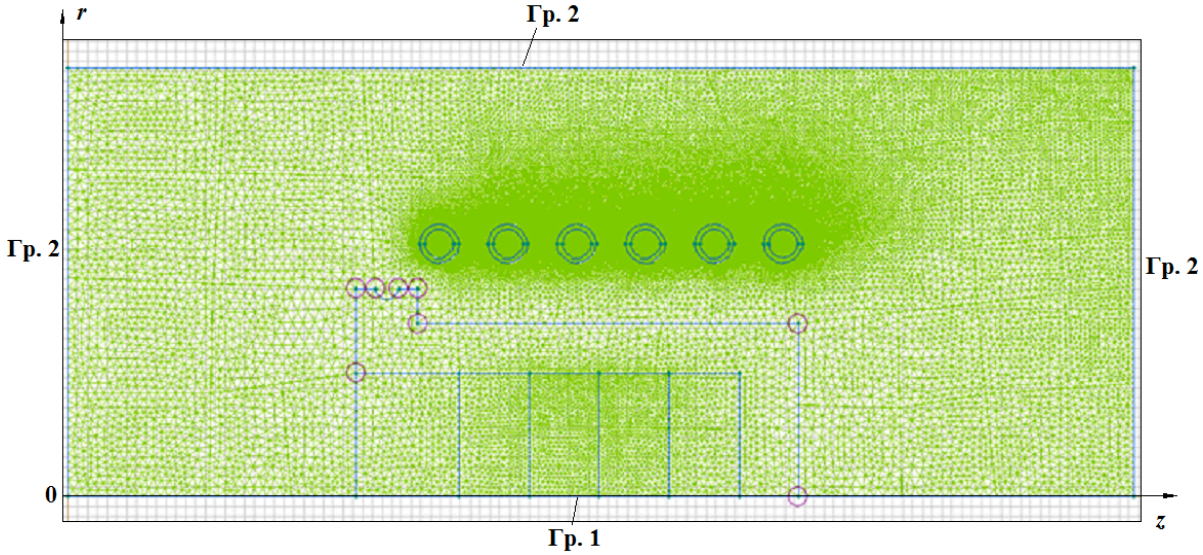


Рисунок 1 – Расчетная область в пакете *ELCUT*

Разработанная в ELCUT модель позволяет провести электрический расчет и дает количественную картину распределения электромагнитного поля и значения интегральных параметров индукционного нагревателя, характеризующего его как потребителя электрической энергии, а именно позволяет определить частоту тока и мощность источника питания и обеспечить согласование индуктора с источником питания

[6–8].

На основании данных теоретических исследований, полученных в *ELCUT*, разработана структурная модель (рис. 2) индукционного нагревателя в пакете Simulink/Matlab. Данная модель учитывает изменения электро- и теплофизических параметров проводящего тигля и синтезируемой шихты. С ее помощью можно рассчитать постоянную времени нагрева исходной шихты в высокотемпературном индукционном нагревателе, а также мощность индукционного нагревателя на каждом из описанных этапов нагрева.

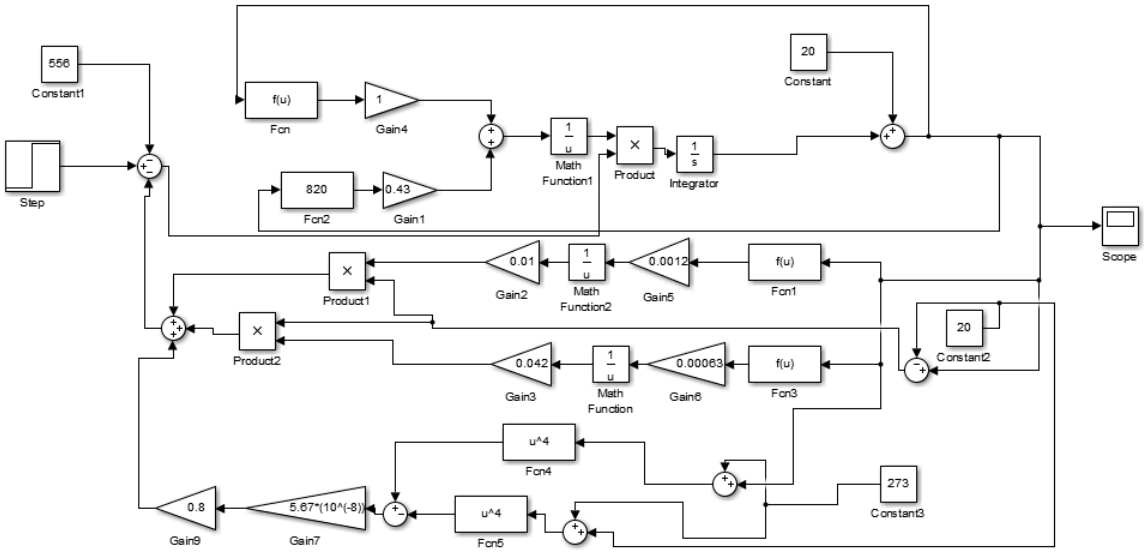


Рисунок 2 – Структурная модель индукционного нагревателя для синтеза нитридных материалов

Полученная структура индукционного нагревателя позволяет перейти к разработке и исследованию системы регулирования мощности для обеспечения необходимого графика нагрева и созданию установки непрерывного действия для проведения высокочастотного синтеза нитридных материалов, например нитрида бора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голубев А.С., Курдюмов А.В., Пилянкевич А.Н.* Нитрид бора. Структура, свойства, получение. — К.: Наук. думка, 1987. — 197 с.
2. *Дудченок Н.В., Червоний І.Ф.* Особенности технологии гексагонального нитрида бора / Мир науки и инноваций. - 2016. - Т.5. №1(3). - С. 110-114.
3. *Новиков Н.В., Туркевич В.З.* Развитие технологии сверхтвердых материалов / Химическая и радиационная физика ИХФ РАН. Москва. - 2011. - С. 21-24.
4. *Демидович В.Б., Перевалов Ю.Ю., Жамбалова С.Ц.* Индукционная печь косвенного нагрева углеродных волокон / Известия Академии электротехнических наук РФ. - 2019. - Вып. 21. - С. 76-83.
5. *Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О.* Выбор методики расчета иисследование электрических характеристик индукционных тигельных печей с проводящим тиглем / «Вестник МЭИ». - 2017. - №3. - С. 77–86.
6. *Кувалдин А.Б., Федин М.А., Кулешов А.О., Генералов И.М.* Разработка регулятора температуры индукционной тигельной печи с проводящим тиглем / Труды XV Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», МКЭЭЭ-2014. – М.: МЭИ, 2014. - С. 248–249.

7. *Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О., Жмурко И.Е., Ахметьянов С.В.* Разработка релейных систем управления мощностью и температурным режимом индукционных тигельных печей с использованием физического моделирования / VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении». Юрга, 2017. - С. 109–115.

УДК 621.791

ШАРАПОВА Д.М.
Санкт-Петербургский горный университет
САМОДУРОВ И.О.
НИЦ «Курчатовский институт» -
ЦНИИ КМ «Прометей»

ПРОБЛЕМЫ СВАРИВАЕМОСТИ НОВЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ АЗОТА

Аннотация. Выполнены исследования технологической свариваемости высокоазотистых сталей (ВАС) с содержанием азота до 0,95%. Разработана принципиальная технология дуговой сварки. Прочность сварных соединений и магнитная проницаемость металла шва находятся на уровне основного металла.

Ключевые слова: высокоазотистая сталь, сварка плавлением, технологическая свариваемость, порообразование, механические свойства, магнитная проницаемость.

SHARAPOVA D.M.
Saint-Petersburg Mining University
SAMODYROV I.O.
NRC “Kurchatov Institute” -
CRISM “Prometey”

PROBLEMS OF WELDABILITY OF NEW AUSTENITIC STEELS WITH A HIGH NITROGEN CONTENT

Abstract. Studies of technological weldability of high-nitrogen steels (VAC) with a nitrogen content of up to 0.95% have been performed. The principal technology of arc welding has been developed. The strength of the welded joints and the magnetic permeability of the weld metal are at the level of the base metal.

Keywords: high-nitrogen steel, fusion welding, technological weldability, pore formation, mechanical properties, magnetic permeability.

Высокоазотистая сталь (ВАС) является перспективным материалом для изготовления корпусных конструкций. Обладая высоким прочностными характеристиками и немагнитностью, ВАС относительно дешева, так как для своего получения не требует применения дорогостоящих легирующих компонентов таких, как никель [1]. Однако, для широкого применения сталей с неравновесным содержанием азота вопрос свариваемости является одним из ключевых. Основной проблемой в обеспечении равнопрочности сварных соединений является выделение азота из свариваемого металла из-за нагрева при сварке, а также увеличение магнитной проницаемости металла шва с уменьшением в нем содержания азота.

Спроектированная и изготовленная в ЦНИИ КМ «Прометей» литейная установка «Прометей-А» (принцип действия которой основан на применении метода обработки металлов газовым противодавлением, разработанным профессором Ц.Рашевым [1]) после модернизации в 2016 г. обеспечивает получение высокоазотистых сталей в виде отливок массой до 100 кг (рис. 1). С помощью этой установки в ЦНИИ КМ «Прометей» создано несколько новых марок перспективных ВАС со сверхравновесным содержанием азота, на получение поковок и листового проката из которых разработаны технические условия.

Четыре марки разработанных в институте ВАС представлены в табл. 1 и 2 [2]. Для широкого внедрения ВАС как конструкционного материала проблема технологической свариваемости является одной из главных, как показывает опыт использования сталей с высоким содержанием азота.

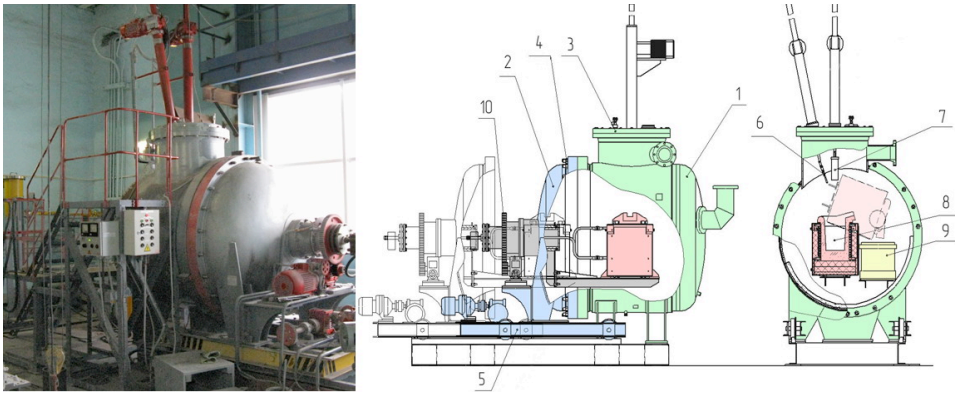


Рисунок 1 – Лабораторная установка «Прометей-А» и ее общий вид

Одной из основных причин низкого качества металла шва, что не позволяет обеспечить равнопрочность сварных соединений, является выделение азота из свариваемого металла из-за нагрева и плавления при сварке, что приводит к интенсивному порообразованию. При этом, в связи с уменьшением содержания азота в швах наблюдается рост магнитной проницаемости металла шва, т.к. низкая магнитная проницаемость разработанных сталей (μ = 1,001) является также одним из их преимуществ.

Таблица 1.

Химический состав металла заготовок

№ пл.	N	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P
1	1,05	0,031	0,35	12,3	18,5	-	-	0,006	0,003
2	0,93	0,045	0,52	11,1	15,9	0,023	0,02	0,001	0,004
3	0,80	0,034	0,24	12,25	17,9	-	-	0,008	0,004
4	0,72	0,032	0,18	12,2	17,8	-	-	0,007	0,003

Таблица 2.

Прочностные характеристики и магнитная проницаемость металла заготовок

№ пл.	N,%	$\sigma_в$,МПа	$\sigma_{0,2}$,МПа	δ_5, %	ψ,%	HRC	HB	μ, не более
1	1,05	1276	992	27,5	24,3	43,5	360	1,001
2	0,93	992	796	22,4	26,6	-	-	1,001
3	0,80	1079	793	46,9	63,8	43	369	1,001
4	0,72	1030	735	48,4	64,8	40,7	349	1,001

Известные результаты исследований по оценке технологической свариваемости этих сталей позволяют заключить, что процессы порообразования могут быть подавлены путем использования режимов сварки, отличающихся малой погонной энергией, а также применения сварочных материалов, содержащих марганец и хром [1-3].

Цель работы – оценка технологической свариваемости и разработка исследовательской технологии сварки плавлением ВАС с содержанием азота до 0,95%.

Для отработки исследовательской технологии сварки были выбраны заготовки из ВАС с содержанием азота 0,72% и 0,93% масс. Полученные методом проф. Ц.Рашева отливки были откованы и после аустенизации (при температуре 1200ºС и выдержке 2час) прокатаны в листы. Из проката получены заготовки толщиной 20мм; химический состав металла плавок, прочностные характеристики и магнитная проницаемость приведены в табл. 1 и 2.

В исследованиях учитывался успешный опыт разработки технологии сварки литейной стали аустенитного класса 05Х21АГ15Н8МФЛ с содержанием азота около 0,6% масс, созданной в ИМЕТ РАН (Москва) [4, 5]. В разработке технологии сварки этой стали принимал непосредственное участие ЦНИИ КМ «Прометей». В связи с чем настоящие исследования базировались на методиках и технологических подходах апробированных на вышеупомянутой литейной стали и изложенных в работе [6].

Для оценки технологической свариваемости использовали планки размером 300×100 мм из которых после подготовки кромок собирали пробы размером 300×200 мм со стыковыми соединениями. В процессе исследований использовались следующие виды технологий:

- лазерная сварка стыковых соединений без присадки;
- электронно-лучевая сварка (ЭЛС) сварных соединений без присадки;
- дуговая сварка неплавящимся (вольфрамовым) электродом в среде защитных газов (в среде аргона и в смеси аргона и азота) без присадки и с присадкой;
- ручная дуговая сварка покрытыми электродами.

Введение в защитную среду азота (в смеси с аргоном) вызвано стремлением сократить его потери в металле сварного шва путем его адсорбции в сварочной ванне.

При подготовке кромок для дуговой сварки использовалась Х-образная симметричная разделка с суммарным углом раскрытия кромок 60º и притуплением 1±1мм; зазор между свариваемыми заготовками выдерживали в пределах 3…4 мм. Сварка осуществлялась с раскладкой валиков. Межпроходную температуру постоянно контролировали, приступая к сварке после остывания металла до комнатной температуры.

В результате анализа публикаций [1, 3, 6-9] и собственных предварительных исследований, частично опубликованных в [2], поиск оптимальных режимов при сварке плавлением осуществляли следующим образом:

При ручной аргонодуговой (РАД) неплавящимся вольфрамовым электродом расход аргона через горелку поддерживали на уровне 16л/мин, расход аргона на поддув для защиты корня шва с обратной стороны - 20 л/мин; варьировали сварочный ток, напряжение, скорость сварки. В качестве присадочного материала использовали проволоку марки - Св-25Х25Н16АГ7.

При сварке в смеси аргона и азота высокой чистоты на входе в смеситель расход аргона поддерживали на уровне 15л/мин, азота – 1 л/мин.

При ручной дуговой сварке (РД) использовали электроды диаметром 3 и 4 мм марки ESAB OK 69.25.

В процессе исследований технологической свариваемости ВАС установлено, что из-за интенсивного порообразования в металле шва невозможна реализация ряда процессов сварки плавлением без присадки: лазерная сварка; электронно-лучевая сварка (ЭЛС); аргонодуговая сварка неплавящимся электродом.

Положительные результаты получены при сварке с присадкой на малых погонных энергиях:

- при сварке неплавящимся электродом с присадкой Св-25Х25Н16АГ7 в среде аргона на токах $I_{св} \leq 130$А и в смеси аргона и азота на токах $I_{св} \leq 180$А;
- при ручной дуговой сварке электродами марки ESAB OK 69.25 Ø 3мм.

Однако, несмотря на введение в сварочную ванну присадочного металла

увеличение теплового воздействия на металл (погонной энергии) при сварке приводит к интенсивному порообразованию и разбрызгиванию жидкого металла сварочной ванны.

Были подобраны оптимальные режимы сварки для РАД-способа в среде чистого аргона: сварочный ток при выполнении корневого прохода – 115 А и 130 А для остальных проходов при заполнении разделки, напряжение на дуге 10,5 В, скорость сварки 0,7-0,8 мм/с. При таких режимах обеспечивается хорошее формирование шва и отсутствие дефектов.

При добавлении азота в защитную среду при токе 115А происходит интенсивное разбрызгивание сварочной ванны и его налипание на электрод и сопло горелки, а также наблюдается интенсивное порообразование в металле шва. Уменьшение тока до 90 А не существенно снижает разбрызгивание и количество видимых дефектов. При токе 80 А, напряжении 13 В и скорости сварки 0,7...0,8 мм/с кипения сварочной ванны практически не наблюдается, обеспечиваются наилучшие условия для образования сварного соединения.

При ручной дуговой сварке покрытыми электродами марки ESAB OK 69.25 плотные швы без пор получены при сварке электродом диаметром 3 мм. Сварка электродом диаметром 4 мм вызвало порообразование в металле по всему сечению шва (табл. 3).

Результаты испытаний на растяжение образцов из азотосодержащей стали с содержанием 0,72 N % масс показали, что прочность металла шва при РАД способе составляет 80...99% от основного металла. Добавление в защитную среду азота способствует повышению содержания данного элемента в сварном шве, однако, прочностные характеристики несколько ниже. При сварке РД способом прочностные характеристики примерно на 15% ниже, чем при РАД (табл. 3).

Таблица 3.

Прочностные характеристики сварных соединений из ВАС с 0,72% N

№ поз.	Способ сварки	Сварочные материалы	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{Bсв}/\sigma_{Bо.м}$ %	$\sigma_{0,2св}/\sigma_{0,2о.м}$ %	N, % в шве
1	Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом	Проволока Св-25Х25Н16АГ7 Аргон	932	739	89	99	0,41
2			949	759			
3			924	725			
4	Сварка неплавящимся электродом в смеси	Проволока Св-25Х25Н16АГ7 Аргон + Азот	868	725	83	94	0,47
5			838	722			
6			899	679			
7	Ручная дуговая сварка	Электрод ОК 69.25	807	596	77	85	0,36
8			803	618			

Значения прочностных характеристик образцов из ВАС с 0,93% масс (табл. 4), заваренных теми же способами и на тех же режимах, демонстрируют такую же зависимость от способов сварки, как и результаты испытаний сварных соединений ВАС с 0,72% N масс, однако, прочность таких швов ниже на 100-150 МПа.

Установленные значения содержания азота в наплавленном металле находятся в пределах 0,36...0,47 % масс. Связь между содержанием азота и прочностными характеристиками не была выявлена. Исследования показали, что сварные швы, полученные аргонодуговым способом в среде чистого аргона, обладают наибольшей прочностью. Установленное значение магнитной проницаемости для всех сварных

соединений $\mu \le 1,002$, т.е. находится практически на уровне основного металла.

Таблица 4.

Прочностные характеристики сварных соединений из ВАС с 0,93% N.

№ поз.	Способ сварки	Сварочные материалы	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{Bсв.}/\sigma_{Bо.м}$ %	$\sigma_{0,2св.}/\sigma_{0,2ом.}$ %
1	Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом	Проволока Св-25Х25Н16АГ7 Аргон	833	698	82	85
2			805	668		
3	Сварка неплавящимся электродом в смеси	Проволока Св-25Х25Н16АГ7 Аргон + Азот	746	603	75	74
4			742	582		
5	Ручная дуговая сварка	Электрод ОК 69.25	661	533	66	66
6			654	518		

Полученные результаты испытаний сварных соединений доказывают принципиальную возможность разработки промышленной технологии сварки плавлением новых аустенитных ВАС с содержанием азота до 0,9% масс, при реализации которой для сварных соединений выполняется условие равнопрочности и обеспечивается магнитная проницаемость металла шва на уровне основного металла.

Чтобы разработать технологическую документацию и рекомендовать эту технологию для конструкций и изделий, где кроме высокой прочности требуется обеспечение таких характеристик, как хладостойкость, коррозионная стойкость и др., необходимо продолжить исследования сварных соединений ВАС в части определения зависимости работы удара металла различных зон сварных соединений в широком диапазоне температур, стойкости к коррозионному и кавитационному разрушению, характеристик работоспособности при циклических нагрузках.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рашев Ц.* Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением. – София: изд-во Болгарской АН, 1995. – 222 с.
2. *Самодуров И.О.* Технологическая свариваемость высокоазотистых сталей применительно к судовым конструкциям / И.О. Самодуров, М.Г. Шарапов // Труды Крыловского государственного научного центра. Специальный выпуск 2. - 2019. - С. 127-131.
3. *Ющенко К.А.* Технологические особенности сварки высокоазотистых сталей / К.А. Ющенко, А.М. Солоха, Н.П. Казеннов // National scientific and technical conference with international participation “HNS 88”, 1-3 October, 1989. v.II.
4. *Костина В.С.* Разработка новой литейной высококоррозионностойкой и высокопрочной стали, легированной азотом. Часть 3. Структура и механические свойства новой литейной высокоазотистой коррозионностойкой Cr-Mn-Ni-Mo-N стали / В.С. Костина, О.А. Банных, В.М. Блинов, С.О. Мурадян, М.С. Хадыев // М.: Заготовительные производства в машиностроении. - 2011. - №9. - С. 39-45.
5. *Костина В.С.* Исследование влияния термической обработки на структуру, фазовый состав и механические свойства новой литейной высокоазотистой коррозионностойкой Cr-Mn-Ni-Mo-N стали / В.С. Костина, С.О. Мурадян, М.С. Хадыев, А.А. Корнеев // М.: Металлы. - 2011. - №5. - С. 33-48.

6. *Костина В.С.* Исследование сварных соединений азотосодержащей литейной стали, полученных ручной дуговой сваркой / В.С. Костина, М.В. Костина, М.Г. Шарапов, И.О. Самодуров, С.О. Мурадян, П.Ю. Поломошнов // Пятый междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии». Москва. 30 октября-1 ноября 2019 г. - Сборник материалов. Том 1. - С. 656-659.
7. *Горынин И.В.* Исследования в области создания и практического использования ВАС, изготовленных с применением метода обработки металлов газовым противодавлением для судостроения. Технический отчет. – ЦНИИ КМ «Прометей», 1989. - С. 53.
8. *Gavriljuk V.G., Berns H.* 1999 High Nitrogen Steels: Structure, Properties, Manufacture, Applications *Berlin: Springer* 223.
9. *Bannykh O.A., Blinov V.M., Proscurin V.B.* 1994 On the structure and properties of high-nitrogen low-carbon non-austenitic steels *Steel research* 65(5) 178-183.

УДК 691.32

ЩЕРБАНЬ Е.М.,
СТЕЛЬМАХ С.А.,
СЫСОЕВ А.К.,
ЧЕРНИЛЬНИК А.А.
Донской государственный технический
университет

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА КАК КОНГЛОМЕРАТА И СВОЙСТВ ЕГО КОМПОНЕНТОВ

Аннотация. Свойства бетона, являющего конгломератом, меняются во времени и зависят от ряда факторов. При рассмотрении процесса деформации под влиянием механических нагрузок или изменений температуры и влажности механизм этого процесса базируется на трех основных положениях. Во-первых, бетон – композиционный материал, матрицей в котором является цементный камень. Во-вторых, модуль упругости и собственная прочность цементного камня могут быть больше или меньше, чем у заполнителя. В-третьих, разрушение бетона при осевом сжатии наступает при таких значениях напряжений в цементном камне, при которых исчерпывается его предельная растяжимость в направлении, нормальном к действию внешней нагрузки, и когда реализованы возможности его структуры препятствовать слиянию отдельных микротрещин в одну быстрорастущую магистральную трещину. Принимая во внимание особенности процесса деформирования под нагрузкой в различные периоды и роль в этом процессе деформативных свойств, целесообразно наметить пути управления этими свойствами, а через них и основными свойствами бетона в желаемом направлении. Важность и целесообразность такого подхода обусловлена необходимостью разработки технологических приемов, с помощью которых можно управлять такими свойствами, как упругость, усадка и ползучесть. Это имеет значение не только при рассмотрении процесса разрушения бетона под нагрузкой при статическом сжатии, но и в других случаях разрушения, например, чередующихся изменениях температуры и влажности, замораживании и оттаивании, то есть во всех случаях, когда воздействие внешней среды вызывает появление локальных или общих деформаций, а, следовательно, и напряжений. Проведен ряд экспериментальных испытаний и сравнительный анализ полученных результатов. Исследовано влияние некоторых видов пород заполнителя на некоторые прочностные и деформативные свойства конгломерата – бетона. В качестве исследуемых пород были приняты: известняк и песчаник. В качестве исследуемых свойств – сопротивление удару, прочность на осевое сжатие, прочность на осевое растяжение. Анализ результатов показал, что бетон на щебне из известняка по всем исследуемым свойствам оказался лучше.

Ключевые слова: композиционный материал; конгломерат; бетон; матрица; заполнитель; цементный камень; прочностные и деформативные свойства.

SHCHERBAN' E.M.,
STEL'MAKHS.A.,
SYSOEVA.K.,
CHERNIL'NIK A.A.
Don State Technical University

THE STUDY OF THE RELATIONSHIPBETWEEN THE STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF CONCRETE AS A CONGLOMERATE AND THE PROPERTIES OF ITS COMPONENTS

Abstract. The properties of a conglomerate concrete change over time and depend on a number of factors. When considering the deformation process under the influence of mechanical loads or changes in temperature and humidity, the mechanism of this process is based on three main provisions. Firstly, concrete is a composite material, the matrix of which is cement stone. Secondly, the elastic modulus and intrinsic strength of cement stone may be more or less than that of aggregate. Thirdly, the destruction of concrete under axial compression occurs at such stresses in the cement stone, at which its ultimate extensibility in the direction normal to the action of the external load is exhausted, and when the possibilities of its structure are implemented to prevent the merging of individual microcracks into one rapidly growing main crack. Taking into account the features of the process of deformation under load at different periods and the role of deformative properties in this process, it is advisable to outline ways to control these properties, and through them, the main properties of concrete in the desired direction. The importance and feasibility of this approach is due to the need to develop technological methods with which you can control properties such as elasticity, shrinkage and creep. This is important not only when considering the process of concrete destruction under load under static compression, but also in other cases of destruction, for example, alternating changes in temperature and humidity, freezing and thawing, that is, in all cases when the influence of the external environment causes local or general deformations, and, consequently, stresses. A number of experimental tests and a comparative analysis of the results were carried out. The influence of some types of aggregate rocks on some strength and deformation properties of conglomerate - concrete is investigated. As the studied rocks were taken: limestone and sandstone. The studied properties are impact resistance, axial compression strength, axial tensile strength. An analysis of the results showed that concrete on crushed stone from limestone turned out to be better in all the studied properties.

Keywords: composite material; conglomerate; concrete; matrix; aggregate; cementstone; strengthanddeformationproperties.

Одной из наиболее актуальных задач современного материаловедения является получение бетона с заданными деформативными свойствами, то есть выбор качественного и количественного компонентного состава бетона: вида матрицы – цемента, заполнителей, обеспечивающего решение поставленных условий. Анализ характера развития деформаций и процессов, происходящих при этом, позволяет утверждать, что наиболее рациональным направлением при выборе технологических решений является управление такими свойствами бетона, как упругость, усадка и ползучесть. При этом одновременный учет их влияния на усталостные воздействия позволит более уверенно выбирать необходимые технологические решения. Такой подход позволяет использовать обширный экспериментальный материал по изучению механизма и влиянию состава на усадку, ползучесть, упругость и обоснованно назначать составы и технологические приемы с целью получения материала с желаемым уровнем его механических и деформативных свойств [1].

Целью исследования было теоретическое и экспериментальное изучение

особенностей взаимосвязи прочностных и деформативных свойств бетона как конгломерата и свойств его компонентов. Задачи исследования: определить влияние некоторых видов пород заполнителя на некоторые прочностные и деформативные свойства конгломерата – бетона. Методами исследования выступили анализ литературных научно-технических источников и экспериментальные лабораторные испытания.

Свойства бетона, являющего конгломератом, меняются во времени и зависят от ряда факторов. При рассмотрении процесса деформации под влиянием механических нагрузок или изменений температуры и влажности механизм этого процесса базируется на трех основных положениях. Во-первых, бетон – композиционный материал, матрицей в котором является цементный камень. Во-вторых, модуль упругости и собственная прочность цементного камня могут быть больше или меньше, чем у заполнителя. В-третьих, разрушение бетона при осевом сжатии наступает при таких значениях напряжений в цементном камне, при которых исчерпывается его предельная растяжимость в направлении, нормальном к действию внешней нагрузки, и когда реализованы возможности его структуры препятствовать слиянию отдельных микротрещин в одну быстрорастущую магистральную трещину. Принимая во внимание особенности процесса деформирования под нагрузкой в различные периоды и роль в этом процессе деформативных свойств, целесообразно наметить пути управления этими свойствами, а через них и основными свойствами бетона в желаемом направлении [2-6].

Фракционный состав, вид и количество крупного и мелкого заполнителей различно влияют на E и R, поэтому модуль упругости бетона нельзя вычислять только по прочности бетона, не учитывая его состав и свойства заполнителей. Влияние состава бетона и качества заполнителей на ползучесть проявляется так же, как и на усадку: с увеличением расхода цемента, введением минеральных добавок, ползучесть повышается; влияние характера поверхности, загрязненности и зернового состава аналогично их влиянию на усадку. Долговечность бетонных и железобетонных конструкций в значительной мере определяется трещиностойкостью бетона. Трещины, появляющиеся в процессе изготовления изделий и при эксплуатации, не только портят их внешний вид, но и оказывают весьма заметное влияние на их эксплуатационные свойства. Они являются очагами разрушения бетона при различных неблагоприятных воздействиях внешней среды, а также причиной развития коррозии арматуры. Влияние заполнителя связано с особенностью формирования и свойствами контактной зоны: шероховатостью поверхности и возможностью физико-химического взаимодействия между заполнителем и цементным камнем. Прочностные и деформативные характеристики исходной породы в этом случае, видимо, не будут оказывать заметного влияния. Влияние крупности и зернового состава заполнителя на предельную растяжимость будет зависеть от соотношения между когезионной прочностью (прочностью на разрыв цементно-песчаного раствора) и адгезионной прочностью его к поверхности заполнителя [7-12].

В научно-исследовательской лаборатории ДГТУ авторами, в соответствии с задачами исследования, был проведен ряд экспериментальных испытаний и сравнительный анализ полученных результатов. Исследовалось влияние некоторых видов пород заполнителя на некоторые прочностные и деформативные свойства конгломерата – бетона. В качестве исследуемых пород были приняты: известняк и песчаник. В качестве исследуемых свойств – сопротивление удару, прочность на осевое сжатие, прочность на осевое растяжение [13-15].

Результаты экспериментальных испытаний приведены в табл. 1.

Анализ результатов показал, что бетон на щебне из известняка по всем исследуемым свойствам оказался лучше. Так, разница в свойствах между ними по показателю «сопротивление удару» составила 18%, по прочности на осевое сжатие – 11%, по прочности на осевое растяжение – 15%. Это позволяет сделать вывод о целесообразности применения известняка в качестве заполнителя для бетона.

Таблица 1.

Результаты испытаний бетона

№ п/п	Вид заполнителя	Сопротивление удару	Прочность на осевое сжатие	Прочность на осевое растяжение
1	Известняк	572	38,6	2,75
2		561	40,2	2,88
3		578	39,4	2,80
4		554	37,8	2,69
5		566	37,6	2,62
6		581	39,5	2,77
Средние значения		569	39,4	2,80
1	Песчаник	479	33,8	2,22
2		465	34,6	2,31
3		458	35,7	2,44
4		476	35,2	2,42
5		460	33,5	2,18
6		466	34,9	2,36
Средние значения		467	35,1	2,38

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Невский В.А.* Усталость и деформативность бетона. - М.: Вузовская книга, 2012. - 264 с.
2. *Ахвердов И.Н.* Основы физики бетона. - М., 1981. - 464 с.
3. *Бриджмен П.* Исследование больших пластических деформаций и разрыва: влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов / Пер. с англ., Изд. 2, испр. - М., 2010. - 448 с.
4. *Гвоздев А.А.* Некоторые механические свойства бетона, существенно важные для строительной механики железобетонных конструкций / Труды НИИЖБ. Вып. 4. М., 1959. С. 5–16.
5. *Десов А.Е.* Некоторые вопросы структуры, прочности и деформативности бетонов. Структура, прочность и деформации бетонов. - М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1966. - С. 13-24.
6. *Пискунов Ю.А.* Исследование реологических свойств бетонов при ударных воздействиях / дис. канд. техн. наук. РИСИ. Ростов н/Д, 1970. - 177 с.
7. *Гансен Т.К.* Ползучесть и релаксация напряжений в бетоне. – М., 1963. - 128 с.
8. *Leonovich S.N.* 2018 Modeling of Capillary Shrinkage and Cracking in Early-Age Concrete *Science and Technique* 17(4) 265-277.
9. *Leonovich S.N.* 2018 Algorithm of Plastic Concrete Crack Resistance is Calculation under Capillary Shrinkage Using Generalizing Criteria *Science and Technique* 17(6) 502-507.
10. *Murtazaev S.A.Y., Saidumov M.S., Lesovik V.S., Chernysheva N.V., Bataev D.K.S.* 2015 Fine-grained cellular concrete creep analysis technique with consideration forcarbonation *Modern Applied Science* 9(4) 233-245.
11. *Шейкин А.Е.* Структура и свойства цементных бетонов / А.Е.Шейкин,Ю.П. Чеховской, М.И.Бруссер. - М., 1979. - 344 с.
12. *Korneeva I., Neutov S., Suriyaninov M.* 2017 Experimental studies of fiber concrete creep *Matec Web of Conferences. EDP Sciences. 6th International scientific conference on reliability and durability of railway transport engineering structures and buildings, Transbud 2017, Kharkiv*.
13. *Murtazaev S.-A.Y., Mintsaev M.S., Saydumov M.S., Aliev S.A.* 2015 Strength and strain properties of concrete, comprising filler, produced by screening of waste crushed concrete *Modern Applied Science* 9(4) 32-44.
14. *Shcherban E.M., Stel'makh S.A., Efimenko E.A.* 2019 Deformability and features of

destruction of centrifuged concrete during shock loads *AIP Conference Proceedings* 2188 060002.
15. *Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Kholodnyak M.G.* 2019 Analysis of concrete deformation diagram, received by different ways of formation, and their separate layers *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 687 022008.

СЕКЦИЯ 3.
ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ

УДК 669.14: 621.787+621.926.3

БОЛОБОВ В.И.,
АХМЕРОВ Э.В.,
ПЛАЩИНСКИЙ В.А.,
КРИВОКРЫСЕНКО Е.А.
Санкт-Петербургский горный университет
БОЧКОВ В.С.
Уральский государственный горный университет

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ, КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ УДАРНО-АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ БЫСТРОИЗНАШИВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНОРУДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. На примере стали Гадфильда, как наиболее распространенного материала быстроизнашиваемых элементов рабочих органов горнодобывающего и горно-обогатительного оборудования, рассмотрено влияние поверхностного упрочнения пластической деформацией (наклепа) образцов на их стойкость к изнашиванию при ударе по магнитному железняку, как представителю абразивной и твердой породы. Установлено, что скорость ударно-абразивного изнашивания предварительно упрочненных образцов (до твердости 300 НВ, 337 НВ и 368 НВ) значительно (до 1,4 раза) ниже, чем исходных (~ 200 НВ) и уменьшается с увеличением интенсивности наклепа. Авторы заключают, что предварительное поверхностное упрочнение пластической деформацией может служить эффективным способом повышения срока службы рабочих органов горнодобывающего и горно-обогатительного оборудования, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания.

Ключевые слова: сталь Гадфильда, изнашивание при ударе, наклеп, магнитный железняк.

BOLOBOV V.I.,
AKHMEROV E.V.,
PLASCHINSKIY V.A.,
KRIVOKRISENKO E.A.
Saint-Petersburg Mining University
BOCHKOV V.S.
Ural State Mining University

SURFACE HARDENING AS A WAY TO INCREASE THE IMPACT AND ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF MINING EQUIPMENT WORKING PARTS

Abstract. On the example of Hadfield steel, as the most common material of mining equipment working parts, the influence of surface hardening by plastic deformation (hardening) of samples on their resistance to shock-abrasive wear on magnetic ironstone, as a representative of abrasive and hard rock, is considered. It was found that the rate of impact-abrasive wear of pre-hardened samples (up to a hardness of 300 HB, 337 HB and 368 HB) is significantly (up to 1.4 times) lower than the initial ones (~ 200 HB) and decreases with increasing the intensity of hardening. The authors conclude that preliminary surface hardening by plastic deformation can serve as an effective way to increase the service life of working parts of mining equipment operating in conditions of shock and abrasive wear.

Keywords: Hadfield steel, shock-abrasive wear, pre-hardening, magnetic ironstone.

Одной из причин потери работоспособности горнорудного оборудования является износ его рабочих органов, что подтверждается существенной долей затрат горнодобывающих и горно-обогатительных предприятий на их ремонт и замену. В этой связи разработка способов, повышающих износостойкость быстроизнашиваемых элементов рабочих органов, является весьма актуальной, о чем свидетельствует значительное количество исследований, посвященных данному вопросу [1-14]. В предыдущей работе авторов [15] на примере сравнительно мягкой и малоабразивной апатито-нефелиновой руды было показано, что в условиях ударно-абразивного воздействия породы, что имеет место, например, в условиях работы шаровых мельниц, когда отсутствует заметное проскальзывание измельчаемой породы по поверхности футеровки, предварительный наклеп быстроизнашиваемого элемента способен существенно (до 1,6 раза) повысить его износостойкость. В настоящей работе указанный вывод подтверждается экспериментами по воздействию на основной материал быстроизнашиваемых элементов горного оборудования – стали 110Г13Л другой, более твердой и абразивной породой – магнитным железняком.

Под цилиндрическим образцом (D = 8 мм) стали с исходной твердостью ~200 *HB*, закрепленном в бойке установки, на фиксированном расстоянии устанавливалась емкость с водо-абразивной массой измельченного магнитного железняка. Включался электродвигатель и в течение заданного времени t осуществлялись удары торцом образца по частицам абразива с фиксацией изменения его массы Δm. Через экспериментальные точки зависимости Δm - t проводилась экстраполяционная прямая, тангенс угла наклона которой принимался за скорость изнашивания V_i материала. Подобные опыты проводились на аналогичных образцах стали, торцевая часть которых предварительно наклепывалась до приобретения поверхностью необходимой твердости.

Результаты испытаний представлены на графике рис 1.

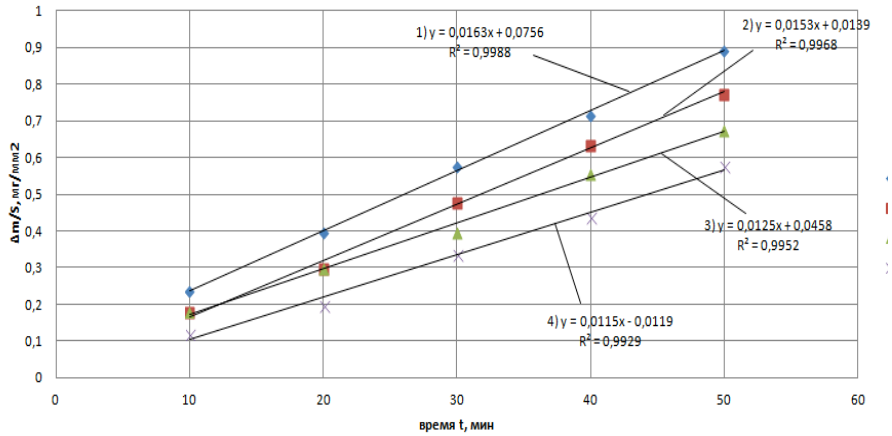


Рисунок 1 – Временная зависимость суммарной убыли относительной массы образцов из стали 110Г13Л при их ударно-абразивном изнашивании по магнитному железняку: образцов исходной твердости (1), наклепанных до твердости 300 *HB* (2), 337 *HB* (3) и 368 *HB* (4)

Как показали результаты измерения твердости, исходный образец стали в течение первого цикла испытаний подвергается «самонаклепу» до твердости ~250 *HB*, значение которой в последующих циклах испытаний заметным образом не изменяется. Значения *HB* предварительно наклепанных образцов на протяжении всех испытаний остаются практически неизменными. Из сравнения вида зависимостей рис. 1 видно, что скорости ударно-абразивного изнашивания наклепанных образцов ($V_{1,2,3}$ = 0,0153, 0,0125, 0,0115 мг/(мм^2 мин)) меньше, чем в случае ненаклепанного образца (V_0 = 0,0163мг/(мм^2 мин)). При этом с увеличением интенсивности поверхностного упрочнения (с повышением твердости) износостойкость образца повышается (для 368 *HB* в 1,4 раза). Данная

закономерность была обнаружена и при ударном изнашивании пластически деформированных образцов стали Гадфильда по апатито-нефелиновой руде [15].

Таким образом, как показали эксперименты, предварительная упрочняющая обработка конструкционных элементов способна существенно повысить их стойкость к ударному воздействию горных пород различной твердости и абразивности. Это обстоятельство целесообразно использовать при разработке способов продления срока службы быстроизнашиваемых деталей горнодобывающего и горно-обогатительного оборудования, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Prokopenko S.A., Vorobiev A.V.* 2018 Recovery of worn-out picks in rock breaking *Eurasian Mining* 1 27-30.
2. *Прокопенко С.А.* Разработка комбайновых резцов нового класса / С.А. Прокопенко, В.С. Лудзиш, И.А. Курзина // Горный журнал. - 2017. - №2. - С. 75-78.
3. *Krasnyy V.A.* 2019 The use of nanomaterials to improve the wear resistance of machine parts under fretting corrosion conditions *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 560(1), 012186.
4. *Zverev E.A., Skeeba V.Yu., Martyushev N.V., Skeeba P.Yu.* 2017 Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings *Key Engineering Materials* 736 132-137
5. *Zykova A., Martyushev N., Skeeba V., Zadkov D., Kuzkin A.* 2019 Influence of W addition on microstructure and mechanical properties of Al-12%Si alloys *Materials* 12(6) 981.
6. *Буевич В.В.* Совершенствование исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов «Урал» / В.В. Буевич, Н.В. Чекмасов, Д.И. Шишлянников, В.В. Габов // Горный журнал. - 2016. - №4. - С. 52-56.
7. *Sivenkov A.V., Konchus D.A., Nikitina V O., Serdiuk N.A., Pryakhin E.I.* 2019 Creating a model of diffusion deposition of metal coatings from melts of low-melting metals *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 560, 1-6.
8. *Сагарадзе В.В.* Структура и свойства плакированной двухслойной стали для корпусов арктических судов / В.В. Сагарадзе, Н.В. Катаева Н.В., С.Ю. Мушникова, Г.Ю. Калинин, О.А. Харьков и др. // Вопросы материаловедения. - 2015. - № 3(83). - С. 14-25.
9. *Болобов В.И.* Износостойкость стали 110Г13Л в различных абразивных средах / В.И. Болобов, А.П. Баталов, В.С. Бочков, С.А. Чупин // Записки горного института. - 2014. - Т. 209. - С. 17-22.
10. *Болобов В.И.* Влияние вида упрочняющей обработки на износостойкость материалов горного оборудования / В.И. Болобов, С.А. Чупин // Записки Горного института. - 2015. - Т.216. - С. 44–49.
11. *Bolobov V., Chupin S., Bochkov V.* 2017 About increasing wear resistance of rock-breaking tool to abrasion by using mechanical and thermo-mechanical treatment *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 87(2), 022003.
12. *Bolobov V.I, Chupin S.A.* 2017 The investigation of the influence of thermomechanical treatment of the material of rotary cutter bit toolholders on its hardness *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 177(1) 012062.
13. *Chupin S., Bolobov V.* 2019 Influence of Thermomechanical Treatment Modes on Wear Resistance of Mining Equipment Material *Materials Science Forum* 945 695-699.
14. *Bolobov V.I., Chupin S.A.* 2019 About the use of 110G13L steel as a material for the excavator bucket teeth *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 378(1) 012005.
15. *Болобов В.И.* О влиянии упрочняющей обработки на износостойкость материала футеровки шаровых мельниц / В.И. Болобов, В.С. Бочков // Горный журнал. - 2017. - №1.

УДК 62-5

БОЛЬШУНОВА О.М.,
ВАТЛИНА А.М.,
КОРЖЕВ А.А.
Санкт-Петербургский горный университет

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Аннотация. Рассмотрен один из важных параметров – концентрация, - влияющих на эффективность использования системы гидротранспорта на горных предприятиях. Предложены способ регулирования привода грунтового насоса и компьютерная модель системы стабилизации мощности привода. Проведено имитационное моделирование в программе Scilab. Проверена работоспособность предложенной модели. Показаны результаты имитационного моделирования. Дана оценка об эффективности предложенного способа регулирования привода грунтового насоса.

Ключевые слова: гидравлический транспорт; регулирование; грунтовый насос; привод; пульпа; концентрация.

BOLSHUNOVA O.M.,
VATLINA A.M.,
KORZHEV A.A.
Saint-Petersburg Mining University

POWER STABILIZATION SYSTEM FOR THE REGULATED ELECTRIC DRIVE OF TRANSPORT VEHICLES

Absrtact. One of the important parameters of using the hydraulic transport system in mining enterprises is considered. A method for regulating the ground pump drive and a computer model of the drive power stabilization system are proposed. The simulation was performed in the Scilab program. The performance of the proposed model was checked. The results of simulation are shown. The efficiency of the proposed method for regulating the ground pump drive is evaluated.

Keywords: hydraulic transport; regulation; ground pump; drive; pulp; concentration.

В системе гидротранспорта необходимо поддерживать постоянным напор транспортируемой гидросмеси. Так как концентрация твёрдой фазы пульпы меняется, необходимо регулировать напор для повышения эффективности использования оборудования. В условиях резко переменных нагрузок целесообразно использовать в системах гидротранспорта горно-обогатительных предприятий регулируемый электропривод шламовых насосов. При изменении концентрации перекачиваемой пульпы нагрузка на привод увеличивается пропорционально увеличению массового расхода, что приводит к повышенному износу электромеханического оборудования насосных станций и к снижению эффективности работы гидротранспортной системы. При изменении концентрации пульпы происходит изменение нагрузки и, следовательно, скорости, что влияет на массовый расход гидросмеси [1].

Электропривод переменного тока обладает существенными преимуществами в сравнении с электроприводом постоянного тока - лучшими масс-габаритными показателями, простотой конструкции, надёжностью, меньшими затратами на обслуживания. Но он имеет жёсткую естественную механическую характеристику, не

соответствующую кривой постоянной мощности, поэтому разработка систем управления, обеспечивающих формирования искусственной механической характеристики является актуальной задачей.

В векторной системе управления выделяется два канала регулирования, один из которых стабилизирует потокосцепление ротора ψ_r путём стабилизации потокообразующей составляющей тока статора i_{sd}. Второй канал обеспечивает регулирование скорости путём воздействия на моментообразующую составляющую тока статора i_{sq}.

В целях получения искусственной механической характеристики близкой к кривой постоянной мощности предлагается регулировать задание контура регулирования потокообразующей составляющей тока статора i_{sd} пропорционально моментообразующей составляющей тока статора i_{sq}. В результате этого потокосцепление будет изменяться пропорционально нагрузке привода, аналогично тому, как это происходит в электроприводе постоянного тока на основе двигателя с последовательным возбуждением.

Также необходимо предусмотреть нелинейные задержанные обратные связи по скорости вращения и по моментообразующей составляющей тока статора. Эти обратные связи обеспечат коррекцию задания регулятора скорости в целях ограничения скорости и нагрузки, соответственно.

На основе вышеизложенного была разработана компьютерная модель системы регулируемого векторного асинхронного электропривода, обеспечивающая формирование кривой, близкой к кривой постоянной мощности. Модель включает в себя блок формирования задания потоксцепления в функции моментообразующей составляющей тока статора и блоки ограничения скорости и момента. Коэффициенты настройки данных блоков определялись подбором при экспериментах с компьютерной моделью [2].

Имитационное моделирование пуска привода проводилось при моменте сопротивления равном 25% от номинального момента двигателя и при скачкообразное изменение момента сопротивления движению до величины в четыре раза больше номинальной [3].

Искусственная механическая характеристика привода, полученная по данным экспериментов, даёт оценку о работоспособности предлагаемой структуры системы управления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Герман-Галкин С.Г.* Matlab & Simulink. Проектирование механотронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
2. *Korzhev A., Bolshunova O., Voytyuk I., Vatlina A.* 2019 Mathematical simulation of transient operation modes of an electric drive of a centrifugal pump for a slurry pipeline E3S *Web of Conferences EECE-2019* 140. 04012.
3. *Коржев А.А.*, *Егоров А.А.* Имитационное моделирование системы автоматического управления нефтегазосепаратором / Неделя науки СпбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Ч.2. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2016. С.124-126.
4. *Murashov I., Frolov, V., Kadyrov A.* Development of the arc plasma torch operation mathematical model for spheroidization of fine-dispersed powders 2018 / Journal of Physics: Conference Series, 1058(1), 012024.
5. *Frolov V.Y., Kvashnin A.O., Murashov I.V.* Nonstationary mathematical model of a magnetic arc blast system / Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus.
6. *Vostrov K., Frolov V., Safonov E.* Development of current limiting device for short and autonomous networks. 2017 / 22nd Symposium on Physics of Switching Arc, 2017-September, pp. 182-185.

УДК62-404.9

ВАГАПОВА Э.А.,
ХУДЯКОВА И.Н.,
ИВАНОВА П.В.,
ИВАНОВ С.Л.
Санкт-Петербургский горный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ В РАБОЧИХ ОРГАНАХ ГОРНЫХ МАШИН

Аннотация. Представлены результатыфизического моделированияпервичного обезвоживания торфяного сырьянарушенной структуры в тонком слое и приэкскавации ковшом экскаватора непосредственно из обводненной залежи при разработке торфяного карьера. Описан механизм влагопонижения, показаны области рационального применения механического влагопонижения торфяного сырья, позволяющие проводить оценку качества добытого торфяного сырья и продуктов его переработки. По результатам проведенного моделирования процесса влагопонижения даны конкретные рекомендации по величине основных параметров рабочих органов горных машин. В частности, подобраны размеры пресс-поддонов для гравитационного пресса первичного обезвоживания торфяной пульпы, выявлена рациональная величина столба поддонов, обеспечивающая заданные параметры качества продукта переработки непосредственно на борту карьера. Проведено моделирование и на его основе даны рекомендации по выбору параметров и конструкции ковша экскаватора, для добычи и первичного обезвоживания экскавированного торфяного сырья разной степени уплотнения. Представленные аппроксимированные кривые процесса обезвоживания в ковше позволили уточнить параметры ковша добычного экскаватора, обеспечивающего заданное качество торфяного сырья на первой стадии его добычи и переработки.

Ключевые слова: физическое моделирование, торфяное сырье нарушенной структуры, торфяная пульпа, механическое обезвоживание, перфорированный ковш, первичное обезвоживание в тонком слое, моделирование процесса механического влагопонижения.

VAGAPOVA E.A.,
KHUDYAKOVA I.N.,
IVANOVA P.V.,
IVANOV S.L.
Saint-Petersburg Mining University

MODELING OF THE PROCESS OF MECHANICAL DEHYDRATION OF RAWPEAT MATERIALS IN THE WORKING TOOLS OF MINING MACHINES

Abstract. The results of physical modeling of primary dewatering of peat raw materials of the disturbed structure in a thin layer and at excavator bucket digging directly from the watered deposit at peat quarry development are presented. The mechanism of moisture dewatering is described, the areas of rational application of mechanical moisture dewatering of peat raw materials are shown, which allow assessing the quality of extracted peat raw materials and products of its processing. By results of the carried out modeling of process of moisture reduction concrete recommendations on size of the basic parameters of working bodies of mining machines are given. In particular, the sizes of press pallets for a gravitational press of primary peat pulp dehydration are selected, the rational size of a column of pallets providing the set parameters of quality of a product of processing directly on board of quarry is revealed.

Modeling was carried out and on its basis recommendations on selection of parameters and design of excavator bucket, for mining and primary dewatering of excavated peat raw materials of different compaction degree were given. The presented approximated curves of the dewatering process in the bucket allowed to clarify the parameters of the mining excavator bucket ensuring the specified quality of peat raw materials at the first stage of its extraction and processing.

Keywords: physicalmodeling, peat raw material of disturbed structure, peat pulp, mechanical dewatering, perforated bucket, primary dewatering in thin layer, mechanical dewatering simulation.

Современное состояние исследований процессов обезвоживания характеризуется в основном интенсификацией и совершенствованием существующего оборудования, изысканием новых высокоэффективных методов удаления влаги и созданием на их основе высокопроизводительных горных машин и аппаратов [1, 2].

Влагу из торфяного сырья возможно удалять различными способами: механическим, гравитационным, физико-химическим, тепловым. При механическом обезвоживании отжатие проводят в прессах и в центрифугах. Механическим способом возможно отделить из торфяного сырья свободную влагу и достичь лишь 70% влаги торфа [3, 4, 5].

Так как в торфяном сырье по массовому соотношению при влаге равной 90% на каждую часть абсолютно сухого торфа приходится девять соответствующих частей воды, то после механического отжатия до влаги 80% на эту же часть сухого веществабудет приходится уже только четыре части воды. Таким образом, снижение влаги торфяного сырья в самом начале его переработки всего на 10% соответствует сохранению энергии эквивалентной затратам на испарение этих пяти частей воды. А так как механическое обезвоживание менее энергетическизатратно, то применение таких технологий позволяет не только значительно уменьшить энергозатраты на доведение торфяного сырья до кондиционных величин, но и сократить сроки этого процесса [6, 7, 8, 9].

С целью интенсификации процесса механического обезвоживания применяют различные воздействия и приемы: дренирование, обработка электролитами, мокрое обугливание, замораживание, электроосмос. Однако многие из них, ввиду технических трудностей, сложности технологических процессов и большой энергоемкости, оказались непригодными для промышленного применения [10, 11].

Известно, что основное количество влаги при механическом отжиме удаляется в первые две минуты, а процесс обезвоживания можно разделить на две области. Область давлений до 2,0 МПа позволяет понизить процент влаги от 90% до 80%. Обезвоживание торфа до влаги ниже 80% требует значительного увеличения давления и расхода энергии. Увеличение давления до 10 МПа и более оказывает незначительное влияние на эффективность процесса механического обезвоживания торфа, а при высоких скоростях деформации и удельных загрузках фильтра свыше 0,2 г/см^2 наблюдается даже отрицательный результат. Только с ростом продолжительности отжатия возрастает количество отфильтрованной жидкости. Приложение высоких давлений с большими скоростями деформации способствует быстрому образованию у фильтра сухих слоев торфа, что ведет к запиранию воздуха и воды внутри образца и прекращению фильтрации [12, 13].

Отделение влаги в тонком слое.

Для интенсификации процесса отделения влаги под действием нагрузки авторамибыло проведенофизическое моделирование процесса, что позволило на первом этапе уточнить закономерности изменения фильтрации влаги из водоторфяной пульпы и основываясь на результатах моделирования,осуществлятьобоснованный выбор величин параметров модуля обезвоживания. Моделирование проводилось на торфяном сырье

месторождения Заозёрское №1021.

Моделирование процесса осуществлялось путем уплотнения торфяного сырья на винтовом прессе в контейнере цилиндрической формы, при этом физическое воздействие осуществлялось пуансоном. Основание контейнера – перфорированное R_v 1,5-3 с площадью перфорации 23%. На рис. 1 представлен результатмоделирования в виде графиковизменения усредненной влаги торфа при росте давления в процессе прессования в зависимости от отношения толщины слоя отжимаемой пульпы к толщине слоя отжатой пульпы без выдержки под нагрузкой, так кривой 1 соответствует отношение толщин равным 5,37; кривой 2 – 4,09; кривой 3 – 3,16 соответственно.

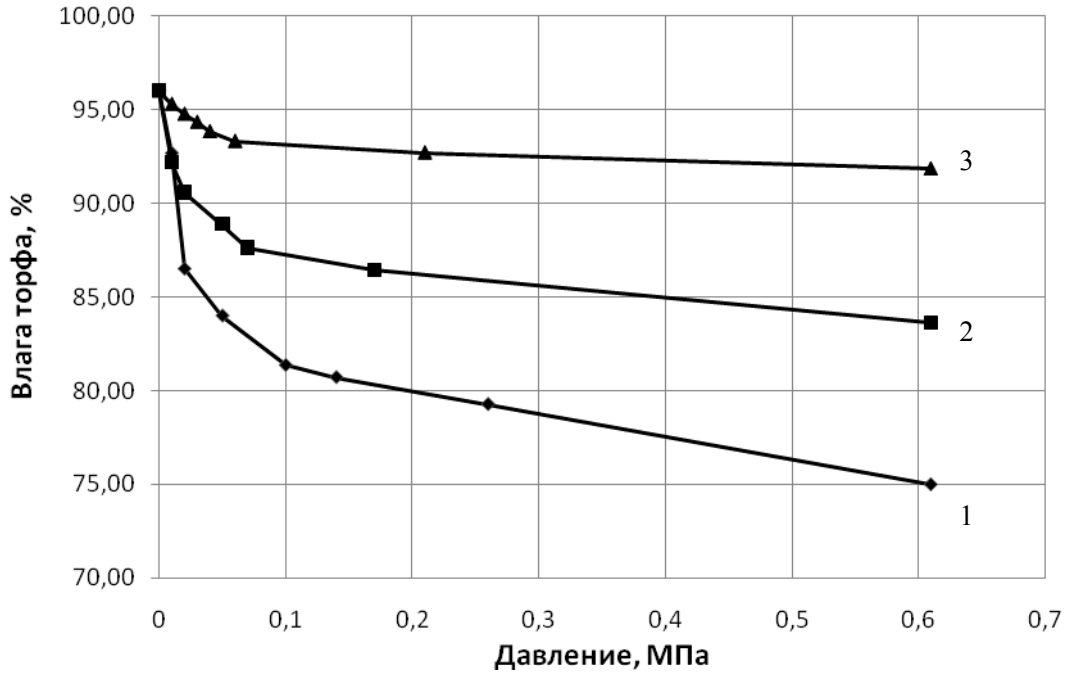


Рисунок 1 - График изменения усредненной влаги торфа от давления

На рис. 2 представлен график интенсивности изменения толщины слоя от давления, обозначения кривых соответствуют обозначениям рис. 1.

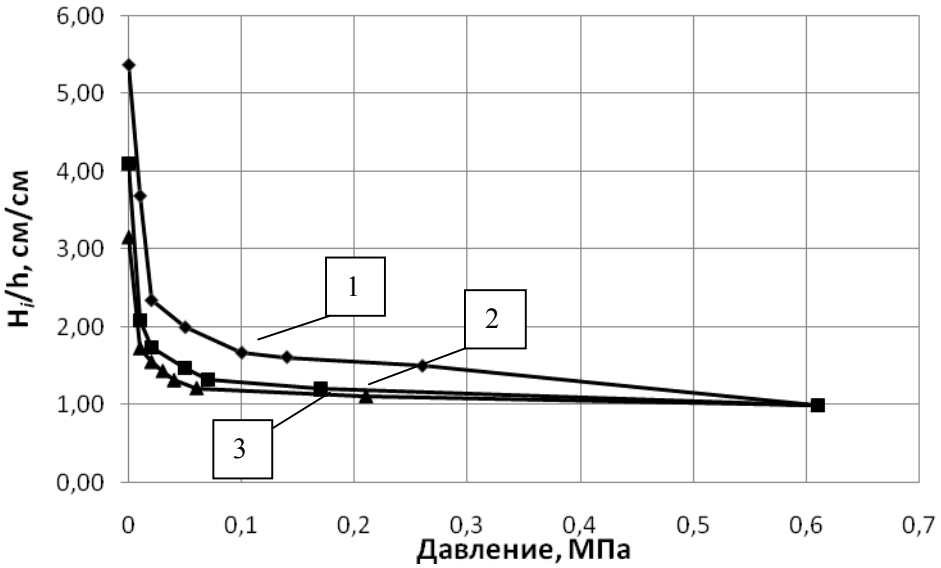


Рисунок 2 - Графикинтенсивности изменения толщины слоя от давления:
H_i – толщина слоя отжимаемой пульпы, h – толщина слоя отжатой пульпы

Моделирование процесса обезвоживания торфа в гравитационном прессе позволило экспериментально установить, что отжатие торфа в тонком слое целесообразно проводить при давлении нагрузки не более 0,6 МПа. Дальнейшее увеличение нагрузки не ведет к интенсификации отделения влаги из торфа. Физическое моделирование позволило выбрать геометрические параметры конструкции поддонов установки первичного обезвоживания торфяной пульпы [14, 15]. Установка первичного обезвоживания торфяной пульпы представляет собой вертикальные колодцы подъема и спуска, по которым опускаются/поднимаются поддоны с загруженным торфяным сырьем или соответственно опорожненные. Поддоны конструкционно выполнены вкладываемыми, поставленные друг на друга поддоны воздействуют на нижерасположенные поддоны в столбе вложенных поддонов своим весом и весом материала, загруженного в них, так понижение влагосодержания формуемого сырья осуществляется под давлением поставленных друг на друга поддонов. Таким образом определены размеры поддона 0,5×0,6×0,3 м с высотой столба поддонов 10,5 м для установки производительностью 10-12 т/ч торфяного сырьяс влагой 70%.

Предварительное отделение влаги в ковше.

Для проведения имитационного моделирования по предварительному обезвоживанию торфяного сырья в ковше экскаватора были созданы шесть моделей ковша кубовидной формы с различной площадью перфорации на его гранях. Параметры перфорации R_v 2-8 с площадью перфорации 32%. Ребро ковша составляло 75 мм. На каждой грани перфорация выполнялась одинаковой и занимала половину площади соответствующей грани. Ковш с перфорированной одной передней гранью был принят за базу. Верхняя грань во всех ковшах отсутствовала и ее заменял пуансон, воздействующий на загруженное в модель ковша торфяное сырье с избыточным давлением 0,02 МПа в течение тридцати секунд. Каждый раз загружалось 250 ±5 г сырья. В качестве последнего выступало торфяное сырье месторождения Заозёрское №1021, средней степени нарушенности, добытое экскаватором, влагой 92%. Весь объем используемого в эксперименте сырья был разделен на три группы: № 1 – собственно экскавированное сырье, № 2 – это же сырье, но предварительно уплотненное и № 3 – сильно уплотненное торфяное сырье.В каждой серии опытов проводились равноточные измерения исходных масс ковшей и соответствующие измерения после прессования. Таким образом, оценивалась потеря влаги при предварительном отжатии. Результаты обработанных экспериментальных данных представлены на рис. 3.

Как видно из рисунка с увеличением площади перфорированной поверхностиобъем отжатой воды увеличивается, но интенсивность этого увеличения позволяет сделать вывод о том, что отделение влаги идет лишь в незначительном слое в непосредственной близости к перфорированной стенке. В глубине же проба практически своей влаги не меняет. При этом наибольший эффект вододеления имеют местов случае отжатияне уплотненного материала, когда присутствует каналы для прохода отжимаемой влаги из глубины на внешнюю поверхность.

Линии тренда аппроксимированных кривых интенсивности отделения влаги при предварительном отжиме в ковше имеют вид:

1. $m_{H2O} = 7{,}7875e^{2{,}21S\text{пер}}$;
2. $m_{H2O} = 4{,}495e^{2{,}24S\text{пер}}$;
3. $m_{H2O} = 2{,}4918e^{2{,}88S\text{пер}}$.

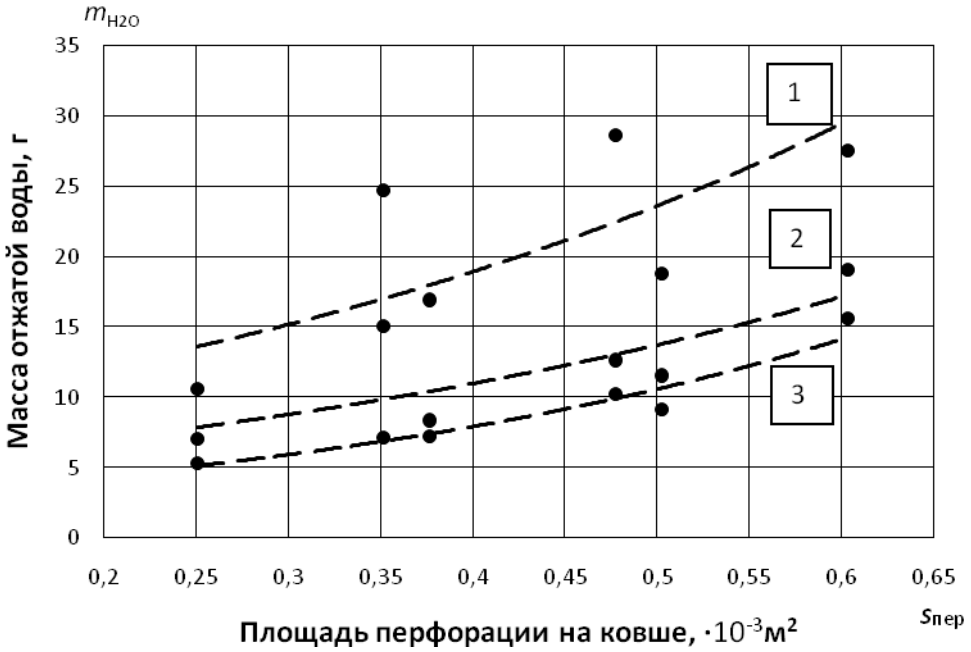


Рисунок 3 - График зависимостей отделения воды в торфе в зависимости от площади перфорации ковша

Что дает нам возможность подбирать как форму, так и размеры ковша экскаватора. По результатам моделирования разработана модель ковша, представленная на рис. 4.

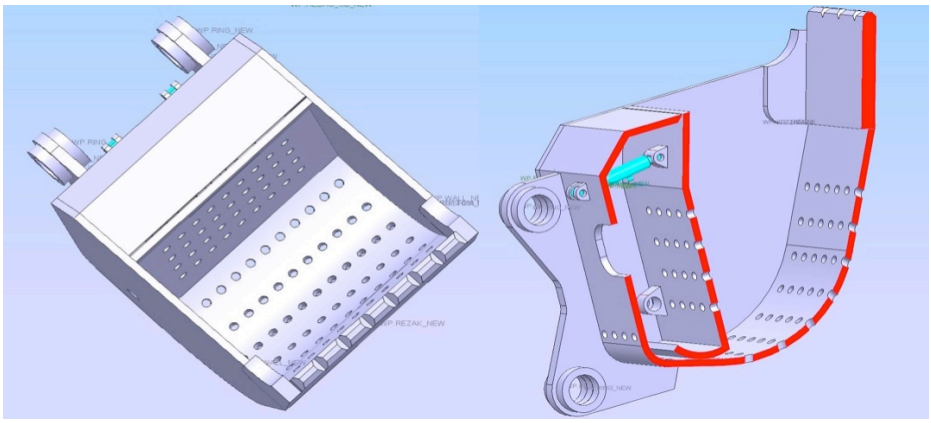


Рисунок 4 - Предлагаемая модель ковша с перфорацией

Для предварительного отжима в ковш монтируется дополнительная стенка, которая снабжена приводом в виде гидроцилиндра, шток которого шарнирно соединен с ней. Гидроцилиндр расположен по касательной.

Применение данной конструкции уменьшит содержание влаги в торфяном сырье уже при поднятии ковша с экскавированным сырьем над торфяной залежью, что обеспечит сокращение затрат времени на сушку торфяного сырья и транспортировку излишней влаги.

Выводы.

В результате физического моделирования установлено, что процесс механического обезвоживания торфяного сырья в гравитационном прессе определяется особенностями передачи давления в тонких слоях, позволяет сделать обоснованный выбор

геометрических и силовых параметров конструкции гравитационного пресса модуля обезвоживания торфяной пульпы на борту карьера.

Касательно формы ковша – кубовидная модель ковша с перфорацией его стенок показала эффективность применения перфорации на стадии предварительного отжима при экскавации: с увеличением количества перфорированных стенок и, соответственно, площади перфорации, процесс влагоотделения происходит с большей эффективностью, однако, если изменить форму ковша (например, с прямоугольным основанием) увеличив тем самым площадью дна ковша и количество перфораций на ней, это будет способствовать влагоотделению за счет снижения объема торфяного сырья не прилегающих к перфорированным стенкам.

Также на основе проведенного моделирования по первичному механическому обезвоживанию в ковше экскаватора еще раз показана целесообразность отжатия в ковше торфяного сырья нарушенной структуры – такой торф легче всего отдаетвлагу, при первичном уплотнении и в дальнейшей переработке может повлиять на качество торфяного сырья и продуктов его переработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горячев В.И., Михеев И.И., Яблонев А.Л., Фомин К.В.* Выбор пресса для обезвоживания торфа в технологии фракционирования торфяного сырья гидроразмывом / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2018. №S38. С. 22-30.
2. *Лебедева А.И., Макаров С.А.* Проблема искусственного обезвоживания торфа / Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов: сборник научных трудов. – Тверь, 2018. С. 136-140.
3. *Вагапова Э.А., Худякова И.Н., Иванов С.Л.* К вопросу о первичном обезвоживании торфяного сырья, добытого гидромеханизированным способом / Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: 14-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С. 230-234.
4. *Резванова Э.А., Иванов С.Л.* Интенсификация первичного обезвоживания гидроторфяной смеси при добыче торфяного сырья на борту автономного модульного комплекса / Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: 12-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 200-203.
5. *Шерстнев В.И., Лебзин М.С.* Влияние водных свойств и структуры торфа на процесс его механического обезвоживания / Экономические, экологические и социальные проблемы горной промышленности Урала.: сборник научных статей. Под ред. Н.В. Гревцева, И.А. Коха. – Екатеринбург, 2017. С. 128-131.
6. *Гармаев О.Ж., Федоров А.С., Соколов А.В.* Универсальная лабораторная установка по переработке торфяного сырья / Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов IV международной научно-практической конференции, Том II // Под ред. В.В. Максарова – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. С. 101-103.
7. *Михайлов А.В., Федоров А.С.* Анализ условий полевого производства окускованной торфяной продукции / Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизацияматериалы I международной научно-практической конференции. – СПб.: СПбФ НИЦ МС, 2018. №1. С. 146-147.
8. *Михеев И.И., Горячев В.И., Щербакова Д.М.* Аналитическое обоснование рациональных конструкторско-технологических параметров ленточно-роликового пресса для обезвоживания торфа / Вестник Тверского государственного технического университета.

Серия: Технические науки. – Тверь, 2019. № 3(3). С. 64-70.
9. *Тяботов И.А., Горбунов А.В., Усманов А.И., Усманова В.А.* Биоэнергетика на основе торфа / Уральская горная школа - регионам: сборник докладов международной научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2016. С. 553-554.
10. *Бондарев Ю.Ю., Иванов С.Л.* Создание оборудования горно-энергетического комплексадля производства топлива из торфяного сырья / Современные технологии в горном машиностроении: сборник научных трудов семинара. – М.: МГГУ, 2014. С. 421-427.
11. *Горячев В.И.* Искусственное обезвоживание торфа: монография. – Тверь: ТвГТУ, 2012. - 183 с.
12. *Шерстнев В.И., Усманов А.И.* Исследование влияния качественной характеристики торфа на процесс обезвоживания / Теория и практика мировой науки, 2018. №5. С. 48-51.
13. *Шерстнев В.И., Лебзин М.С., Резник М.А., Галембо А.А.* Исследование процессов обезвоживания с учетом изменения параметров прессования / Уральская горная школа - регионам: сборник докладов международной научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2017. С. 622-623.
14. *Вагапова Э.А., Худякова И.Н., Иванов С.Л.* Обоснование и выбор оборудования для первичного обезвоживания торфяного сырья при его гидромеханизированной добыче из неосушенной залежи / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2019. №7 (специальный выпуск 18). С. 3-11.
15. *Vagapova E.A., Khudyakova I.N. and Fadeev D.V.* 2019 Primary dehydration of peat on floating mining platforms *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 378 012104.

УДК 622.232

ГАБОВ В.В.,
ЗАДКОВ Д.А.
Санкт-Петербургский горный университет
СТЕБНЕВ А.В.
АО «СУЭК-Кузбасс»

РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ АО «СУЭК-КУЗБАСС»

Аннотация. В статье рассматриваются горно-геологические условия и режимы работы очистных механизированных комплексов в комплексно-механизированных очистных забоях на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс». Произведен анализ машин, оборудования и основных факторов, влияющих на производительность комплексов в условиях шахт АО «СУЭК-Кузбасс».

Ключевые слова: уголь; шахта; очистной забой; комплекс; секция; комбайн; конвейер; производительность; режим работы.

GABOV V.V.,
ZADKOV D.A.
Saint-Petersburg mining University
STEBNEV A.V.
JSC «SUEK-Kuzbass»

MODES OF OPERATION AND EFFICIENCY OF OPERATION OF MECHANIZED COMPLEXES IN TERMS OF JSC «SUEK-KUZBASS»

Abstract. The article deals with the mining and geological conditions and operating modes of treatment mechanized complexes in complex-mechanized treatment faces at the mines of JSC «SUEK-Kuzbass». The analysis of machines, equipment and the main factors affecting the performance of complexes in the conditions of mines of JSC «SUEK-Kuzbass» is made.

Keywords: coal; mine; treatment face; complex; section; combine; conveyor; productivity; operating mode.

На угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» в последние годы широко используются новые высокопроизводительные машины и комплексы, системы управления и информационного обеспечения в основном зарубежного производства. Эффективность их применения в конкретных условиях зависит от правильности выбора и оценки исходных данных (горно-геологических, технологических условий), структуры и параметров соответствующих технических средств и обеспечивается поддержанием устойчивого технологического процесса как по интенсивности добычи угля (производительности), так и по его непрерывности во времени.

АО «СУЭК-Кузбасс» входит в состав Сибирской угольной энергетической компании. В настоящее время структура АО «СУЭК-Кузбасс» включает шахты, территориально расположеные в Кемеровской области: «Имени С.М. Кирова», «Комсомолец», «Имени 7 Ноября-Новая», «Имени А.Д. Рубана», «Полысаевская», расположенные в г. Ленинск-Кузнецкий и шахты «Талдинская-Западная-1», «Талдинская-Западная-2» и «Имени В.Д. Ялевского» расположены в Прокопьевском районе. На шахте «Имени 7 Ноября-Новая» ведутся пока только подготовительные работы. В работе

находятся 9 очистных забоев, оборудованных очистными механизированными комплексами (ОМК).

Отработка выемочных столбов в условиях шахт АО «СУЭК-Кузбасс» осуществляется на глубинах 180-470 м. Мощность вынимаемых пластов от 1,7 до 5,75 м. Угол залегания пластов 0-20 градусов. Газовыделение выемочных участков 5-122 $м^3$/мин. Длины очистных забоев составляют 220-400 м. Работа большинства шахт осуществляется по схеме «шахта-лава», то есть одним очистным забоем. Основным преимуществом использования схемы «шахта-лава» является высокая концентрация горных работ, позволяющая существенно снизить общешехтные затраты. Однако, указанная схема работы имеет один существенный недостаток − эффективность работы шахты в целом зависит от работы одного очистного забоя.

В семи очистных забоях работают комбайны немецкой фирмы Eickhoff (SL-300, SL-900) и в двух фирмы Joy (7LS20, 7LS6C). Все эксплуатируемые комбайны выполнены по одной конструктивной схеме: симметричная блочно-модульная компоновка с двумя разнесенными шнековыми исполнительными органами с автономными приводами резания. Номинальные мощности электродвигателей исполнительных органов от 285 до 825 кВт с общей энерговооруженностью комбайнов до 2104 кВт. Ширина вынимаемой исполнительными органами полосы до 1,0 м, скорость подачи комбайна SL-900 до 32 м/мин.

Комбайны оснащаются современными системами диагностики и контроля, обеспечивающими высокий ресурс и надежную работу выемочной машины. При этом наличие ручного, дистанционного и автоматического управления обеспечивает удобство и безопасность работ в любых режимах: добыча угля, выполнения концевых операций, зарубка на новую полосу выемки, тестирование режимов.

В эксплуатации забойные скребковые конвейеры все импортного производства: Joy AFS-38×800/1500, DBT PF 4 и DBT PF 6. Усилия на разрыв замковых соединений цепей скребковых конвейеров составляет от 1500 до 4000 кН, а скорость движения цепи – от 1,0 до 2,05 м/с. Ресурс работы конвейеров по транспортируемой массе составляет от 3,0 до 12,0 млн.т.

Состав механизированных комплексов характеризуется набором оборудования разных производителей. В одном очистном забое применяются отечественная механизированная крепь типа МКЮ 2Ш-13/27. В остальных забоях крепи импортного производства. В трех забоях применяются крепи польского производства: FRS-GLINIK-12/25, TAGOR 15/32 совместно с GLINIK-15/32 и FRS-GLINIK-12/26. В остальных забоях применяются высокотехнологичные крепи английского и немецкого производства: Joy RS-2400/2×650, Joy RS-22/47, Joy RS-25/55, DBT 2200/4800, DBT 2400/5000, DBT 2550/5500.

Все эксплуатируемые механизированные крепи относятся к агрегатным, поддерживающе-оградительным, однорядным, двухстоечным. Структурная формула крепей: ПО×А×3сх×1,75×[2+0]×4зв. Шаг установки секций – 1,75 м, шаг передвижки от 0,8 до 1,0 м, сопротивление секций крепи опусканию пород кровли составляет от 4775 до 9340 кН. Удельное сопротивление на 1 $м^2$ поддерживаемой площади от 848-1131 кН/$м^2$, что является достаточным для условий Кузбасса с глубиной отработки до 500 м. Усилие передвижки секций изменяется от 565 до 726 кН. Коэффициент раздвижности гидростоек всех секций более 2,0. Рабочее давление в гидросистеме стоек секций крепи от 40 до 46 МПа.

В течение последних двадцати лет преимущественное распространение в основных угледобывающих странах получили поддерживающе-оградительные механизированные щитовые крепи, в наибольшей степени соответствующие горному давлению, обеспечивающие безопасность ведения очистных работ, обладающие достаточным ресурсом и надежностью. Фирмы-производители, борясь за рынки сбыта, продолжают совершенствовать очистные механизированные комплексы в традиционном направлении: увеличение производительности на основе роста мощности приводов, металлоемкости и

ресурса машин и оборудования [1, 2]. Создаются комплексы с расширенными возможностями [3, 4], обеспечивающие проход мелких горногеологических нарушений (взбросов, сбросов) по породе без перемонтажа комплекса и устойчивую их работу при отработке столбов по простиранию при углах залегании до 40…45º.

Основными показателями эффективности эксплуатации очистного оборудования являются: нагрузка на очистной забой, производительность труда, ресурс и безаварийная работа горно-шахтного оборудования (ГШО).

Анализ работы механизированных комплексов на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» [5, 6] показал, что основными причинами простоев очистных забоев являются не отказы средств механизации очистных работ, а влияние горно-геологических условий, выполнение работ связанных с обеспечением безопасных условий труда, прочие производственно-технические причины. Существенное снижение добычи связано с проявлением таких факторов как проход геологических нарушений, горные удары и большое выделение метана, неустойчивая и весьма неустойчивая кровля, большой приток и выброс воды, наличие зон ПГД, ложная почва, интенсивное трещинообразование в кровли.

Для анализа режима работы комплексно-механизированного очистного забоя рассмотрена фактическая нагрузка на очистные забои по месяцам за 2016-2019гг., лава 24-58 шахты «Имени С.М. Кирова» (рис. 1). Эти графики отражают довольно высокую степень неравномерности нагрузок на очистной забой, то есть существенное отклонение режимов работы ОМК и их производительности от рациональных значений. Такой же характер процессов добычи и по другим шахтам АО «СУЭК-Кузбасс».

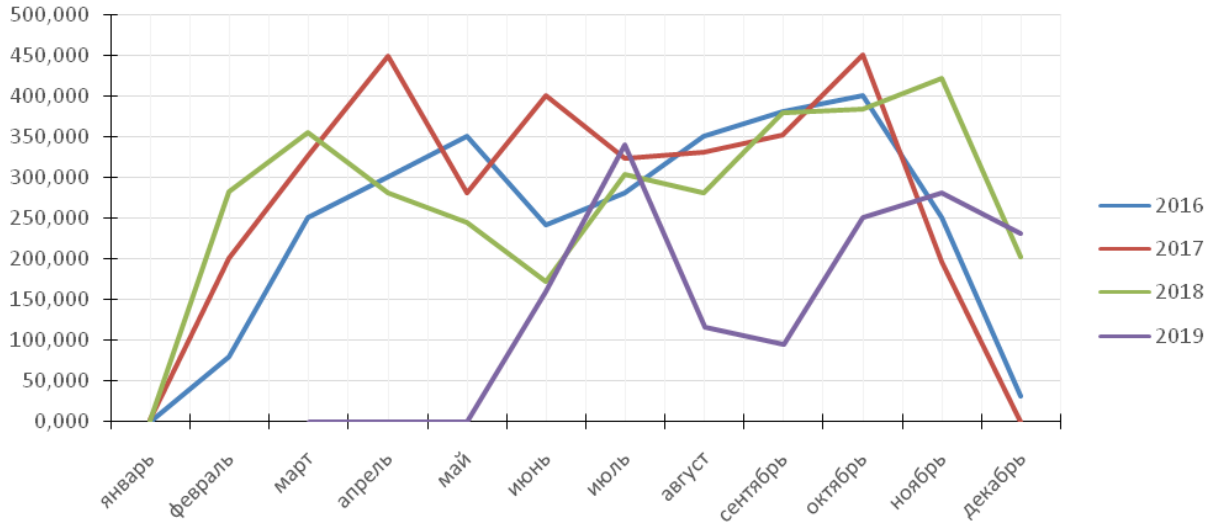


Рисунок 1 - Нагрузка на очистные забои за 2016-2019 гг., лава 24-58 шахты «Имени С.М. Кирова» АО «СУЭК-Кузбасс»

Рассматривая совместно продолжительность простоев очистных забоев из-за отказов ГШО [5] и изменений нагрузок на забои (рис.1) можно отметить следующее. Динамика нагрузок слабо коррелирует с простоями из-за отказа ГШО, что говорит о большом весе других факторов. Однако простои по фактору ГГУ и из-за отказов ГШО также не полностью объясняют всю изменчивость нагрузок на комплексно-механизированные забои шахт.

На рис. 2 представлен характерный неустойчивый по интенсивности график посуточной добычи в лаве 814 шахты «Имени А.Д. Рубана» при неритмичной и слабоуправляемой работе забоя. На рис.3 также представлен график посуточной добычи, но при относительно управляемой работе в лаве 12-04 шахты «Имени А.Д. Рубана». Как видно из графиков им характерна существенно значимая изменчивость суточной добычи.

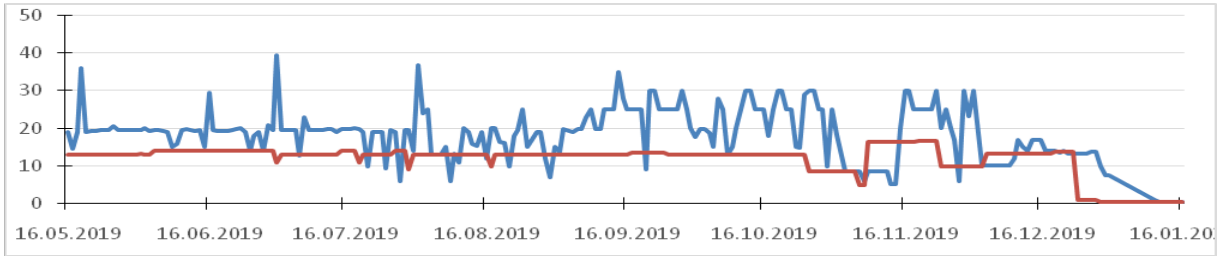


Рисунок 2 - Посуточная добыча в лаве 814 шахты «Имени А.Д. Рубана»

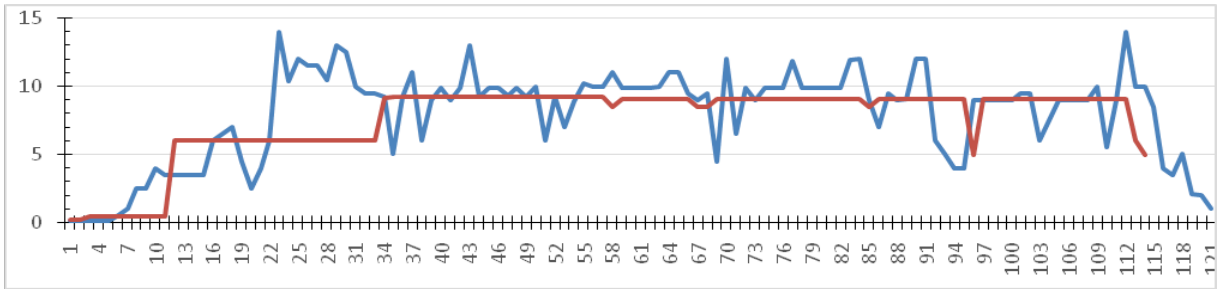


Рисунок 3 - Посуточная добыча в лаве 12-04 шахты «Имени А.Д. Рубана»

Известно, что работа очистного комбайна или струга с перегрузками приводит к остановкам и снижению коэффициента машинного времени ($К_М$) и коэффициента устойчивости работы ($К_{yi}$) в номинальных режимах.

На снижение коэффициентов устойчивости в наибольшей степени влияют, кроме внешних факторов (неустойчивые и трудноуправляемые кровли, обводненность, газообильность пластов, наличие в пласте угля прослоев породы и локальных включений и т.д.), динамика нагрузок, качество управления машинами, уровень информационного обеспечения, достоверность и четкость представления сведений о выполняемых операциях, устойчивость и согласованность управляющих воздействий.

Проблему повышения устойчивости процесса добычи в рациональных режимах можно решать только комплексно совершенствованием конструкции основного и вспомогательного оборудования комплексно-механизированного очистного забоя (КМОЗ) [7], систем диагностики, управления и информационного обеспечения [8].

На рис. 4 представлена динамика процесса добычи угля в КМОЗ: фактическая скорость подачи комбайна и нагрузки на приводы основных машин ОМК. Скорость подачи комбайна изменяется в широком диапазоне. Для неё характерны частые остановки малой длительности. Причины изменчивости скорости подачи, времени остановок малой длительности и их частоты применительно к шнековым комбайнам в специальной литературе мало представлены и слабо изучены.

Текущее значение производительности комбайна Q_i равно произведению производительности пласта $Q_o = BH\gamma$ на действительную среднюю скорость подачи $V_ф$ за анализируемый период времени. Здесь Q_o – величина постоянная, характеризует пласт (мощность пласта H, плотность угля γ и ширина захвата B). Поэтому рациональный режим работы ОМК, его потенциальные возможности, однозначно характеризуются технически обоснованной расчетной скоростью подачи ($V_{п.р}$) комбайна, а фактический режим в конкретных условиях − фактической скоростью подачи ($V_{п.ф}$).

Процесс добычи угля в КМОЗ шахт многофакторный, неустойчивый со случайным характером формирования значений их параметров. В общем случае нагрузка, мощность энергии, потребляемой из сети (рис. 4), производительность комбайна и среднесуточная добыча характеризуются высокой степенью неравномерности и могут быть представлены средними их значениями и соответствующими значениями коэффициентов их вариации, характеризующими степень их изменчивости.

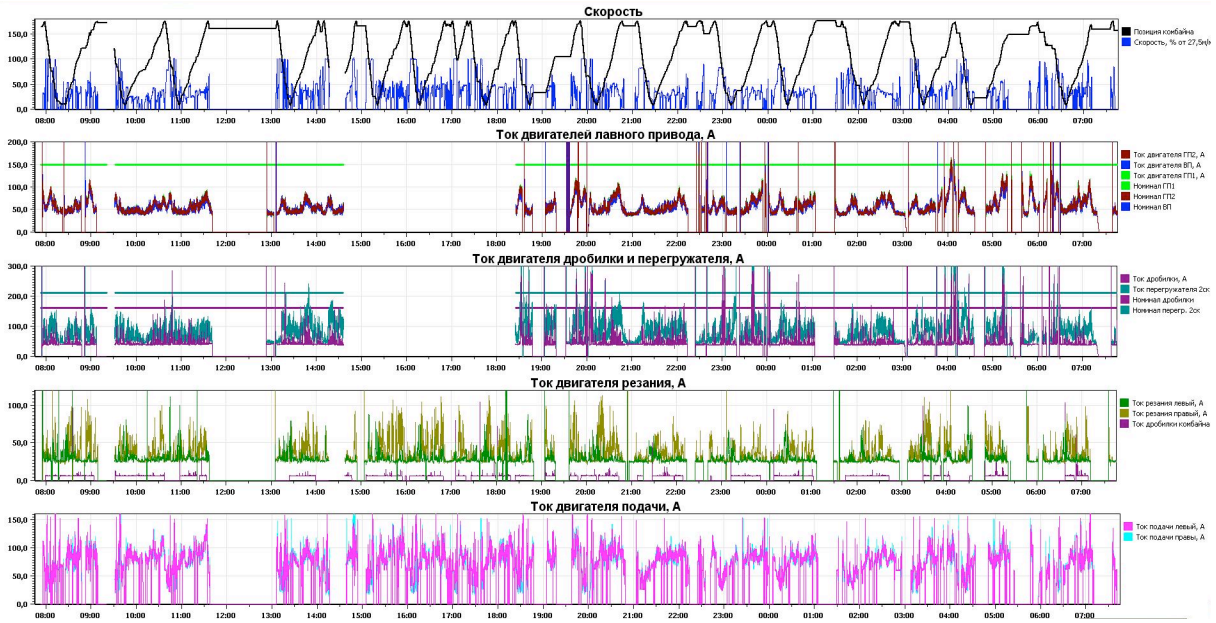


Рисунок 4 - Скорость движения комбайна в лаве и нагрузки на приводы машин в КМОЗ

Значительный резерв в увеличении нагрузки на забой заключается в повышении коэффициента устойчивости процесса добычи угля в рациональном режиме по скорости подачи очистного комбайна $K_{yv} = V_{\text{п.ф}}/V_{\text{п.р}}$ и коэффициента устойчивости по времени перерывов при работе по выемке: $K_{y.t} = \Sigma t_{\text{пі}}/(T_{\text{см}}\text{-}T_{\text{всп}})$. Здесь $\Sigma t_{\text{пі}}$ − сумма времени кратковременных перерывов в работе комбайна (без отключения его двигателей); $T_{\text{см}}$ − длительность смены; $T_{\text{всп}}$ − сумма времени вспомогательных операций, выполняемых с отключением двигателей.

Исходя из изложенного следует, что повышение интенсивности процесса отделения угля от массива в КМОЗ может быть достигнуто одновременно двумя методами:

− традиционным − уменьшением длительности перерывов в работе по добычи, то есть повышением коэффициента машинного времени ($К_{м}$). Длительность времени перерывов традиционно учитывается в минутах и часах техническими средствами диспетчеризации и анализируется оперативным персоналом;

− сокращением количества кратковременных остановок процесса отделения угля от массива (без выключения двигателей комбайна) и поддержанием скорости его подачи в диапазоне номинальных её значений для данных условий. Длительность операций и переходных процессов целесообразно контролировать в секундах и минутах.

Таким образом, на основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Сложные горно-геологические условия отработки угольных пластов на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» (высокая газоносность и обводненность, опасность пластов по газодинамическим явлениям и горным ударам, наличие геологических нарушений и неустойчивой кровли, расслоение и трещиноватость пород кровли, образование вывалов, изменения мощности пласта и в его структуре) являются главными сдерживающими факторами стабильной работы очистных забоев в течении довольно длительного времени;

2. Высокий потенциал применяемых средств механизации очистных работ и уровень технологической обеспеченности производственного процесса в КМОЗ используются менее чем на половину от его возможностей;

3. Наиболее перспективными способами повышения эффективности работы КМОЗ являются:

− метод снижения времени простоев по ГГУ, технологическим условиям и аварийным простоям с контролем оперативным персоналом средствами диспетчеризации

в минутах и часах;

− сокращением частоты кратковременных остановок процесса отделения угля от массива переходом на управление с передачей функций контроля средствам автоматики.

4. Приданием функций адаптивности [9-15] основному и вспомогательному оборудованию и системам управления ОМК к изменяющимся условиям по мере отработки выемочных столбов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Линник Ю.Н., Крашкин И.С., Мерзляков В.Г.* и др. Концепция развития очистного, проходческого, конвейерного и бурового оборудования на период до 2020 г. - М.: Горные машины и автоматика, 2006. №2. С. 2-12.
2. *Слюсаж Р., Фалат С.* Лавные крепи производства завода горных машин «ГЛИНИК» для угольной промышленности России / Уголь, 2006. №4 С. 21.
3. *Буялич Г. Д.* Оценка характера взаимодействия крепи с труднообрушаемой кровлей / Совершенствование технологических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых: сб. науч. тр. // Ассоциация «Кузбассуглетехнология». – Кемерово, 1995. № 9. С. 35–37.
4. Повышение сопротивления консолей механизированной крепи / Г.Д. Буялич, Б.А. Александров, Ю.А. Антонов, В.В. Воеводин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2000. № 5. С. 82–87.
5. *Стебнев А.В., Мухортиков С.Г., Задков Д.А.* Анализ работы очистных механизированных комплексов в условиях шахт АО «СУЭК-Кузбасс» / Сборник трудов научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017». – СПб.: СПГУ, 2017. С. 84-89.
6. *Stebnev A.V., Zadkov D.A., Gabov V.V., Mukhortikov S.G.* 2017 Analysis of operation of powered longwall systems in mines of SUEK-Kuzbass *Eurasian mining* 2 28.
7. *Стебнев А.В., Габов В.В., Королев А.И.* Анализ и оценка устойчивости режимов работы очистного механизированного комплекса / Горное оборудование и электромеханика, 2018. №1(135). С. 37-40.
8. *Клишин В.И., Ройтер М., Кисслинг У., Вессель А.О.* Система автоматического управления крепью (САУК) как средство адаптации крепи к различным горно-геоллогическим условиям шахт Кузбасса / Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2014. Вып. № 1(101).
9. *Клишин В.И., Матвиец Ю.В.* Повышение адаптации однорядной механизированной крепи к условиям нагружения / ИГД СО РАН. г. Новосибирск, 9/XI 1992.
10. *Buevich V.V., Gabov V.V., Zadkov D.A., Vasileva P.A.* 2015 Adaptation of the mechanized roof support to changeable rock pressure *Eurasian mining* 2 11-14.
11. *Буевич В.В.* Адаптация секции механизированной крепи совершенствованием механической характеристики гидропривода ее гидростоек / В.В. Габов, Н.В. Бабырь, Д.А. Задков, А.В. Стебнев // Горное оборудование и электромеханика, 2016. №3(121). С. 28-34.
12. *Буевич В.В.* Статически адаптируемая секция крепи механизированного комплекса / В.В. Буевич, В.В. Габов, Д.А. Задков, О.В. Кабанов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования, 2014. Т.1. №1. С. 66-70.
13. Патент на полезную модель. 169381 Российская Федерация, МПК E21D 23/04, E21D 23/06. Секция механизированной крепи с направляющей и опорной балками / Габов В.В., Задков Д.А., Буевич В.В., Бабырь Н.В., Стебнев А.В.: патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». − № 2016142172; заявл. 26.10.2016; опубл. 16.03.2017, бюл. № 8.
14. Патент на полезную модель. 173403 Российская Федерация, МПК E21D 23/04. Секция

гидрофицированной крепи с телескопическим перекрытием / Габов В.В., Стебнев А.В., Задков Д.А., Бабырь Н.В.: патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». − № 2017115109; заявл. 27.04.2017; опубл. 25.08.2017, Бюл. №24.
15. Патент на полезную модель. 176896 Российская Федерация, МПК E21D 23/04. Секция механизированной крепи с телескопическими основанием и перекрытием / Габов В.В., Морозов В.А., Стебнев А.В.: патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». − № 2017133717 ; заявл. 27.11.2017; опубл. 01.02.2018, Бюл. №4.

УДК 622.271.

ГОРЕЛИКОВ В.Г.,
ЛЫКОВ Ю.В.
Санкт-Петербургский горный университет
УСПЕХОВ А.М.
ФКУ УПРДОР «Москва-Нижний Новгород»

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СЪЕМНЫХ КОЛОНКОВЫХ СНАРЯДОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В МОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Аннотация. Рассмотрены вопросы разработки бурового оборудования (горных машин) для строительства скважин в сложных геолого-технических условиях.
С этой целью изготовлен и опробован в лабораторных условиях макет колонкового набора для бурения скважин с одновременным креплением ствола скважины колонной обсадных труб. Для бурения и передачи вращения от бурового станка на съемный инструмент используется обсадная колонна, составленная из труб диаметром 73 мм. Диаметр съемной коронки составлял 76 мм, что обеспечивало расширение ствола скважины под колонну обсадных труб.

Ключевые слова: горная порода, обрушение, скважина, съемные сектора, пилот-коронка, обсадные трубы, узлы макета.

GORELIKOV V.G.,
LYKOV Yu.V.
Saint-Petersburg Mining University
USPEKHOV A.M.
FKU UPRDOR «Moskva-Nizhny Novgorod»

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF REMOVABLE CORE TOOLS FOR DRILLING WELLS IN MORAINE DEPOSITS

Abstract. The development of drilling equipment (mining machines) for well construction in difficult geological and technical conditions are considered.
For this purpose, a prototype of a core set for casing while drilling wells was manufactured and tested in laboratory conditions. For drilling and transferring rotation from the drilling rig to the detachable tool, a casing composed of pipes with a diameter of 73 mm is used. The diameter of the removable crown was 76 mm, which ensured the expansion of the wellbore under the casing string.

Key words: rock, caving, well, removable sectors, pilot crown, casing pipes, layout units.

При строительстве геологоразведочных скважин достаточно сложным и трудоемким процессом является бурение моренных отложений. Сложность бурения объясняется склонностью составляющих пород к оползанию, наличием валунно-галечных включений, сильной обводненности и т.д. Из-за неустойчивости пород, слагающих моренные отложения, довольно часто происходит сужение или обрушение ствола скважины, приходится неоднократно перебуривать и расширять зауженный ствол скважины. По этой же причине не всегда удается закрепить ствол скважины колонной обсадных труб. В практике бурения иногда время на проходку и крепление моренной толщи может составлять до 50% от общего времени на строительство скважины. Начальный диаметр бурения может составлять 151 мм и более. В таких случаях

получается сложная конструкция верхней части скважины, из-за чего приходится ограничивать частоту вращения бурового снаряда при дальнейшем бурении по коренным породам. Это, в свою очередь, это ведет к увеличению общего времени на строительства скважины. В практике отечественного и зарубежного бурения геологоразведочных скважин в таких сложных условиях применяются специальные методы бурения, например, бурение с использованием «ходовой» колонны и др. [1, 2, 3]. Однако эти методы не унифицированы и не всегда эффективны.

Исходя из этого возникает задача разработки эффективных методов и технических средств для бурения скважин в сложных геолого-технических условиях (в горных породах, склонных к оползанию, с наличием валунно-галечных включений, сильной обводненности и т.д.).

На первой стадии исследований и разработки съемных колонковых снарядов для бурения в моренных отложениях были апробированы результаты, полученные при анализе существующих конструкций съемного инструмента и установления их влияния на работоспособность в сложных геолого-технических условиях. С этой целью были рассмотрены съемные секторные коронки в зависимости от конструктивного исполнения: секторные; секторно-пилотные; неразъемные (цельнокорпусные) [2, 4]. Наиболее эффективными оказались секторно-пилотные съемные коронки. Исходя из этого, был изготовлен макет колонкового набора для бурения скважин с одновременным креплением ствола колонной обсадных труб. Принцип работы колонкового набора заключается в следующем. Для бурения и передачи вращения на съемный инструмент используется обсадная колонна, составленная из труб диаметром 73 мм. В нижней части обсадной колонны устанавливается съемный колонковый набор. Колонковый набор опускается в колонну обсадных труб и извлекается из нее с помощью овершота и лебедки для буровых снарядов ССК. Диаметр съемной коронки составлял 76 мм, что обеспечивает расширение ствола скважины под колонну обсадных труб. При спуске колонкового набора съемные сектора идут с небольшим опережением по отношению к пилот-коронке, После установки колонкового набора пилот-коронка занимает опережающее положение по отношению к съемным секторам (рис. 1). Основными узлами макета являлись: нижняя (обсадная) труба 1, узел ориентатор и узел передачи крутящего момента (на рис. 1 не показаны), керноприемник с запирающей втулкой 5, цанги 2 со съемными секторами 3, пилот-коронка 4.

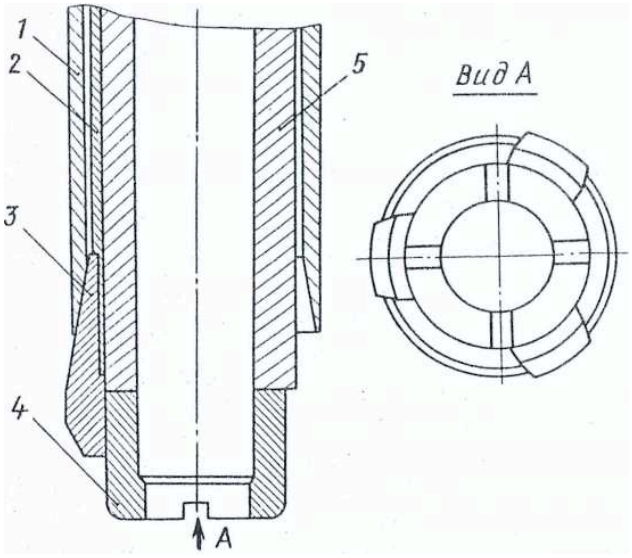


Рисунок 1 – Конструкция нижнего узла колонкового набора:
1 – нижняя труба; 2 – цанга; 3 – съемный сектор;
4 – съемная пилот-коронка; 5 – запирающая втулка

Конструкции съемных пилот-коронки и секторов показаны на рис.2.

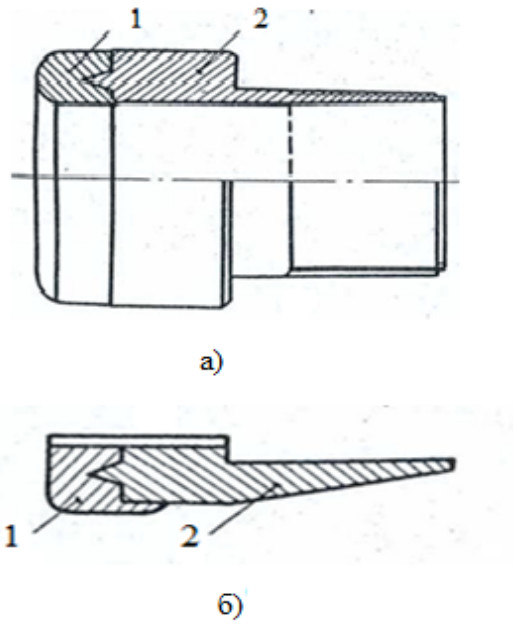


Рисунок 2 – Конструкции съемных пилот-коронки (а) и секторов (б):
1 – матрица, 2 – корпус

Пилот-коронка состоит из матрицы 1 и корпуса 2, в хвостовой части которого выполнена наружная резьба. Съемный сектор состоит из матрицы 1 и корпуса 2. Внутренняя поверхность съемного сектора соответствует наружной поверхности корпуса пилот-коронки, что обеспечивает плотное прилегание сектора к корпусу пилот-коронки.

Техническая характеристика колонкового набора представлена в табл. 1.

Таблица 1.

Основные параметры съемного колонкового набора

Наименование параметра	Величина параметра
Диаметр бурения, мм	76
Наружный диаметр обсадных труб, мм	73
Диаметр пилот-коронки, мм:	
- наружный	59
- внутренний	31

В результате исследований в стендовых условиях при отладке и регулировке съемного породоразрушающего инструмента для колонкового набора выявлены основные отказы и их причины (табл. 2).

Дальнейшая доработка съемного колонкового набора для бурения скважин в моренных отложениях с одновременным креплением ствола колонной обсадных труб ведется в направлении устранения выявленных недостатков.

Таблица 2.

Основные отказы при исследованиях в лабораторных условиях

Вид отказа	Описание отказа	Отказавшая деталь	Причина отказа
Инструмент не выходит из обсадной трубы	При спуске керноприемной части пилот- коронка «догоняет» сектора и расклинивает их в обсадной трубе колонкового набора, не позволяя им занять рабочее положение	Ориентатор	Неравномерная скорость движения секторов и пилот-коронки
Неплотное прилегание съемных секторов к пилотной части	Пилотная часть коронки не распирает сектора под обсадной трубой	Съемные сектора	Большая длина выхода секторов, наличие люфта при креплении секторов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев Н.Л.* Технология бурения обсадными трубами интервалов многолетнемерзлых горных пород//Наука и техника в газовой промышлен-ности. – М: Газпром Экспо, 2010. №4. С. 6–11.

2. *Горшков Л.К.* Классификация методов бурения с одновременным креплением скважины обсадными трубами / Л.К. Горшков, В.Г. Гореликов, А.М. Успехов. – СПб., Экология и развитие общества, 2019. №1(28). С. 36–39.

3. *Гореликов В.Г.* Классификация осадочных пород и выбор способа их бурения / В.Г. Гореликов, А.М. Успехов, Л.А. Басова / Бурение скважин в осложненных условиях: III Международная научно-практическая конферен-ция 8-9 ноября 2018 г.: Тезисы докладов. – СПб.:, СПГУ, 2018. С. 27–28.

4. *Ненков Д.Н.* Система за едновременно сондиране и обсаждане / ӨРӨМДЛӨГ-2019. Олон улсын эрдэм шинжилгээ, онол практикийн XXI хурлын илтгэлүүдийн эмхэтгэл. – УБ, 2019. № 1/21. С. 137–140.

УДК 622.232.72

ЕЛИХИН А.С.,
ЗАДКОВ Д.А.,
ГАБОВ В.В.
Санкт-Петербургский горный университет

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОУДАРНИКОВ В СОСТАВЕ УНИФИЦИРОВАННОГО ВЫЕМОЧНОГО МОДУЛЯ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К НЕМУ

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения исполнительных органов ударного действия в составе выемочных модулей. Дается оценка степеней подвижности исполнительного органа. Приводятся требования к выемочным модулям с исполнительным органом статико-динамического действия.

Ключевые слова: уголь, забой, избирательная технология, производительность, удельные затраты энергии, выемочный модуль, гидроударник, скалыватель, статико-динамический исполнительный орган.

ELIKHIN A.S.,
ZADKOV D.A.,
GABOV V.V.
Saint-Petersburg mining University

PROSPECTS OF APPLICATION OF HYDROGENICS IN THE UNIFIED EXCAVATION MODULE AND THE BASIC REQUIREMENTS FOR IT

Annotation. The article analyzes the possibility of using the shock action operating members as part of the excavation modules. Also in the article are given assessment of mobility of the operating member and requirements for excavation modules with combined static-dynamic operating member.

Keywords: coal, face, selective technology, productivity, relative energy costs, excavation module, hydrogenic, cleaver, combined static-dynamic operating member**.**

На сегодняшний день в технологии подземной добычи угля предпочтение отдаётся применению и совершенствованию комбайновых и струговых комплексов для длинных забоев, обеспечивающей наибольшую интенсивность добычи, но практически нет специальной техники для отработки целиков и малых участков полей относимых к некондиционным запасам.

Совершенствование технологии и техники подземной добычи угля решалось на каждом этапе их развития и сводилось по существу к следующему:

− повышение безопасности горных работ;

− повышение производительности горно-выемочных машин;

− улучшение качества добываемого угля по гранулометрическому составу и зольности.

Актуальность перечисленных задач сохранятся и в настоящее время.

Современные комбайны и струги отличаются надёжностью и технологичностью, обеспечивают отработку угольных пластов длинными очистными забоями с необходимой интенсивностью [1] и, по мнению многих специалистов [2, 3], на ближайшее будущее им

альтернативы не предвидится. В тоже время, при сложных горно-геологических условиях интенсивность и устойчивость технологического процесса значительно снижаются [4, 5, 6]. Существует необходимость поиска более эффективных способов и создания технических средств отделения угля от массива при подземной добычи угля.

Анализ избирательной технологии и процесса функционирования унифицированных выемочных модулей (УВМ). Избирательная технология при подземной добыче угля реализуется использованием избирательных способов отделения угля от массива, обеспечивающих снижение энергоёмкости процессов отбойки угля, повышение выхода крупных фракций и снижение пылеобразования, тем самым повышая эффективность отделения угля с явно выраженной анизотропией прочностных свойств в следствии их слоистости, трещиноватости и наличия прослоя породы [7-10].

Для решения вопроса уменьшения энергоемкости процесса добычи угля выемочными машинами при наличии ориентированной структуры по напластованию и с учётом прочностной анизотропии угольных пластов следует:

− устанавливать геометрические параметры локальных забоев по длине лавы;

− устанавливать параметры срезов, сколов, их последовательность по мощности пласта в соответствии с его прочностной структурой;

− корректировать способы обработки забоев с изменением параметров зон по мере подвигания забоя по длине столба;

− регулировать технологические режимы работы выемочных машин в соответствии с изменением физико-механических свойств пластов по зонам.

Таким образом, предлагаемый способ отделения угля от массива − избирательный на основе геометрических, кинематических и динамических параметров.

Применение фронтальных комплексов модульного исполнения (КФМ) [11] являются одним их технических средств для перехода к избирательным способам отделения угля от массива, который может быть осуществлен при использовании очистных механизированных комплексов с новой структурой и технологическими возможностями. Так, выемочной машиной в КФМ являются унифицированные выемочные модули (УВМ) [12], предназначенные для фронтальной отработки пластов избирательными способами как длинными, так и короткими забоями. УВМ могут оснащаться исполнительными органами статического и статико-динамического действия.

Каждый выемочный модуль, независимо от того, к какой классификационной группе он относится можно разделить по выполняемым функциям на три части: механизм резания, механизм позиционирования и опорную базу [13].

Особенностью КФМ является возможность установки исполнительного органа как на каждой секции механизированной крепи, так и через секцию, или на специальной базе. Такие УВМ могут осуществлять отделение угля от массива с толщинами среза от 80мм до 300мм [12]. Опора на секции механизированной крепи и использование гидропривода обеспечивают устойчивость режимов работы УВМ при передаче значительных по величине сил скалывания (в случае присечки породы). В отличие от электромеханических систем в гидравлической системе УВМ стопорные режимы работы не являются аварийными.

Производительность фронтальных модульных комплексов прямо пропорциональна количеству одновременно работающих выемочных модулей в комплексе. Модульная компоновка позволяет применять их не только в длинных очистных забоях с высокой интенсивностью очистных работ, но и в камерах, при отработке целиков или некондиционных запасов в сложных горно-геологических условиях.

Анализ исполнительных органов ударного действия и перспективы их применения в УВМ. Известны стреловые проходческие машины с исполнительными органами ударного действия [14, 15].

На рис. 1 стрела-манипулятор с ударным устройством [15], которая представляет собой исполнительный орган подвесной проходческой машины «Лэманд Оверарм

Импактор», конструкция и параметры которого определяют форму сечения и максимальные размеры проводимой выработки, эффективность разрушения горного массива и производительности машины.

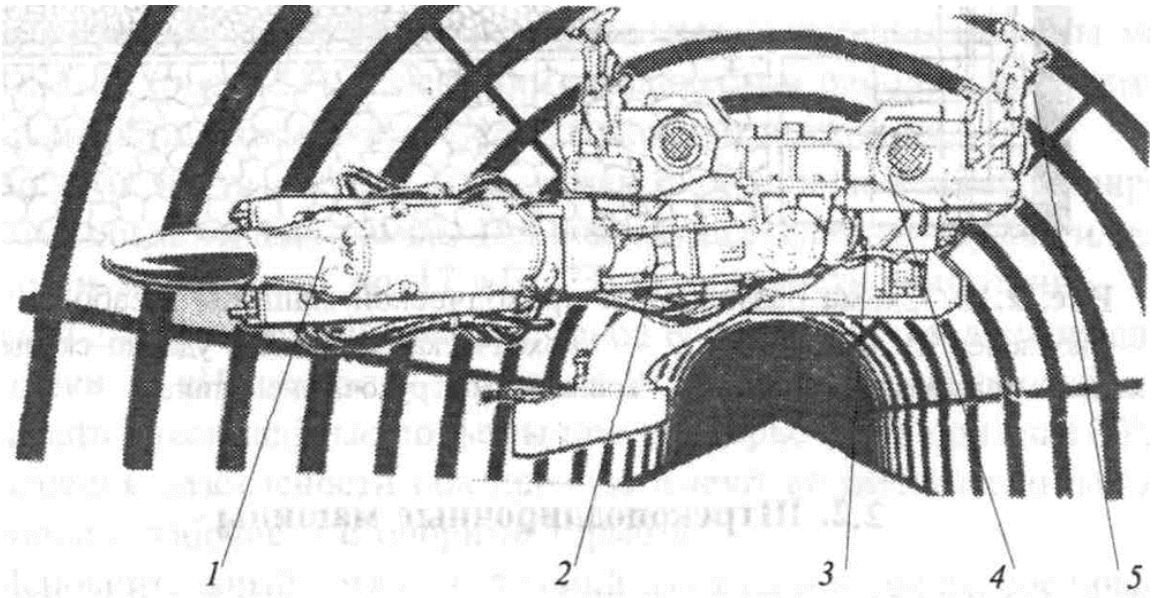


Рисунок 1 - Подвесная проходческая машина фирмы «Макол» и «Шенд»:
1 – гидроударник; 2 – стрела; 3 – каретка; 4 – распорно-шагающий механизм; 5 – рельсы

Стрела-манипулятор обеспечивает перемещение гидроударника по всему сечению выработки и поджатие инструмента к забою. Конструкция манипулятора зависит от типа опорного устройства (ходовой части) и количества реализуемых перемещений (степеней подвижности) ударного механизма. Манипулятор с большим количеством степеней подвижности позволяет реализовать более рациональные параметры разрушения (ширину скалываемого слоя, шаг приложения ударной нагрузки, угол установки инструмента к забою и другое). С другой стороны, каждая дополнительная степень подвижности связана с усложнением конструкции манипулятора и системы управления. Созданные стрелы-манипуляторы обеспечивают до семи перемещений, а именно: поворот стрелы в обе стороны; подъем и опускание стрелы; телескопическое выдвижение; вращение ударного устройства вокруг оси стрелы; опускание ударного устройства; поворот ударного устройства в обе стороны; подача ударного устройства на забой.

Современные системы управления обеспечивают выполнение нескольких движений манипулятора одновременно, что позволяет машинисту рационально использовать технологическое время машины для разрушения забоя.

Применение стрелы манипулятора с блоком статических скалывателей и гидроударников является перспективным техническим решением для исполнительного органа УВМ. Помимо статического воздействия, ударники оказывают динамическое воздействия на наиболее крепкие участки угольного пласта [16]. По аналогии с штрекоподдирочными машинами у которых в исполнительный орган (в днище ковша) встроены ударные механизмы [14]. Включение ударных механизмов этих машин происходит автоматически при создании на пике необходимого напорного усилия с реализацией энергии удара. Таким образом, способ разрушающего воздействия на массив породоразрушающим инструментом УВМ должен соответствовать крепости разрушаемого массива: статический (резание, вдавливание) − для слабых и средней крепости пород, ударный − для крепких пород или комбинированный для пород средней и выше средней крепости. Если усилие меньше предельного, то ударники не включаются, при попадании на породную прослойку усилие достигает предельного значения и включаются ударники.

На основании выше изложенного были сформулированы требования к выемочным модулям с исполнительными органами статико-динамического действия:

1. При выборе ударного устройства предпочтение следует отдать гидравлическим машинам;
2. Механизм перемещения стрелы должен обеспечивать позиционирование исполнительного органа в любой точке забоя и обеспечивать поджатие рабочего инструмента;
3. Простота и надежность для обеспечение основных и вспомогательных функций;
4. Исполнительный орган должен обеспечивать статические, статико-динамическое и динамическое силовое воздействие на разрушаемый массив;
5. Вся конструкция исполнительного органа должна быть компактной и не загромождать призабойное пространство, обеспечивать безопасность работ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peng S.S.* Longwall Mining, 2nd edition, October 2006, 621 p.
2. *Линник Ю.Н., Крашкин И.С., Мерзляков В.Г. и др.* Концепция развития очистного, проходческого, конвейерного и бурового оборудования на период до 2020 г. - М.: Горные машины и автоматика, 2006. №2. С. 2-12.
3. *Коровкин Ю.А.* Механизированные крепи очистных забоев / Под ред. Ю.Л. Худина. – М.: Недра, 1990. – 412 с.
4. *Stebnev A.V., Mukhortikov S.G., Zadkov D.A., Gabov V.V.* 2017 Analysis of operation of powered longwall systems in mines of SUEK-Kuzbass *Eurasian mining* 2 28-32.
5. *Стебнев А.В., Мухортиков С.Г., Задков Д.А.* Анализ работы очистных механизированных комплексов в условиях шахт АО «СУЭК-Кузбасс» / Сборник трудов научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017». – СПб.: СПГУ, 2017. С. 84-89.
6. *СтебневА.В., Габов В.В., Королев А.И.* Анализ и оценка устойчивости режимов работы очистного механизированного комплекса / Горное оборудование и электромеханика, 2018. №1(135). С. 37-40.
7. *Задков Д.А.* Актуальность и перспективность избирательных способов отделения угля от массива / Д.А. Задков, В.В. Габов, С.Г. Мухортиков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2018. № S48. С. 387-397.
8. *Габов В.В.* Актуальность избирательной добычи угля / В.В. Габов, Д.А. Задков, А.С. Елихин // В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции. Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой, 2019. С. 42-46.
9. *Габов В.В.* Повышение эффективности процесса добычи с освоением избирательных способов отделения угля от массива / В.В. Габов, Д.А.Задков, Ю.В. Лыков // Инновации на транспорте и в машиностроении. Сборник трудов IV международной научно-практической конференции. Отв. ред. В.В. Габов, Н.С. Голиков, 2016. С. 12-15.
10. *Задков Д.А.* Способ отделения угля от массива при отработке трещиновато-слоистых угольных пластов / Д.А. Задков, А.А. Банников, Д.И. Шишлянников, К.П. Талеров и др. // Горное оборудование и электромеханика, 2012. № 2. С. 30-33.
11. *Габов В.В.* Актуальность и перспективы применения очистных и проходческих модульных комплексов / В.В. Габов, Д.А. Задков, К.П. Талеров, В.П. Хозяинов // Народное хозяйство Республики Коми, 2011. № 1. С. 59.
12. *Gabov V.V. , Zadkov D.A.* 2016 Energy-saving modular units for selective coal cutting *Eurasian mining* 1 37-40.
13. *Габов В.В.* Обоснование структуры и параметров модуля для добычи угля / В.В. Габов, А.С. Елихин, Д.А. Задков, Н.С. Голиков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2019. № S15. С. 3-12.

14. *Ушаков Л.С., Котылев Ю.Е. Кравченко В.А.* Гидравлические машины ударного действия. − М.: Машиностроение, 2000. - 416 с.
15. *Шрайман А.А., Заяц И.Е.* Опыт применения проходческих машин с ударными рабочими органами за рубежом: Экспресс-информация. − М.: ЦНИЭИуголь, 1978. − 14с.
16. *Кустриков Э.В., Габов В.В., Задков Д.А.* Особенности конструкции и технологии работы унифицированного выемочного модуля для добычи калийной руды / Современные проблемы науки и образования, 2015. №1-2.

УДК 622.331:553.04:622.271.9

ЗЮЗИН Б.Ф.,
ЖИГУЛЬСКАЯ А.И.,
ЯКОНОВСКАЯ Т.Б.
Тверской государственный технический университет
МИХАЙЛОВ А.В.
Санкт-Петербургский горный университет

ИНВАРИАНТЫ ДИСТОРТНОСТИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Аннотация. Показаны геометрические модели для представления предельных состояний и определения инвариантов дистортности при деформировании материалов.

Ключевые слова: инварианты дистортности, предельные состояния, паспорт прочности, сцепление, угол внутреннего трения.

ZYUZIN B.F.,
ZHIGULSKAYA A.I.,
YAKONOVSKAYA T.B.
Tver State Technical University
MIKHAILOV A.V.
Saint-Petersburg Mining University

DISTORTION INVARIANTS DURING DEFORMATION ROCKS

Abstract. Geometrical models are shown for representing limiting states and determining the invariance of distortion during deformation of materials.

Keywords: distortion invariants, limit states, strength passport, adhesion, angle of internal friction.

В работах [1–9] показана важность определения инвариантов предельных состояний. Вопрос о распределении напряжений и деформаций в грунтах, почвах и аналогичных материалах при различных видах их загрузки представляет существенный интерес для весьма различных дисциплин. Кроме строительного дела, где значение этого вопроса бесспорно, можно назвать еще дорожное дело, агротехнику и агромеханику, гидротехнику, горное дело, подземные работы, фортификацию и ряд других областей. Главное затруднение при изучении опытного материала состоит в трудности его исчерпывающего истолкования с теоретической точки зрения. В работе [11] изложены основы построения теории оценки инвариантов предельных состояний в геомеханике.

Предельное напряженное состояние, или предельное равновесие, – это условие начала еще не возникших деформаций микроразрушений в грунте. В качестве основного условия предельного состояния или условия прочности для органоминеральных грунтов наиболее широко применяют условие Кулона-Мора [10]. Критерий прочности Кулона-Мора представляет собой билинейную зависимость касательных напряжений материала от величины приложенных нормальных напряжений.

Эта зависимость представляет собой «паспорт прочности»:

$$\tau = C_0 + \sigma tg(\varphi),$$

где τ – величина инварианта касательных напряжений; σ – величина инварианта нормальных напряжений; C_0 – величина инварианта сцепления.

Соотношение главных напряжений определено зависимостью:

$$\sigma_3/\sigma_1 = tg^2(\pi/4 - \varphi/2).$$

Отношение сопротивлению растяжению – σ_3 к сопротивления сжатию – σ_1 равно критическому отношению главных напряжений $П_{К(Л)} = \sigma_3/\sigma_1$. Это отношение не зависит от значения сцепления – C_0, т.е. является чистой функцией угла внутреннего трения – φ. Полученное выражение аналогична двумерной задаче о предельном состоянии, где β,γ – соответственно углы площадок скольжения; φ – угол внутреннего трения.

Достоинством такого подхода является возможность представления напряженно-деформированного состояния для различных материалов на основании обобщенной диаграммы Мора (рис. 1).

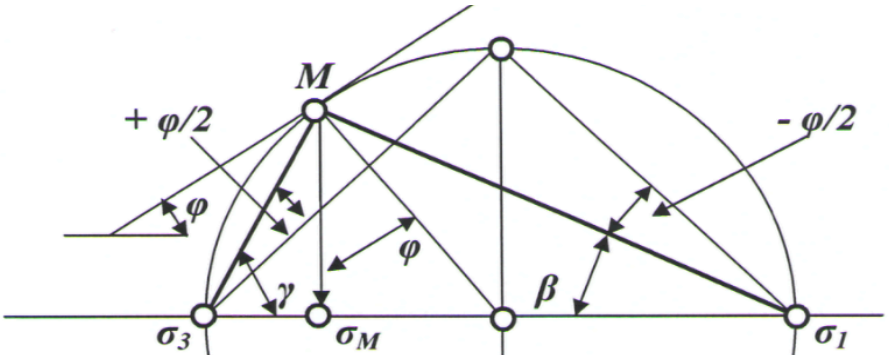


Рисунок 1 – Схема предельного состояния грунтов по теории Кулона-Мора

Оценку закономерностей деформационных процессов удобней производить в инвариантной форме, для этого экспериментальные деформационные диаграммы представляются в приведенной системе координат [6].

На рис. 2 приведена схема приведенного квадрата, где показана геометрическая связь угла внутреннего трения с положением критериальной точки $A[X_A, У_A]$ – параметра оценки уровня функциональной нелинейности [1], что позволяет установить следующую связь:

$$\varphi = 2\ arctg\ (1 - 2X_A) = 2\ arctg\ (П_{К(Л)}).$$

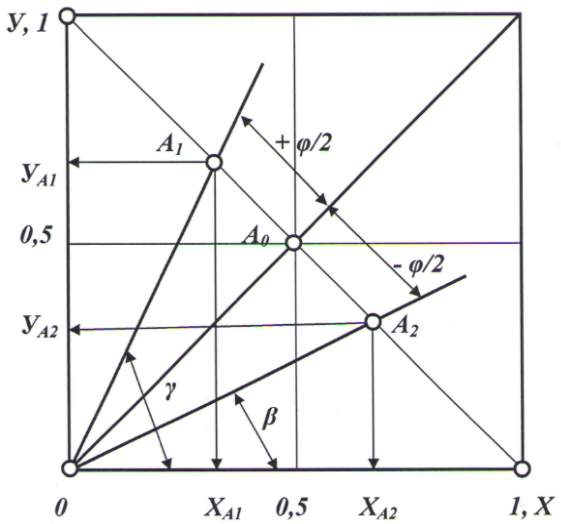


Рисунок 2 – Схема углов на площадках скольжения в приведенном квадрате

Здесь можно установить соотношение углов площадок скольжения

$$\varphi = \gamma - \beta.$$

Отсюда следует вывод о физической сущности угла внутреннего трения: угол внутреннего трения φ – это параметр функциональной нелинейности материалов [7].

Поверхности скольжения образуют с направлением большего главного напряжения угол β – независимо от значения сцепления.

Тот факт, что положение поверхностей скольжения не зависит от величины всестороннего внутреннего давления (C_0 – сцепления), дает нам еще одно средство для оценки величины φ – угла внутреннего трения материала с помощью испытания на сжатие и растяжение. Например, чтобы получить значение φ – угла внутреннего трения для определенного сорта песка, было бы необходимо ввести между песчаными зернами связующее средство, которое само обладает нулевым внутренним трением. Таким связующим средством является вода. Связующая сила ее – C_0, во всяком случае, очень мала, она определяется капиллярным давлением. Мы приходим, таким образом, к опытам Буисмана [11]. Буисман нашел для влажных песчаных призм при различной степени увлажнения приблизительно $П_{К(Л)} = 1/4$, при этом имеем:

$$\sin\varphi = (1 - П_{К(Л)})/(1 + П_{К(Л)}) = (1 - ¼)/(1 + ¼) = 0{,}6.$$

Значение угла внутреннего трения равно $\varphi = 36{,}87°$, которое приводит к углу скольжения $\beta = 26{,}56°$. Угол, образуемый плоскостью обрушения с осью призмы, должен, поэтому составлять $\gamma = 63{,}43°$. Приблизительно такой же угол наклона был установлен экспериментально [11].

В естественных природных состояниях для скальных крепких пород угол внутреннего трения $\varphi = 37°…36°$ соответствует предельному значению инварианта сцепления**.** По мере снижения крепости скальных пород снижается и значение угла внутреннего трения $\varphi = 33…30°$**.** Для глинистых грунтов четвертичных отложений $\varphi = 30°…17°$ в зависимости от их консистенций.

Для торфов естественной структуры $\varphi = 25°…15°$ в зависимости от вида торфа и исходной влажности. Угол внутреннего трения φ для различных видов нескальных грунтов колеблется в следующих пределах: песчаных $25°–43°$; пылевато-глинистых $7°–30°$**.** Угол внутреннего трениягрунта также зависит от коэффициента пористости. Коэффициент пористости изменяется от нуля (поры отсутствуют) до бесконечности. Чем меньше коэффициент пористости, тем больше угол внутреннего трения. Угол внутреннего трения характеризует трение между частицами грунта и в большей степени зависит от величины вертикального давления на грунт.

Под сцеплением C_0 понимается сопротивление структурных связей всякому перемещению связываемых ими частиц грунта. Сцепление присуще пылевато-глинистым грунтам. Сопротивление сдвигу нескальных грунтов определяется силами трения и сцепления, величины которых зависят от вида грунта и его влажности.

Для построения, приближенного «паспорта прочности», вводят две численные характеристики условной прочности: угол внутреннего трения φ и сцепление C_0.

При этом с увеличением нагрузок «паспорта прочности» указывает [7, 12] на возрастающее влияние трения при сдвижении горных пород и на уменьшающееся влияние сцепления C_0. Под действием внешней нагрузки в отдельных точках массива грунта эффективные напряжения могут превзойти внутренние связи между частицами грунта, что вызывает скольжение или сдвиги на площадках. Это отражает проявления трения, которое либо препятствует разделению тела на части, либо характеризует дополнительную прочность.

В связных грунтах имеет место как вязкие, так и водно-коллоидные связи. Разделить эти сопротивления часто не представляется возможным.

Если $\varphi = 0$, критерий прочности Кулона-Мора превращается вкритерий Треска. Если же $\varphi = 90°$, то критерий прочности Кулона-Мора соответствует модели вязкой среды.

Таким образом, «паспорт прочности» устанавливает взаимосвязь определяющих параметров напряженно-деформированных состояний – σ и τ**,** возникающих в точке среды при взаимодействии рабочих органов горных машин с грунтами и горными породами с учетом их физико-механических характеристик – C_0 и φ. На основании «паспорта

прочности» решаются основные задачи при проектировании исполнительных рабочих органов горных машин для разработки торфяных месторождений:

- энергетическая задача устанавливает оценку потребляемых энергозатрат для выполнения заданной производительности горной машины для разработки торфяных месторождений;

- силовая задача позволяет определить возникающие усилия на элементах исполнительных рабочих органов горных, необходимые для проведения их силовых – прочностных расчетов с учетом статических динамических режимов их работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Миронов В.А.* Введение в дистортность / В.А. Миронов, Б.Ф. Зюзин, В.Н. Лотов // Монография. - Тверь: ТвГТУ, 1994. - 160 с.
2. *Миронов В.А.* Дистортность в механике горных пород / В.А. Миронов, Б.Ф. Зюзин, В.Н Лотов // Монография. - Тверь: ТвГТУ, 1995. – 196 с.
3. *Миронов В.А.* Дистортность в естествознании / В.А. Миронов, Б.Ф. Зюзин, В.Н Лотов // Монография. - Тверь: ТвГТУ, 1996. - 160 с.
4. *Миронов В.А.* Дистортность в природных системах / В.А. Миронов, Б.Ф. Зюзин, В.Н Лотов, А.А. Терентьев // Монография. - Минск: Беларуская навука, 1997. - 415 с.
5. *Богатов Б.А.* Прогнозирование предельных состояний в нелинейной геомеханике / Б.А. Богатов, В.А. Миронов, Б.Ф. Зюзин, В.Н Лотов // Монография. - Минск: ОО Белорусская горная академия, 2000. - 340 с.
6. *Миронов В.А.* Инварианты дистортности / В.А. Миронов, Б.Ф. Зюзин // Монография. - Тверь: ТвГТУ, 2015. - 168 с.
7. Предельное состояние деформированных тел и горных пород. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 832 с.
8. *Шемякин Е.И.* Об инвариантах напряженного и деформированного состояния в математических моделях механики сплошной среды / Современные проблемы прочности, пластичности и устойчивости: сборник статей к 75-летию со дня рождения В.Г. Зубчанинова, под ред. Е.И. Шемякина и Д.Д. Ивлева. - Тверь: ТвГТУ, 2007. С. 42–46.
9. *Coulomb C. Essai de* 1773. Offert par le Comite. Francals de Mecanigue les Solret des Fondations. Paris, 1973.
10. Buisman: “De drukverdeeling in bouwgrond …” De Ingeniur, 1932, №37.
11. *Зюзин Б.Ф.* Дистортность – естественнонаучная теория / Б.Ф. Зюзин, В.А. Миронов // Монография. - Тверь: ТвГТУ, 2019. - 176 с.

УДК 622.331:553.04:622.271.9

ЗЮЗИН Б.Ф.,
ЖИГУЛЬСКАЯ А.И.,
ЯКОНОВСКАЯ Т.Б.
Тверской государственный технический университет
МИХАЙЛОВ А.В.
Санкт-Петербургский горный университет

ЭНТРОПИЯ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Рассмотрена задача деформирования стержня в изотермических условиях. Дано физическое представление величины энтропии. Показана связь энтропии с углом внутреннего трения материала.

Ключевые слова: энтропия, паспорт прочности, сцепление, угол внутреннего трения.

ZYUZIN B.F.,
ZHIGULSKAYA A.I.,
YAKONOVSKAYA T.B.
Tver State Technical University
MIKHAILOV A.V.
Saint-Petersburg Mining University

ENTROPY AT THE DEFORMATION OF MATERIALS

Abstract. The problem of rod deformation under isothermal conditions is considered. A physical representation of the magnitude of entropy is given. The relationship of entropy with the angle of internal friction of the material is shown.

Keywords: entropy, strength certificate, adhesion, angle of internal friction.

Различные природные объекты объединяют инвариантыих предельных состояний, как некий физический принцип гармонии развития [1].

Простые геометрические образы могут служить универсальными моделями отражения структурных преобразований [2]. При этом нестабильность, неустойчивость и неоднородность структуры самой системы, так же является причиной ее эволюции [3].

Мерой упорядоченности состоянияструктурной системы может быть энтропия [4–6]. Физическое представление величины энтропииможно определить исходя из рассмотрения рассеивания энергии при необратимых деформациях. В динамике известное уравнение Лагранжа 2-го рода равно числу степеней свободы механической системы, т.е. число уравнений состояния равно числу независимых переменных.

При этом энтропия $\boldsymbol{S}$ играет роль потенциальной функции, а ее возникновение $\boldsymbol{\sigma_S}$ – диссипативной (функции рассеивания). Рассеивание энергии происходит как при возникновении пластических, так и при вязком течении материала. В первом случае внутреннее трение пропорционально величине деформации и называется сухим, или кулоновым. Во втором случае диссипация названа вязкостью и пропорциональна скорости деформации (жидкостное трение). Обычно в реальных телах диссипация энергии существует в обеих формах.Рассмотрим величину напряжения, которое возникает в зажатом по длине стержне ($\boldsymbol{L = const}$), например, при изменении температуры на $\boldsymbol{1}^{\circ}C$ [7, 8].

Эта величина представляет собой температурный коэффициент, которыйлегко

замерить, и численно она равна изменению энтропии при деформировании в изотермических условиях. На рис. 1 показан график зависимости напряжения – ***p*** от температуры – ***T*** при постоянной длине ***L.***

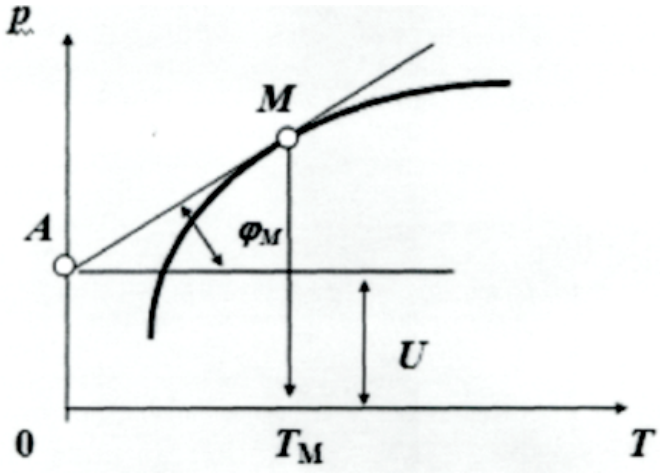


Рисунок 1 – График зависимости напряжения от температуры при постоянной длине образца

Тангенс угла наклона касательной к этой кривой в некоторой точке ***M*** равен энтропии $tg\varphi_M = S$ при изотермической деформации с температурой T_M, т.е. энтропияхарактеризуется первой производной функции изменения напряжения. Отрезок ***OA*** определяет изменение внутренней энергии при единичной деформации. Кривые, подобные изображенным на рис. 1, позволяют судить о соотношении между внутренней энергией – ***U*** и энтропией – ***S,*** включая их изменении в процессе деформирования. Здесь прослеживается аналогия с «паспортом прочности» материалов [1], для которых внутренняя энергия ассоциируется с сцеплением материала, а параметр φ_M в выражении для энтропии фактически является углом внутреннего трения [1].

Тогда выражение для «паспорта прочности» можно представить следующим образом:

$$\tau = C_0 + \sigma tg(\varphi) \text{ или } \tau = U + \sigma S,$$

где τ – величина инварианта касательных напряжений; σ_3 – величина инварианта нормальных напряжений; C_0 – величина инварианта сцепления.

Если график зависимости изображается прямой линией, то ни внутренняя энергия ***U***, ни энтропия ***S*** не зависят от температуры ***T*** (определяющего параметра деформирования структурной системы). Если же прямая линия проходит через начало координат при $U = 0$, то упругие напряжения в теле возникают только вследствие изменения энтропии. Это характерно для эластических деформаций ε, которые полностью обратимы, но обнаруживают гистерезис при нагрузке и разгрузке (рис. 2).

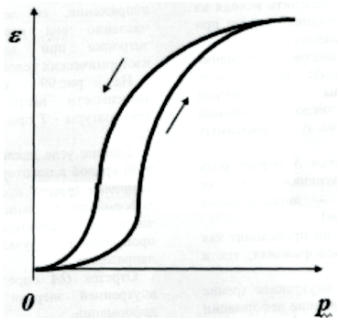


Рисунок 2 – Гистерезис деформации

Энергия, затраченная на прямое деформирование, не равна энергии, выделяемой при обратном деформировании (последняя меньше).

В ходе процесса обратной эластической деформации происходит некоторая необратимая потеря энергии деформирования, поглощаемая материалом. Это может быть объяснено только тем, что при прямой деформации изменение структуры происходит в виде обратимого изменения ориентировки частиц, тогда как у обычных твердых тел упругость связана в первую очередь с изменением внутренней энергии, и при деформации свободная энергия возрастает. У эластических материалов увеличение деформаций сопровождается уменьшением энтропии.

В приведенной системе координат (рис. 3) оценка степени упорядоченности структурной системы (переход от «порядка» к «хаосу») связана с величиной уровня нелинейности X_A [9, 10].

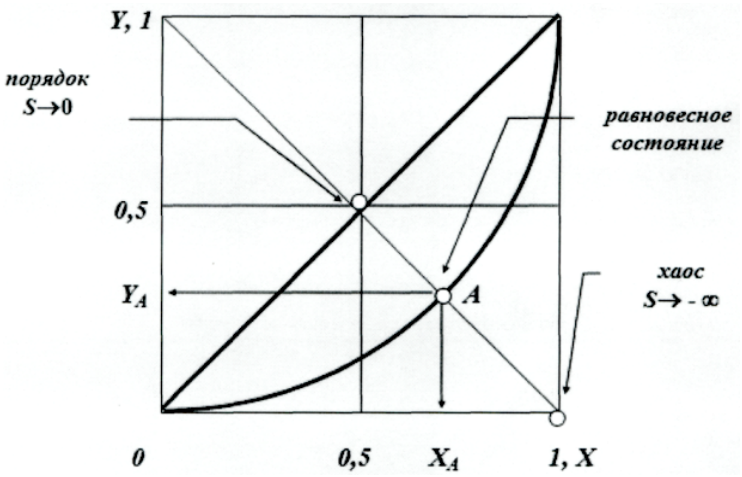


Рисунок 3 – Отображение состояния структурной системы в приведенной системе оценки

Относительное отклонение от состояния «порядка» характеризуется определенным значением параметра напряженно-деформированного состояния среды:

$$\Pi_K = (X_A - 0{,}5)/0{,}5 = 2X_A - 1.$$

Изменение энтропии системы S за счет процессов ее переноса (притока и оттока) может быть, как положительным, так и отрицательным.

Последнее означает, что в открытых и закрытых системах могут возникать и длительное время оставаться неизменными равновесные структуры, которые называют термодинамически самоорганизованными [11].

Таким образом, мы усматриваем очевидную взаимосвязь таких показателей структурно-прочностных свойств материалов, как внутреннее трение, нелинейность их функциональности при деформировании и изменчивостью энтропии структуры материла в процессе воздействия на него.

По мере накопления научной информации о деформационных процессах в полидисперсных средах горных пород формируются новые условия в сфере разработки прогнозирования эффектов, связанных с варьированием концентрационнозависимого напряженно-деформационного состояния структурированных сред в природных объектах, что служит выработке эффективных подходов в решении практических задач экологии и других сфер, где функциональные особенности природных или искусственных композиций имеют сложный характер.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Миронов В.А.* Инварианты дистортности / В.А. Миронов, Б.Ф. Зюзин // Монография. - Тверь: ТвГТУ, 2015. - 168 с.

2. *Миронов В.А.* Дистортность в природных системах / В.А. Миронов, Б.Ф. Зюзин, В.Н. Лотов, А.А. Терентьев // Монография. - Минск: Беларуская навука, 1997. - 415 с.

3. *Зюзин Б.Ф.* Дистортность – естественнонаучная теория/ Б.Ф. Зюзин, В.А. Миронов // Монография. - Тверь: ТвГТУ, 2019. - 176 с.
4. *Зюзин Б.Ф.* Инвариант прочности в теории трещинообразования при взаимодействии рабочих органов горных машин с торфяной залежью / Б.Ф. Зюзин, А.И. Жигульская, С.А. Юдин, М.А. Жигульский // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: Депозитарий изд-ва «Горная книга», 2018. №8. 13 с. № 1144/08-18 от 01.06.2018 г. С. 76.
5. *Зюзин Б.Ф.* Геометрия инвариантов дистортности в геомеханике горных пород / Б.Ф. Зюзин, А.И. Жигульская, С.А. Юдин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: Депозитарий изд-ва «Горная книга», 2019. №1. 5 с. №1166/01-18 от 06.11.2018 г. С. 104.
6. *Зюзин Б.Ф. S*-образная функция потенциала напряженно-деформированного состояния горных пород / Б.Ф. Зюзин, А.И. Жигульская, С.А. Юдин // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: Депозитарий изд-ва «Горная книга», 2019. №1. 9 с. № 1169/01-19 от 06.11.2018г. С. 140.
7. *Шеннон К.* Теория информации и ее приложения. - М.: Физматгиз, 1959. - 354 с.
8. Академик В.М. Глушков – пионер кибернетики. Сост. В.П. Деркач. - К., 2003.
9. *Берже П., Помо И., Видаль К.* Порядок в хаосе. - М.: Мир, 1991. – 368 с.
10. *Шебалин О.Д.* Молекулярная физика. - М.: Выс. шк., 1978.
11. Миронов В.А. Введение в дистортность / В.А. Миронов, Б.Ф. Зюзин, В.Н. Лотов // Монография. - Тверь: ТвГТУ, 1994. - 160 с.
12. *Фридман Я.Б.* Единая теория прочности материалов. - М.: Оборон-гиз, 1943.

УДК 622.331

ИВАНОВА П.В.,
КУВШИНКИН С.Ю.
Санкт-Петербургский горный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭКСКАВАТОРА ПРИ ДОБЫЧЕ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ

Аннотация. Рассмотрены факторы, воздействующие на эффективность эксплуатации экскаватора в частности и комплекса по добыче и переработке торфяного сырья в целом. Предлагается методика прогноза работоспособности экскаватора, как ключевого звена технологического комплекса по добыче и переработке торфяного сырья, и необходимых объемов энергетического сырья с учетом воздействия внешних факторов условий эксплуатации с последующим определением объемов готовой продукции.

Ключевые слова: торфяное месторождение, добыча, работоспособность, экскаватор, комплекс горного оборудования.

IVANOVA P.V.,
KUVSHINKIN S.U.
Saint-Petersburg Mining University

MODELING OF THE PROCESS OF EVALUATING AND PREDICTING THE PRODUCTIVITY OF AN EXCAVATOR IN THE PRODUCTION OF PEAT RAW MATERIALS

Abstract. Factors affecting the efficiency of the excavator and the entire complex for the extraction and processing of peat raw materials are considered . A method for predicting the efficiency of the excavator , as a key element of the technological complex for the extraction and processing of peat raw materials and the necessary amounts of energy with regard to the influence of external factors operating conditions with subsequent determination of the finished product.

Keywords: peat deposit, extraction, performance, mining shovel, complex of mining equipment.

Рост интереса к освоению и добыче энергетических ресурсов в виде торфяного топлива напрямую зависит от современных и перспективных технологий по добыче-переработке, а именно от расширения спектра оборудования и эффективности его эксплуатации. При разработке торфяных месторождений следует отметить существенную зависимость объема добычи от качественной характеристики торфяного месторождения и технологий добычи. Прежде всего, выбор схемного решения технологии разработки торфяных месторождений зависит от множества воздействующих факторов, таких как: характеристики торфяной залежи (влажность, степень разложения, пнистость), горно-геологические условия, характер торфяной поверхности и климатические условия эксплуатации.

В настоящее время наибольшее внимание уделяется экскаваторному способу добычи торфяного сырья, при реализации которого осуществляется выемка торфяного сырья комплексом горного оборудования, взаимосвязанного между собой, отвечающим современным и перспективным эксплуатационным свойствам, таким как – работоспособность, энергоэффективность, автономность, способность круглогодичной эксплуатации. В технологической цепочке по добыче-переработке при данном способе

существенное значение имеет торфяной экскаватор. Для обеспечения необходимого объема добычи торфяной продукции необходимо производить оценку работоспособности комплекса оборудования в целом и экскаватора в частности в конкретных условиях эксплуатации с целью минимизации простоев оборудования и экономических потерь.

Как показывает практика, при эксплуатации экскаваторов в реальных условиях эксплуатации имеет место значительное количество отказов. Простои экскаваторов, связанные с отказами, влекут за собой остановку всей технологической цепи, что приводит к значительным материальным потерям. Существенное влияние на остаточный ресурс при эксплуатации экскаваторов оказывают факторы природно-техногенного воздействия, которые можно классифицировать следующим образом: горно-геологические условия; стратегия ТО и Р; качественные характеристики торфяной массы и погодные условия. Поскольку торфяные экскаваторы эксплуатируются в различных условиях, которые не всегда соответствуют условиям, для которых проектируется машина, необходимо учитывать влияние факторов, снижающих наработку и ресурс горной машины.

Предлагается методика оценки влияния факторов природно-техногенного воздействия на объем добычи торфяного сырья экскаватором. Данная методика позволяет оценить влияние факторов как комплексного воздействия, так и воздействие конкретного фактора на снижение объемов добычи при эксплуатации экскаватора в заданных условиях.

Для оценки и прогноза объемов добычи определяются соответствующие коэффициенты, учитывающие реальные условия, в которых эксплуатируется экскаватор, с целью оценки воздействия этих условий на эффективность эксплуатации экскаватора и прогноза наработки в заданный период.

Коэффициенты рассчитываются по эмпирическим формулам, полученным в ходе обработки статистической информации. Погодные условия оцениваются соответствующим интегральным показателем – индексом жесткости погоды ($И_П$), учитывающим температуру и влажность воздуха, скорость ветра, солнечную радиацию, число дней с метелями, туманом, ливнями и пыльной бурей, продолжительность действия в месяцах положительных/отрицательных температур.

Основываясь на приведенной методике, был разработан алгоритм и на его базе компьютерная программа.

Поскольку, в технологической цепочке по добыче и переработке торфяного сырья основным звеном является экскаватор, соответственно, спрогнозировав наработку машины, становится возможным оценить объемы добычи как на каждой стадии комплекса, так и готовой продукции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондарев Ю.Ю., Иванов С.Л.* Создание оборудования горно-энергетического комплексадля производства топлива из торфяного сырья / Современные технологии в горном машиностроении: сборник научных трудов семинара. – М.: МГГУ. 2014. С. 421-427.

2. *Вагапова Э.А.* Обоснование и выбор оборудования для первичного обезвоживания торфяного сырья при его гидромеханизированной добыче из неосушенной залежи / Э.А. Вагапова, И.Н. Худякова, С.Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2019. №7 (специальный выпуск 18). С. 3-12.

3. *Великанов В.С.* Анализ показателей долговечности рукояти карьерного экскаватора / В.С. Великанов, О.Р. Панфилова, И.Г. Усов // Вестник МГТУ им Г.И. Носова, 2018. Т.16. №4. С. 13-20.

4. *Иванов С.Л.* Изменение наработки современных отечественных экскаваторов ЭКГ от условий их функционирования / Записки горного института, 2016. Т:221. С.692-700.

5. *Иванова П.В.* Алгоритм прогнозирования наработки карьерного экскаватора ЭКГ-32Р в заданных условиях эксплуатации / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME2017. Сборник тезисов. - СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. С. 79.
6. *Иванова П.В.* Индекс жесткости погоды как интегральный показатель влияния погодных условия на работоспособность карьерных экскаваторов / С.Л. Иванов, С.Ю. Кувшинкин, Д.А. Шибанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin, 2017. № S38. С. 359-368.
7. *Иванова П.В.* Индекс жесткости погоды как интегральный показатель влияния погодных условия на работоспособность карьерных экскаваторов / С.Л. Иванов, С.Ю. Кувшинкин, Д.А. Шибанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin, 2017. № S38. С. 359-368.
8. *Михайлов А.В., Иванов С.Л., Габов В.В.* Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2015. № 14. С. 82–91.
9. Оценка влияния погодно-климатического фактора на отказоустойчивость оборудования минерально-сырьевого комплекса / С.Л. Иванов, П.В. Иванова, С.Ю. Кувшинкин, Д.А. Шибанов // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения, 2018. №04(14). С. 17-27.
10. *Пумпур Е.В.* Оценка факторов влияния на выбор стратегии технического обслуживания экскаваторов / В.И. Князькина, К.А. Сафрончук, С.Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2019. №12 (специальный выпуск 41). С. 3–19.
11. *Худякова И.Н.* Формирование структуры основного технологического оборудования автономного комплекса для добычи торфа из неосушенного месторождения / И.Н. Худякова [и др.] / Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», 2017. Т.9. №3.
12. *Солод В.И., Гетопанов В.Н., Рачек В.М.* Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. Учебник для вузов. – М.: Недра, 1982. - 350 с.
13. *Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.U.* 2019 Weather conditions as a factor affecting the performance of modern powerful mining excavators *Journal of Physics: Conference Series* 1399 044070.
14. *Kokonkov A.A., Ivanova P.V., Stroykov G.A., Ivanov S.L., Lyah D.D.* 2019 Experimental estimation of specific heat of combustion of agglomerated peat fuel *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 378 012046.
15. *Kuvshinkin S.U., Ivanova P.V.* 2019 Developing a methodology for estimation of excavation techniques for given operating conditions *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 378 012121.

УДК 622.331

КАЗАКОВ Ю.А.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МНОГОКРАТНОЙ ПРОХОДИМОСТИ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО АГРЕГАТА ПО СЛАБЫМ ОСНОВАНИЯМ НА МАССУ ПЕРЕВОЗИМОГО СЫРЬЯ

Аннотация. Освоение неразведанных территорий включает в себя транспортировку грузов по слабому основанию от забоя до места разгрузки посредством специализированной техники – горнотранспортных агрегатов ГТА. Для эффективного осуществления перевозки сырья по торфяному месторождению необходимо учитывать условие многократной проходимости, влияющее на осадку грунта под нагрузкой, в свою очередь воздействующая на поверхностную прочность торфяной залежи, а, следовательно, на проходимость техники по слабому основанию, накладывающую ограничения на массу перевозимого груза.

Ключевые слова: слабый грунт, транспорт, торфяное сырье, эффективность, горнотранспортный агрегат, многократная проходимость.

KAZAKOV Y.A.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of mechanical engineering

ANALYSIS OF THE MULTIPLE TRAFFICABILITY INFLUENCE OF MINING TRANSPORT UNIT ON SOFT GROUNDS TO THE TRANSPORTED RAW MATERIALS MASS

Abstract. The development of unexplored territories includes the transportation of cargo on soft grounds from the bottom to the place of unloading by means of specialized equipment - mining transport aggregates (MTA). For the efficient transportation of raw materials through a peat deposit, it is necessary to take into account the multiple trafficability condition, which affects the soil settlement under load, which in turn affects the surface strength of the peat deposit, and, consequently, the trafficability of the equipment on soft grounds, imposing restrictions on the mass of the transported cargo.

Keywords: soft ground, transport, peat raw materials, efficiency effect, mining transport aggregate, soil trafficability.

Разведка и освоение новых территорий, богатых полезными ископаемыми и лесоматериалом предусматривают организацию комплекса геологических, строительных, лесозаготовительных и добычных работ. На пути освоения земель встает вопрос о преодолении труднопроходимых участков слабого водонасыщенного грунта [1, 2].

При осуществлении работ по освоению неразведанных месторождений, находящихся на заболоченных территориях необходимо применение специальной подготовленной техники. В горной промышленности для обеспечения транспортировки грузов по слабым грунтам применяют тракторный транспорт. Благодаря высокой проходимости тракторной техники достигается эффективность процесса перемещения горных пород от забоя до места разгрузки, что непосредственно влияет и на эффективность освоения всего месторождения полезных ископаемых [3, 4, 5].

Эффективным называют транспортировку грузов по торфяной залежи при обеспечении оптимального сочетания двух критериев – производительности и затрат энергии, стремящихся к своим максимуму и минимуму соответственно. Обеспечение максимальной производительности при минимальных затратах энергии зависит от условий эксплуатации и особенностей конструкции машин и оборудования [2, 6].

Основным ограничением при транспортировке грузов по заболоченной территории является слабое основание грунта, поэтому критерий проходимости является главным при выборе транспортирующих машин.

Проходимость машины – это ее способность двигаться по бездорожью сохраняя при этом устойчивое состояние, необходимую и достаточную среднюю скорость при допустимом давлении на поверхностный слой грунта [7, 10, 12, 14]. Для транспортировки грузов по слабому основанию применяют специализированные колёсные горнотранспортные агрегаты ГТА, состоящие из тягового и прицепного устройств [4, 8, 9, 15].

Однако, при осуществлении тех или иных работ на торфяных месторождениях машинам необходим многократный проезд по уже пройденному участку (колее), что обеспечивает снижения сил сопротивления движению машин – проезд по колее менее энергозатратен [10].

Торфяная залежь представляет собой так называемое основание Винклера. Давление на такой грунт прямо пропорционально осадке колеса в грунт, то есть, чем больше сила тяжести агрегата, тем больше осадка [7, 10, 11]. Давление машины $P_{ср}$ на грунт не должно превышать допускаемого давления *[P]* на поверхностный слой залежи, в ином случае поверхностный слой рвётся, сплошность залежи нарушается и техника проваливается вглубь болота [10, 13, 14]. Следовательно, на перевозимую массу груза накладывается ограничение.

Изучая механизм многократного воздействия нагрузки на торфяную залежь (рис. 1) методом штампового испытания посредством вдавливания колеса диаметром 250 мм в грунт было установлено, что осадка штампа при воздействии одинаковой силы с увеличением числа повторов увеличилась в сравнении с первым нагружением на 63% при испытании в полевых условиях. Для сравнения были проведены испытания в лабораторных условиях.

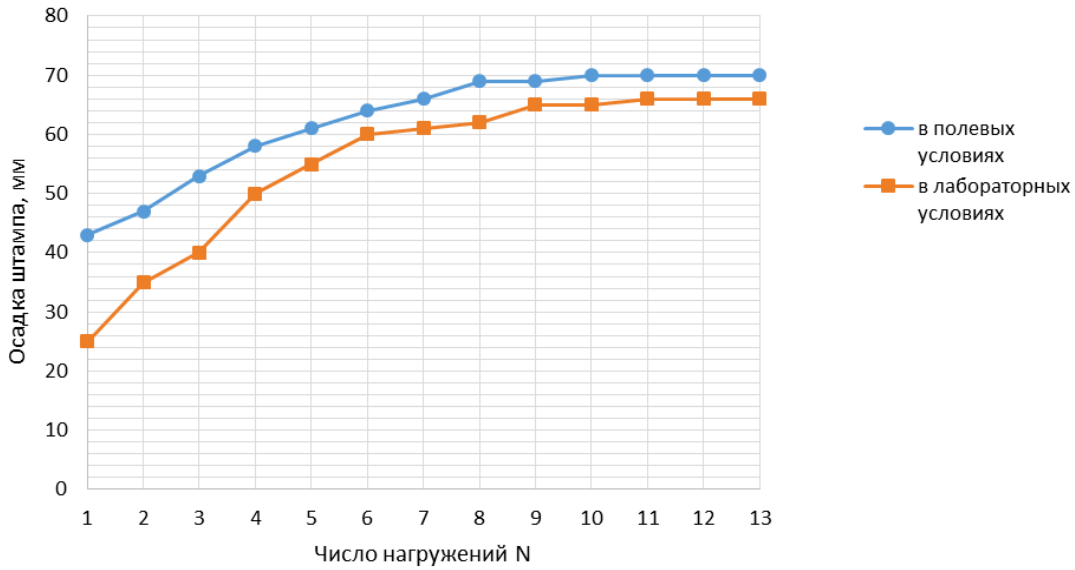


Рисунок 1 - График зависимости осадки штампа в торфяной залежи от количества нагружения постоянной нагрузкой 450 Н

При неизменном штампе и нагрузке на него величина осадки, а, следовательно, и

величина давления на грунт увеличилась, что в свою очередь напрямую влияет на способность ГТА транспортировать грузы по слабому грунту. Это обусловлено упругостью поверхности торфяной залежи. В настоящий момент данное наблюдение в существующих расчетах давления агрегатов на обводненный грунт не учитывается.

Таким образом, при многократном воздействии нагрузки на слабое основание величина опорного давления увеличивается и устанавливается с ростом числа нагружений, что необходимо учитывать при расчете перевозимой массы посредством ГТА, чтобы его давление не могло превысить допустимого давления, воспринимаемого поверхностным слоем залежи при многократном проезде ГТА по месторождению торфа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aghajani A., Osanloo M.* 2007 *Application of AHP-TOPSIS Method for Loading-Haulage Equipment Selection in Open pit Mines. XXVII International Mining Convention, Mexico.*
2. *Mikhailov A.* 2014 Peat surface mining methods and equipment selection *Mine Planning and Equipment Selection. Proceedings of the 22nd MPES Conference, Dresden, Germany, 14th – 19th October 2013. Drebenstedt, Carsten, Singhal, Raj (Eds.) 2014, XXVII* 2 1243-1249.
3. *Михайлов А.В., Иванов С.Л., Габов В.В.* Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний / Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2015. №14. С. 82-91.
4. *Mikhailov A.V., Kremcheev E.A., Nagornov D.O.* 2012 Mechanisation of extraction of peat from undrained deposit *Journal of Mining Institute* 196 256-260.
5. *Kirmanli C., Ercelebi S.G.* 2009 An expert system for hydraulic excavator and truck selection in surface mining [online]. Available at: www.saimm.co.za/Journal/v109n12p727.pdf.
6. *Mikhailov A.V., Zhigulskaya A.I.* 2017 Excavating and loading equipment for peat mining *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 87(2) 14-20.
7. *Самсонов Л.Н., Синицын В.Ф.* Торфяные машины и оборудование: Учебное пособие. Ч. I: Общие сведения о торфяных машинах. Взаимодействие ходовых устройств с торфяной залежью. 1-е изд. - Тверь: ТГТУ, 2006. - 140 с.
8. *Михайлов А.В.* Открытая разработка хранилища лигнина / Записки горного института, 2017. Т.223. С. 44-50
9. *Михайлов А.В.* Масштаб торфяного производства и комплектование оборудованием / Процессы и средства добычи и переработки полезных ископаемых. Сб. тр. Междунар. научн.-техн. конфер. Минск, 17-20 апреля 2012. С. 63-67.
10. *Яблонев А.Л.* Обоснование и выбор параметров пневматического колесного хода агрегатов по добыче торфа: дис. докт. техн. наук: 05.05.06. - Тверск. гос. техн. университет. - Тверь, 2012. - 329 с.
11. *Баловнев В.И.* Определение оптимальных параметров и выбор дорожно-строительных машин методом анализа четвертой координаты: учеб. пособие. – М.: МАДИ, 2014. – 180 с.
12. *Казаченко Г.А.* Колесные движители горных машин: методическое пособие / Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, Э.А. Кремчеев. – Минск: БНТУ, 2012. – 37 с.
13. *Saarilahti M.* 2002 Soil interaction model. Project deliverable D2 (Work package No. 1) of the Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD). EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources) 1-87.
14. *Агейкин Я.С.* Проходимость автомобилей. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
15. *Максаров В.В., Михайлов А.В., Иванов С.Л.* Машины и оборудование: учебник / В.В. Максаров, А.В. Михайлов, С.Л. Иванов. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». 2015.
16. *Бойков В.П.* Многоцелевые гусеничные и колесные машины. Проектирование: учеб. пособие / В.П. Бойков, В.В. Гуськов, Ч.И. Жданович; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В.П. Бойкова. - Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2017. - 296 с.

УДК 622.271.324: 622.68

КОПТЕВ В.Ю.,
КОПТЕВА А.В.,
АЛЕКСАНДРОВ В.И.
Санкт-Петербургский горный университет

НАПРАВЛЕНИЯ В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН ДЛЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Аннотация. Работа посвящена выявлению (в виде промежуточного достигнутого итога) применяющихся тенденций развития транспортных машин, их оценке с учетом современного уровня науки и техники и выделению наиболее значимых в инновационном представлении.

Ключевые слова: тенденции развития, карьерный транспорт, обобщение, технические решения, систематизация, критерии строения и развития техники.

KOPTEV V.Y.,
KOPTEVA A.V.,
ALEXANDROV V.I.
Saint-Petersburg Mining University

WAYS OF IMPROVEMENT OF TRANSPORT MACHINES FOR OPEN MINING

Abstract. The report attempts to identify (in the form of an interim result achieved) the applied trends in the development of transport vehicles, to assess them taking into account the current level of science and technology, and to identify the most significant in the innovative view.

Keywords: development trends, career transport, generalization, technical solutions, systematization, criteria for the structure and development of technology.

Сформировавшийся к настоящему времени уровень транспортных систем для открытых горных работ позволяет эффективно применять их на многих месторождениях полезных ископаемых. Это справедливо для разработанных технологических схем, разнообразных горно-геологических условий, географических и климатических зон и др.

Однако тенденции развития горных работ и необходимость снижения материальных и финансовых затрат, энергопотребления и повышения конкурентоспособности требуют непрерывного совершенствования показателей транспортных машин.

В исследовании предпринята попытка определить наиболее перспективные к настоящему времени применяющиеся решения на карьерном транспорте и предположить на ближайшую перспективу направления развития транспортных машин, выполнить их оценку с учетом современного уровня науки и техники и выделить наиболее значимые в инновационном представлении. Приведены технические решения по основным видам транспортных машин, применяющихся на открытых горных работах. Из-за особенностей конкретных предприятий, не все направления совершенствования машин могут быть эффективно применены на практике. Поэтому в исследовании рассматриваются наиболее общие, характерные как тенденция в виде реально применяющихся решений конструктивно-структурного совершенства транспортных машин и не рассматриваются локальные решения, применяющиеся в конкретной технологии добычи, применение другого принципа действия, новых физико-технических эффектов и других виртуальных

решений.

С целью систематизации путей совершенствования транспортной техники рассмотрение ведётся на основе основополагающих критериев строения и развития техники. Кроме обобщения технических решений в исследовании систематизированы по направлениям критерии строения и развития техники.

В работе рассмотрены известные перспективные решения для карьерного транспорта:

- на автомобильном транспорте -автоматизация и переход к роботизации, решения по повышению грузоподъёмности и единичной мощности, применение нескольких транспортных единиц (на основе автопоездов), повышению эффективности технической эксплуатации (быстросъёмные колёса с шинами, переменного тягового электропривода и др.);

- на конвейерном транспорте - применение конвейеров с подвесными и свернутыми лентами, приводов в виде агрегатов мотор-барабан и регулирования скорости движения ленты;

- на железнодорожный транспорте - комбинированные энергосиловые установки с водородными топливными элементами, применение вагонов сочлененного типа с увеличенным объемом перевозимого груза.

Накопленный опыт существующего уровня транспортного машиностроения и рассмотренные тенденции совершенствования горного транспортного машиностроения с использованными в работе критериями (по уровню механизации, автоматизации, производительности, трудозатрат на ремонт и обслуживание и др.)позволили определить современные направления дальнейшего развития горных транспортных машин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коптев В.Ю.* Транспортная логистика горных предприятий: учебное пособие / В.Ю. Коптев, А.В. Коптева. Ч. 1. – СПб.: Лема, 2017. - 108 с.
2. *Александров В. И.* Эффективная мощность и скорость движения карьерных автосамосвалов в режиме топливной экономичности / В.И.Александров, М.А. Васильева, В.Ю. Коптев // Записки Горного института, 2019. Т. 239. С. 556-563.
3. *Коптев В.Ю.* Обоснование выбора транспортных машин горных предприятий / «Горная техника», Изд. Дом «Славутич», 2012. С.58-61.
4. *Коптев В.Ю* .Структурная оптимизация транспортных систем / Наука, техника и образование, 2015. № 4(10). С. 108-111.
5. *Коптев В.Ю.* Пути совершенствования парка машин с использованием информативной базы производственной эксплуатации / Путь науки, 2015. № 5(15), С. 34-36.
6. *Коптев В.Ю.* Criteria for selection of transport machinery miningen terprise Критерии выбора транспортных машин горно-добывающего предприятия / European science, 2015. № 2(3), С. 20-23.
7. *Коптев В.Ю.* Управление эксплуатацией машин за счет совершенствования структуры парка и использования информативной базы производственной эксплуатации / Современные научные исследования и инновации, 2015. № 4 (48). С. 92-95..
8. *Коптев В.Ю.* Структурная оптимизация транспортных систем горнодобывающих предприятий / Проблемы современной науки и образования, 2016. №18(60). С. 27-29.
9. *Коптев В.Ю.* Выбор транспортных машин для проектирования транспортных систем горных предприятий / Сборник научных трудов межд. научно-технической конференции: «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017» 23-24 марта 2017, СПГУ, СПб, 2017. С. 57-61.
10. *Коптев В.Ю.* Повышение эффективности транспортных систем горных предприятий / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME -2018. Сборник научных трудов 12-13 апреля 2018, 2018. С. 111.

11. *Коптев В.Ю.* Обоснование применения логистических концепций для карьерного транспорта / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME -2018. Сборник научных трудов 12-13 апреля 2018, 2018. С. 222.
12. *Докукин В.П.* Основы инженерного творчества: Конспект лекций / В.П. Докукин, В.В. Габов. – СПб.: Санкт-Петербургский горный ин-т., 2002. - 50 с.
13. *Яковлев В.Л., Яковлев В.А.* Формирование транспортных систем карьеров с учетом адаптации к изменяющимся условиям разработки глубокозалегающих сложноструктурных месторождений / Известия ВУЗов. Горный журнал, 2018. N6. С.118-126.
14. *Андреева Л.И., Красникова Т.И., Ушаков Ю.Ю.* Методология формирования эффективной системы обеспечения работоспособности горной техники / Известия вузов. Горный журнал, 2019. №5. С. 92–106.
15. *Коптев В.Ю.* Повышение эффективности эксплуатации карьерного автотранспорта за счет выбора модели автосамосвала и использования современных систем автоматизации и диспетчеризации / Сб. трудов 1-ая Региональная межвузовская научно-практическая конференция «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении» // 16 апреля 2013, СПб. НМСУ «Горный», 2013. С. 158-165.
16. *Коптев В.Ю. Лебединов М.И.* Обоснование критериев выбора транспортных машин для горнодобывающих предприятий / Материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ», 2016. С. 293-295. // В книге: Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием, 2016. С. 293-295.
17. *Коптев В.Ю., Турской Д.Е.* Определение параметров самозагружающихся автосамосвалов / IV Международная научно-практическая конференция «Инновации на транспорте и в машиностроении» 28-29.04.2016, СПб, СПГУ, Сб. Трудов, Том V, Круглый стол молодых учёных, 2016. С. 92.
18. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (от 11 декабря 2013 года N 599).

УДК 622.331

КОРНИЛЬЕВ Е.О.
Тверской государственный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗБРАСЫВАТЕЛЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОРФЯНОГО РАССТИЛА

Аннотация. В статье рассмотренспособ формирования однородного торфяного растила при помощи разбрасывателя органических удобрений.

Ключевые слова: торфяной расстил, экскавация, древесные включения, ковш фронтального погрузчика, экскаваторный способ добычи, разбрасыватель удобрений.

KORNILIEV E.O.
Tver State Technical University

THE USE OF A SPREADER TO FORM A PEAT SPREAD

Abstract. The article discusses a method of forming a homogeneous peaty plant using a spreader of organic fertilizers.

Keywords: peat spread, excavation, wood inclusions, front loader bucket, excavator extraction method, fertilizer spreader.

Парк специализированных машин, задействованных в торфяной промышленности, в настоящее время физически устаревает. Необходимость приобретения нового оборудования ведет к значительным финансовым затратам. Использование действующего оборудования, применяемого в других отраслях, позволяет снизить затраты на добычу торфяного сырья.При маломасштабной добычи торфа пригодны следующие способы добычи: ручной; экскаваторный; бульдозерный; гидроэкскаваторный; плуговой; фрезерный; формованного куска [1-5]**.**

Рассмотренный экскаваторный способ добычи торфа состоит из ряда технологических операций:

– экскавация торфа из залежи;
– погрузка торфяного сырья;
– транспортирование торфяного сырья;
– формирование торфяного расстила и штабеля;
– сепарация и вывозка торфа на завод.

Применение данного способа добычи торфяного сырья возможно с использованием стандартных машин, что позволит сократить стоимость добычи торфа [6-9].

Технологическая операция формированиярастилапредназначенадля промежуточный сушки торфяного сырья [10, 12]. Выполнение этойоперации можно осуществлять при помощи транспортирующего устройства, перемещающегося по специализированной площадке или торфяномуполю, путем частичного опрокидывания кузова транспортного устройства [11, 13-15]. Полученный расстил является не однородным с наличием древесных включений. Интенсивность сушки торфа в расстиле зависит от равномерности поверхности расстила и фракционного состава торфяного сырья. Полученный растил не будет являться организованным, так как расстил обладает не определенной равномерностью. Для получения организованного расстила необходимо совершить дополнительные операции по удалению древесных включений и задание расстилу определенной неравномерности. Удаление древесных включений возможно выполнить при помощи ковша сепаратора, установленного на фронтальной погрузчик [11,

13, 16-20].

Для формирования организованного расстила предлагается использовать разбрасыватель удобрений, применяемый в сельском хозяйстве. Разбрасыватели удобрений можно разделить по типу использования вещества для удобрений: минеральное, органическое и органоминеральные, по типу установки на машинно-тракторную технику: навесное и прицепное.Разбрасыватели органического удобрения имеют одинаковые схемы работы и конструктивно выполнены в виде тракторного прицепа.

Средства механизации для внесения минеральных удобрений в основном представлены навесным способом установки на машинно-тракторную технику, для внесения удобрений применяют оборудование оснащенное барабанными, цепными, катушечными, центробежными, тарельчатыми и другими высеивающими аппаратами. При использовании разбрасывателя органических удобрений технологическая схема добычи торфяного сырья экскаваторным способом нуждается в корректировке и состоит из технологических операций:

– экскавация торфяной залежи;

– транспортирование и формирование отвала торфяного сырья;

– удаление древесных включений из отвала при помощи просеивающего ковша, установленного на фронтальный погрузчик, с последующей транспортировкой собранных древесных включений к месту их хранения;

– наполнение разбрасывателя органических удобрений торфом;

– формирование растила;

– сбор торфа из расстила и транспортирования его потребителю.

При использовании разбрасывателя органических удобрений торфяному расстилу можно задать необходимые параметры равномерности поверхности и фракционного состава. Это достигается путем изменения скорости рабочего органа разбрасывателя и изменение скорости движения машинно–тракторного агрегата. В качестве базовой машины для установки разбрасывателя предлагается использовать фронтальный погрузчик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Михайлов А.В., Кремчеев Э.А., Большунов А.В., Нагорнов Д.О.* Перспективы развития новых технологий добычи торфа / Горный информационно-аналитический бюллетень, 2010. С. 189-194.

2. *Гамаюнов С.Н., Гамаюнова А.Н.* К вопросу о классификации способов добычи торфа./ Труды инсторфа, 2015. С. 13-18.

3. *Михайлов А.В.* Масштаб торфяного производства и комплектование оборудованием. Процессы и средства добычи и переработки полезных ископаемых / Сборник трудов Междунар. научн.-техн. конфер. Минск 17-20 апреля 2012 г., 2012. С. 63-67.

4. *Mikhailov A.* 2014 Peat surface mining methods and equipment selection *Mine Planning and Equipment Selection. Proceedings of the 22nd MPES Conference, Dresden, Germany, 14th – 19th October 2013. Drebenstedt, Carsten, Singhal, Raj (Eds.), XXVII* 2 1243-1249.

5. *Mikhailov A.* 2014 Reclamation of Mine Tailings Using Natural Peat *Legislation, Technology and Practice of Mine Land Reclamation. Edited by Zhenqi Hu. Proceedings of the Beijing International Symposium Land Reclamation and Ecological Restoration, LRER 2014, Beijing, China, 16-19 October 2014, CRC Pres*. 363-369.

6. *Михайлов А.В., Иванов С.Л., Габов В.В.* Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний / Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2015. №14. С. 82-91.

7. *Жигульская А.И., Лемешев А.В., Гусева А.М., Бурмистров И.С.* Классификация машин и оборудования для добычи и переработки древесных ресурсов торфяного месторождения.

Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ, 2014. №11. С. 144-150.
8. *Яконовская Т.Б., Жигульская А.И., Корнильев Е.О.* Торфяное производство как элемент горнопромышленной системы / Рукопись деп. в изд-ве МГГУ от 28.08.2014 г. № 1033/11-14. 4с. / Горныйинформационно-аналитическийбюллетень. - М.: МГГУ, 2014. №11. С. 392.
9. *Mikhailov A.* 2015 Peat fuel types for supply logistics *Proceedings of the 5th International Carpathian Logistis Congress. November 4th-6th, Priessnitz Spa, Jesenik, Czech Republic.* 412-417.
10. *Mikhailov A.* 2016 Granulating of coal fines using peat *XVIII International Coal Preparation Congress, 28 June—01 July 2016 Saint-Petersburg, Russia. Editors: Litvinenko, Vladimir (Ed.). Springer International Publishing* 2 719-725.
11. *Mikhailov A.V., Zhigulskaya A.I., Yakonovskaya T.B.* 2017 Excavating and loading equipment for peat mining *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 022014.
12. *Mikhailov A., Kim A. and Prodous O.* 2017 Peatland restoration after open pit mining *Land Reclamation in Ecological Fragile Areas: Proceedings of the 2nd International Symposium on Land Reclamation and Ecological Restoration (LRER 2017), October 20-23, 2017, Beijing, PR China Edited by Zhenqi Hu. Taylor & Francis Group, CRC Press 2017* 289–294.
13. *Mikhailov A., Zhigulskaya A., Yakonovskaya T.* 2017 Strip mining of peat deposit *Proceeding of the 26th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection: MPES 2017. Luleå, Sweden, 29-31August 2017. Edited by BehzadGhodrati, Uday Kumar, Håkan Schunnesson. Luleå University of Technology* 497-501.
14. *Mikhailov A.V., Korolyov I.A., Lopatiuk A.O.* 2017 Corrosion stability of cutting tool's material for exploitation of peat deposits *Procedia Engineering* 206 668–675.
15. *Михайлов А.В.* Развитие глобального рынка торфа / Труды Инсторфа: научный журнал. - Тверь: ТвГТУ, 2018. №18(71) С. 3-7.
16. *Корнильев Е.О., Жигульская А.И., Михайлов А.В.* Навесное модульное оборудование для первичной обработки торфяного сырья / В сборнике: Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики. Материалы конференции. Тульский государственный университет; Под редакцией Р.А. Ковалева, 2017. С. 173-176.
17. *Михайлов А.В., Казаков Ю.А.* Анализ парка машин при карьерной добыче торфа / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2019. №7 (специальный выпуск 20). С. 16.
18. *Mikhailov A.V. et al.* 2019 Preliminary study of tubular peat extrusion *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 560 012061.
19. Mikhailov A.V., Garmaev O.Z., Garifullin D.R., Kazakov Y.A. 2019 A potential application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat *mining IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 378 012086
20. *Mikhailov A., Zhigulskaya A. and Garmaev O.* 2019 An integrated approach to strip mining of peat *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 378 012087.

УДК 622.331

КОРНИЛЬЕВ Е.О.,
ЖИГУЛЬСКАЯ А.И.
Тверской государственный технический университет
МИХАЙЛОВ А.В.
Санкт-Петербургский горный университет

ВИБРАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СЕПАРАЦИЮ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ

Аннотация. В статье рассмотрено вибрационное влияние при сепарации, при использовании навесного модульного оборудования для первичной обработки торфяного сырья.

Ключевые слова: торфяной расстил, экскавация, древесные включения, ковш фронтального погрузчика, экскаваторный способ добычи, вибрационное воздействие.

KORNILIEV E.O.,
ZHIGULSKAYA A.I.
Tver State Technical University
MIKHAILOV A.V.
Saint-Petersburg Mining University

VIBRATION IMPACT ON SEPARATION OF PEAT MATERIALSE

Abstract. The article considers the influence of vibration during separation using mounted modular equipment for the primary processing of peat raw materials.

Keywords: The article discusses the vibrational effect during separation, when using mounted modular equipment for the primary processing of peat raw materials.

При маломасштабном способе добычи торфяного сырья подразумевается использование оборудования, выпускающегося серийно, однако узкоспециализированные машины, задействованные в торфяной промышленности, практически не выпускаются, а имеющейся парк оборудования морально и технически устаревает.

Для применение машин и оборудования осуществляющих несколько операцийпо добычи торфяного сырья необходимым условием является: использование сменного рабочего оборудования,позволяющегопри помощи базовых машин выполнять большинство технологических операций [1-3].

Фронтальный погрузчик, являясь базовой машиной может быть оснащен различными рабочими органами и навесным оборудованием. Использование ковша–сепаратора, установленного на фронтальный погрузчик, позволяет выполнять технологические операции:

– подбор торфяного сырья с находящимися в нем древесными включениями;

– сепарация торфа от древесных включений;

– транспортирование древесных включений, оставшихся в ковше–сепараторе, к месту их хранения или переработки.

Сепарация заключается в процессе отделения торфа от посторонних включений. При использовании ковша–сепаратора, фронтальный погрузчик движется по расстилу торфяного сырья подбирая торф и древесные включения. Через решетчатое днище торф проходит и остается в расстиле, а древесные включения остаются в ковше. После наполнения ковша древесные включения транспортируются к месту их хранения или

переработки [4].

Налипание торфодревесной массы на стенки и днище ковша снижает эффективность процесса сепарации.

Одним из параметров влияющем на адгезию является влажность торфа, она существенно влияет на эффективность сепарации. При некоторых значения влажности, зависящей от типа торфа, эффективность сепарации снижается из–за налипания торфяной массы на рабочие поверхности ковша–сепаратора, что приводит к снижению производительности сепарирующего устройства, а в отдельных случаях может стать причиной прекращения процесса разделения торфа и древесных включений [5].

При использовании оборудования, работающего с влажными грунтами, могут использоваться механические способы очистки, подогрев рабочего органа выхлопными газами или применение покрытий, способных уменьшить адгезию материала к металлу.

Одним из способов предохранения рабочих органов машин по переработке торфа от залипания влажным материалом является применение обогрева рабочего органа паром, однако такой метод не подходит для использования в полевых условиях при использовании фронтального погрузчика [6].

Также известен метод колебательного воздействия рабочей жидкости на стенки ковша, под колебательным воздействие подразумевается вибрация от вибровозбудителя на стенки ковша экскаватора, призванное повысить эффективность работы ковша, за счет уменьшения налипания грунта на ковш, увеличивая его наполнение [7].

Повышение эффективность работы ковша–сепаратора при работе с влажным торфом возможно установкой вибровозбудителя – это позволит уменьшить налипание торфа на стенки ковша–сепаратора, повысить эффективность сепарации и отделения торфяной массы от древесных включений, налипшей на них.

Использование вибрационного воздействия на торфяное сырье при его сепарации позволит улучшить процесс очистки торфа от нетехнологических включений и повысить качество выпускаемой продукции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *MikhailovA.V., ZhigulskayaA.I., Yakonovskaya T.B.* 2017 Excavating and loading equipment for peat mining *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 022014.
2. *Михайлов А.В., Кремчеев Э.А., Большунов А.В., Нагорнов Д.О.* Перспективы развития новых технологий добычи торфа / Горный информационно-аналитический бюллетень, 2010. С. 189-194.
3. *Mikhailov A., Zhigulskaya A., Yakonovskaya T.* 2017 Strip mining of peat deposit *Mine Planning and Equipment Selection: MPES 2017 Proceeding of the 26th International Symposium. Edited by Behzad Ghodrati, Uday Kumar, Håkan Schunnesson* 497-501.
4. Корнильев Е.О., Жигульская А.И., Михайлов А.В. Навесное модульное оборудование для первичной обработки торфяного сырья / В сборнике: Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики. Материалы конференции. Тульский государственный университет; Под редакцией Р.А. Ковалева, 2017. С. 173-176.
5. *Самсонов Л.Н., Павлов Ю.Н., Кочкарян С.М., Кондратьев А.В.* Исследование работоспособности валкового сепаратора при переработки влажного торфа / Горный информационно–аналитический бюллетень (технический журнал), 2002.
6. Патент на изобретение SU 65506 A1 «Способ предохранения рабочих органов машин по переработке торфа или угля от залипания влажным материалом»от 22.11.1944 г., МПК C10F 7/00, опубл. 01.01.1945 г.
7. Патент на изобретение RU 2285089C1 «Ковш экскаватора» от 04.04.2005 г., МПК E02F 3/40, опубл. 10.10.2005 г.

УДК 621.271.022

КУВШИНКИН С.Ю.,
ИВАНОВА П.В.
Санкт-Петербургский горный университет

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА НА РЕСУРС МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА

Аннотация. Конструктивные параметры рабочего оборудования оказывают существенное влияние на ресурс карьерного экскаватора. Установлено, что увеличение длины стрелы не приводит к снижению ресурса системы, а в случае преобладания в спектре внешней нагрузки высокочастотных составляющих может привести к его увеличению. Увеличение вместимости ковша при максимальном коэффициенте его заполнения влечет за собой снижение ресурса.

Ключевые слова: карьерный экскаватор; рабочее оборудование; ресурс.

KUVSHINKIN S.Y.,
IVANOVA P.V.
Saint-Petersburg mining university

THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF THE FRONT-END EQUIPMENT MINING SHOVELS ON THE LIFE OF THE HOIST MECHANISM

Abstract. The constructive parameters of the front-end equipment have a significant impact on the resource of the mining shovels. It was found that increasing the length of the boom does not lead to a decrease in the system resource, and in the case of a predominance of high- frequency components in the external load spectrum, it can lead to an increase in it. An increase in the bucket capacity at the maximum filling rate leads to a decrease in the resource.

Keywords: mining shovel; front-end equipment; resource.

Основными показателями, характеризующими эффективность работы экскаваторно-транспортного комплекса, являются производительность, удельный расход энергии, ресурс и безопасность. Значительное влияние на эти показатели оказывают конструктивные параметры рабочего оборудования карьерного экскаватора, являющегося первым звеном технологической цепочки добычи и определяющего производительность комплекса. Основными параметрами рабочего оборудования, влияющими на работу экскаваторно-транспортного комплекса, являются длина стрелы, длина рукояти и вместимость ковша.

Влияние длины стрелы, длины рукояти и вместимости ковша карьерного экскаватора на ресурс объясняется тем, что от них зависят приведенные жесткость и масса рабочего оборудования. Изменение этих параметров влечет за собой изменение собственной частоты системы, что отражается на трансформации внешней нагрузки при передаче ее от исполнительного органа экскаватора к барабанам подъемной и напорной лебедок [1-3].

В настоящей работе оценка влияния конструктивных параметров рабочего оборудования экскаватора на его ресурс проводится на примере механизма подъема, как наиболее энергонагруженного (суммарная мощность двигателей привода подъема

сравнима с мощностью всех остальных приводов экскаватора, вместе взятых). Область возможных значений конструктивных параметров сменного рабочего оборудования практически всегда ограничивается именно возможностями привода подъема [4-15].

Основываясь на энергетическом подходе, можно определить тенденции изменения ресурса машины при варьировании конструктивных параметров рабочего оборудования. Это позволяет выявить те направления изменения длин стрелы, рукояти и вместимости ковша, которые не приведут к уменьшению ресурса экскаватора, и рекомендовать такие комплекты рабочего оборудования в качестве рациональных.

Информация о потерях в системе является той основой, с использованием которой судят о тенденциях изменения ресурса системы. При этом, так как привод подъемной лебедки остается неизменным при варьировании параметров рабочего оборудования, величина ее энергоресурса также неизменна. В свою очередь ресурс системы будет равен отношению энергоресурса системы к величине потерь мощности, рассеиваемой в ней при работе экскаватора. Таким образом, изменение ресурса трансмиссии будет пропорционально соответствующему изменению потерь.

Для оценки величины потерь в трансмиссии на известных принципах была разработана математическая модель, позволяющая определять величины потерь мощности как в трансмиссии в целом, так и поэлементно, в зависимости от величины и характера внешней нагрузки.

Нагрузка на входе в систему механической трансмиссии лебедки подъема представлена как сумма постоянной и переменной составляющих. При моделировании принято, что амплитуда переменной составляющей равна 40% от величины постоянной составляющей, при частоте приложения внешней нагрузки 0,8 Гц и частоте 4,8 Гц. Выбор частот основан на исследованиях Оленича В.И. и Багина Б.П., установивших, что именно на этих частотах в спектре внешней нагрузки экскаваторов наблюдаются максимумы. Для выявления влияния отдельных параметров рабочего оборудования каждый раз изменялся лишь один из параметров системы – либо длина стрелы, либо вместимость ковша. Результаты моделирования позволили выявить зависимости потерь в редукторе от изменяемых параметров рабочего оборудования, с учетом частоты приложения внешней нагрузки.

Установлено, что длина стрелы мало влияет на потери в редукторе подъемной лебедки, обусловленные действием низкочастотной составляющей внешней нагрузки, в то время как потери, вызванные действием высокочастотной составляющей, резко уменьшаются с увеличением длины стрелы. Следовательно, увеличение длины рабочего оборудования при неизменной вместимости ковша повлечет за собой увеличение ресурса системы. Зависимость мощности потерь от длины стрелы при дорезонансной частоте внешней нагрузки (0,8 Гц) носит линейный характер, а при зарезонансной частоте (4,8 Гц) может быть представлена как полином третьей степени.

Увеличение вместимости ковша ведет первоначально к возрастанию потерь в редукторе лебедки подъема, что, в свою очередь, говорит о снижение ресурса системы. При этом характер изменения потерь независимо от частоты переменной составляющей нагрузки имеет одинаковые тенденции. Максимальная величина потерь мощности в системе достигается при некоторой критической величине вместимости ковша, дальнейшее его увеличение не приводит к росту потерь, а, следовательно, к дальнейшему снижению ресурса системы. Характерная критическая зона обусловлена тем, что при ее достижении коэффициент наполнения ковша начинает уменьшаться и ковш заполняется лишь частично. Положение такой зоны обуславливается в первую очередь высотой забоя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Багин Б.П., Оленич В.И.* Основы статистической динамики одноковшовых экскаваторов. - М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1974. – 48 с.

2. *Великанов В.С.* Анализ показателей долговечности рукояти карьерного экскаватора / В.С. Великанов, О.Р. Панфилова, И.Г. Усов // Вестник МГТУ им Г.И. Носова, 2018. Т.16. №4. С. 13-20.
3. *Иванов С.Л.* Изменение наработки современных отечественных экскаваторов ЭКГ от условий их функционирования / Записки горного института, 2016. Т:221. С.692-700.
4. *Иванов С.Л.* Оценка влияния погодно-климатического фактора на отказоустойчивость оборудования минерально-сырьевого комплекса / С.Л. Иванов, П.В. Иванова, С.Ю. Кувшинкин, Д.А. Шибанов // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения, 2018. №04(14). С. 17-27.
5. *Иванова П.В.* Алгоритм прогнозирования наработки карьерного экскаватора ЭКГ-32Р в заданных условиях эксплуатации / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME2017. Сборник тезисов. - СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. С. 79.
6. *Иванова П.В.* Анализ структуры и надежности современного парка карьерных экскаваторов / П.В. Иванова, С.Л. Иванов, С.Ю. Кувшинкин, С.А. Асонов / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2017. № 7. С. 51-57.
7. *Иванова П.В.* Индекс жесткости погоды как интегральный показатель влияния погодных условия на работоспособность карьерных экскаваторов / С.Л. Иванов, С.Ю. Кувшинкин, Д.А. Шибанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin, 2017. № S38. С. 359-368.
8. *Иванова П.В.* Оценка отказоустойчивости современных карьерных экскаваторов производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П.Г. Коробкова» / П.В. Иванова, С.Ю. Кувшинкин, Д.А. Шибанов // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов IV международной научно-практической конференции. - СПб.: Горный университет, 2016. С. 157-159
9. *Кувшинкин С.Ю.* Анализ влияния длины стрелы и вместимости ковша карьерного экскаватора на динамику нагрузки / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME 2018. Сборник тезисов. - СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. С. 114.
10. *Кувшинкин С.Ю.* Влияние конструктивных параметров рабочего оборудования карьерного экскаватора на динамику нагрузки / Записки Горного института, 2014. Т.209. С. 66-70
11. *Кувшинкин С.Ю.* Определение рациональных конструктивных параметров рабочего оборудования карьерного экскаватора в системе экскаваторно-транспортного комплекса: дисс. канд. техн. наук. – СПб., 1999. – 200 с.
12. *Кувшинкин С.Ю.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018614385. Определение рациональных длин стрелы, рукояти и вместимости ковша карьерного экскаватора / С.Ю. Кувшинкин, П.В. Иванова // Заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – Заявка №2018611580 20.02.18 Регистрация в Реестре программ для ЭВМ от 04.04.2018, Бюл. № 4.
13. *Коломийцев М.Д.* Методы определения ресурса горных машин / М.Д. Коломийцев, Б.С. Маховиков // Записки СПГГИ, 1993. Т. 138. С. 84-94.
14. *Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.U.* 2019 Weather conditions as a factor affecting the performance of modern powerful mining excavators *Journal of Physics: Conference Series* 1399 044070
15. *Kuvshinkin S.U., Ivanova P.V.* 2019 Developing a methodology for estimation of excavation techniques for given operating conditions *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 378 012121.

УДК 621

КУЗНЕЦОВ Н.К.,
ИОВ И.А.,
ИОВ А.А.
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
ООО «СЛСи – Джи Эйч», Москва

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ГОРНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ

Аннотация. Статья посвящена вопросам снижения динамических нагрузок горных машин с помощью встроенных в конструкцию упруго-демпфирующих устройств. В ней приводятся результаты исследований по определению параметров этих устройств на основе решения обратной задачи динамики по заданной во временной области кривой изменения упругого усилия в канате тягового механизма экскаватора. Показывается, что применение этого метода синтеза позволяет получить оптимальные значения конструктивных параметров подобных устройств, удовлетворяющих не одному, а нескольким противоречивым критериям качества переходного процесса, определяемых желаемой кривой изменения усилия в канате. На примере двухмассовой электромеханической системы, которой моделируются динамические свойства тягового механизма драглайна, оснащенного упруго-демпфирующим устройством, описывается процедура предлагаемого синтеза параметров и приводятся результаты численного исследования его эффективности.

Ключевые слова: механизм тяги; динамические нагрузки; демпфирующие устройства; обратная задача.

KUZNETSOV N.K.,
IOV I.A.,
IOV A.A.
Irkutsk National Research Technical University
«SLC-JH» Ltd.

SYNTHESIS OF PARAMETERS OF ELASTIC-DAMPING DEVICES FOR REDUCING DYNAMIC LOADS OF MINING MACHINES BASED ON THE CONCEPT OF INVERSE DYNAMIC PROBLEMS

Abstract. The article is devoted to the issues of reducing the dynamic loads of mining machines with the help of elastic-damping devices built into the structure. It presents the results of research that determines the parameters of these devices based on the solution of the inverse dynamic problem for a given low of change of elastic force in the cable of the excavator traction mechanism.It is shown that the use of this synthesis method allows us to obtain optimal values of the design parameters of such devices that fulfill several contradictory criteria of the quality of the transition process, determined by the desired curve of force change in the cable.Using the example of a two-mass electromechanical system that simulates the dynamic properties of a dragline traction mechanism equipped with an elastic-damping device, the procedure of the proposed parameter synthesis is described and the results of a numerical study of its efficiency are presented.

Keywords: traction mechanism; dynamic loads; damping devices; inverse problem.

Введение.

Из-за наличия упругих элементов в виде стальных канатов, тросов, лент и цепей исполнительные механизмы многих горных машин и технологического оборудования подвержены значительным динамическим нагрузкам и колебательным движениям рабочих органов в переходных режимах работы, что приводит к снижению эффективности,долговечности и надежности их работы [1-4]. Значительная инерционность электроприводов главных движений ограничивает возможности их использования для решения проблемы снижения динамических нагрузок подобных машин. В этих условиях эффективным способом снижения динамических нагрузок может явиться применение упруго-демпфирующих устройств (УДУ), вводимых в механизмы горных машин для изменения упруго-вязких свойств конструкций[5-7]. Одной из основных проблем, которую приходится решать при использовании этого способа снижения динамических нагрузок, является проблема синтеза оптимальных параметров УДУ. Применение концепции обратных задач динамики для синтеза параметров УДУ имеет определенный интерес, поскольку, в отличие от частотных методов,эта концепция предполагает использование не косвенных, а прямых критериев эффективности, например, в виде заданной кривой переходного процесса, которая позволяет одновременно учесть несколько противоречивых показателей качества движения[8]. В настоящей работе, на примере тягового механизма шагающего экскаватора исследуются возможности применения этой концепции для решения задачи определения оптимальных параметров УДУ.

Объект, методы и результаты исследований.

В качестве объекта исследования примем механическую систему тягового механизма экскаватора драглайна, оснащенного УДУ [7]. Математическая модель механической части этой динамической системы описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$J_1\dot{\varphi}_1 s = M_{\text{dv}} - \frac{c_{12}\Delta\dot{\varphi}_{13}}{s} - b_{12}\Delta\dot{\varphi}_{13}, \quad (1)$$

$$J_2\dot{\varphi}_2 s = \frac{c_{12}\Delta\dot{\varphi}_{13}}{s} + b_{12}\Delta\dot{\varphi}_{13} - M_C, \quad (2)$$

$$J_3\dot{\varphi}_3 s = M_{12} - \frac{c_в\Delta\dot{\varphi}_3}{s} - b_в\Delta\dot{\varphi}_3, \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_{13} = \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3, \quad (4)$$

где J_1 – суммарный момент инерции двух двигателей, приведенного момента инерции редуктора и барабанов; J_2 – момент инерции ковша с породой; J_3 – момент инерции демпфирующего устройства; c_d – коэффициент жесткости демпфера; b_d – коэффициент вязкого трения демпфера; c_{12} – коэффициент жесткости каната; b_{12} – коэффициент вязкого трения в канате; M_{dv}– момент развиваемы приводом; M_C – момент нагрузки; $\dot{\varphi}_1$, $\dot{\varphi}_2$ и $\dot{\varphi}_3$ – угловые скорости масс; $\Delta\dot{\varphi}_{13} = \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3$ – скорость упругой деформации; $s = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа.

Структурная схема механической системы, составленная на основе уравнений (1)-(4) и ее кинематическое представление в тяговом механизме приведены на рис 1, а и 1, б, соответственно, где приняты следующие обозначения: 1 – приведенный момент инерции двигателя и редуктора; 2 и 3 - направляющие блоки; 4 – канат; 5 – ковш; 6 – УДУ. С целью

упрощения математической модели примем ряд следующих допущений [7]: УДУ обладает моментом инерции, во много раз меньшим момента инерции защищаемого механизма, полагая $J_3 = 0$; вязкое трение в канате отсутствует ($b_{12} = 0$).

Процесс синтеза параметров жесткости c_d и вязкого трения b_d УДУ на основе решения обратной задачи динамики по заданному закону изменения упругого усилия в канате будем осуществлять в несколько этапов. На первом этапе определим необходимое управляющее воздействие на основе принципа обратной связи для исходной механической системы (безУДУ), а на втором – преобразуем полученное воздействие методом структурного перехода к передаточной функции, которая по входным воздействиям эквивалентна передаточной функции УДУ. На последнем этапе найдем неизвестные параметры УДУ, обеспечивающие желаемый закон изменения упругого усилия, путем приравнивания соответствующих коэффициентов полученных дифференциальных уравнений.

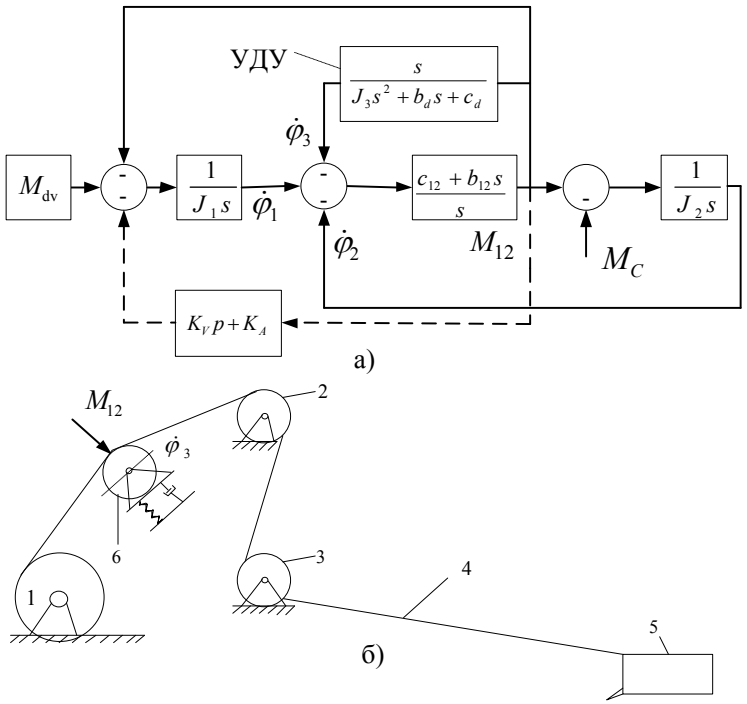


Рисунок 1 – Структурная (а) и кинематическая (б) схемы тягового механизма

Решая уравнения (1) и (2) относительно усилия $M_{12} = \frac{c_{12} + b_{12} s}{s} \Delta\dot{\varphi}_{13}$, формируемого в канате ($\dot{\varphi}_3 = 0$) с требованием его изменения по колебательному закону $M_{12} = e^{\alpha t}(\cos\beta t + \sin\beta t)$, в котором α и β – коэффициенты комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения, определяемых по $s_{1,2} = -\xi\omega_{12} \pm \omega_{12}\sqrt{\xi^2 - 1} = \alpha \pm j\beta$ [9], находим потребное управляющее воздействие на основе принципа обратной связи:

$$M_{dv} = (K_V s + K_A) M_{12}. \qquad (5)$$

Здесь $K_V = \frac{C_1 - C_2}{2\beta}$ и $K_A = \frac{C_1(\beta - \alpha) + C_2(\alpha + \beta)}{2\beta}$ коэффициенты усиления обратных связей, $C_1 = \frac{J_1[K_1(c_{12} + b_{12}\alpha) - b_{12}\beta K_2]}{(c_{12} + b_{12}\alpha)^2 + b_{12}^2\beta}$ и $C_2 = \frac{J_1[K_2(c_{12} + b_{12}\alpha) - b_{12}\beta K_1]}{(c_{12} + b_{12}\alpha)^2 + b_{12}^2\beta}$, $K_1 = \alpha^2 + 2\alpha\beta - \beta^2 + b_{12}J_{12}(\alpha + \beta) + \omega_{12}^2$ и $K_2 = \alpha^2 - 2\alpha\beta - \beta^2 + b_{12}J_{12}(\alpha - \beta) + \omega_{12}^2$.

Выполняя структурный перенос входного воздействия обратной связи (5) с сумматора моментов на сумматор скоростей (рис. 1, а), получаем передаточную функцию, в которой входным воздействием является усилие в канате M_{12}, а выходным – компенсирующее воздействие ω_3. Аналогичное представление имеет переаточная функция УДУ:

$$W(s)=\frac{\omega_3}{M_{12}}=\frac{K_V s+K_A}{J_1 s} \text{ и } W(s)=\frac{\omega_3}{M_{12}}=\frac{s}{b_d s+c}.$$

В полученных передаточных функциях входные и выходные воздействия одинаковы, следовательно, добиваясь эквивалентности этих функций, например, для колебательного закона движения, можно определить неизвестные параметры УДУ.Вычисляя компенсирующее воздействие этих передаточных функций на основании колебательного закона изменения усилия получаем:

$$\omega_3 = D_1 e^{\alpha t}\cos\beta t + D_2 e^{\alpha t}\sin\beta t \text{ и } \omega_3 = F_1 e^{\alpha t}\cos\beta t + F_2 e^{\alpha t}\sin\beta t,$$

где $D_1=\frac{E_1\alpha-E_2\beta}{J_1(\alpha^2+\beta^2)}$ и $D_2=\frac{E_2\alpha+E_1\beta}{J_1(\alpha^2+\beta^2)}$, $E_1=K_V(\alpha+\beta)+K_A$ и $E_2=K_V(\alpha-\beta)+K_A$,

$F_1=\frac{b_d(\alpha^2+\beta^2)+c_d(\alpha+\beta)}{(b_d\alpha+c_d)^2+b_d^2\beta^2}$ и $F_2=\frac{b_d(\alpha^2+\beta^2)+c_d(\alpha-\beta)}{(b_d\alpha+c_d)^2+b_d^2\beta^2}$.

Соблюдая условиеэквивалентности компенсирующих воздействийнаходим выражение связывающее параметры УДУ с коэффициентами обратных связей:

$$b_d(\alpha^2+\beta^2)\left[E_1(\beta-\alpha)+E_2(\alpha+\beta)\right]=c_d\left[(\alpha-\beta)(E_1\alpha-E_2\beta)-(\alpha+\beta)(E_2\alpha-E_1\beta)\right], \quad (6)$$

Исследование равенства (6) при реальных физических параметрах механической системы копающего механизма [7] позволяет найти необходимые соотношения параметров, обеспечивающее эквивалентность переходных процессов:

$$c_d=0 \text{ и } b_d=\frac{J_1(\alpha^2+\beta^2)}{E_1\alpha-E_2\beta}.$$

Поверхность отклика значений F_1 и F_2, в зависимости от параметров c_d и b_d, приведена на рис. 2, где коэффициент демпфирования принят равным $\xi=0{,}4$.

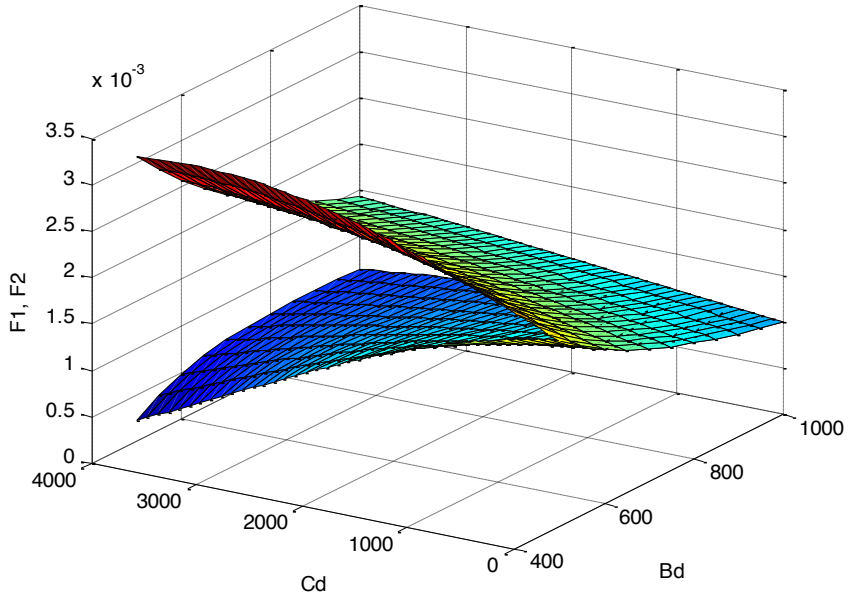


Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов F_1 и F_2 от параметров УДУ

Из рис. 2 видно, что равенство $F_1 = F_2$ соблюдается только при жесткости УДУ, равной нулю, причем линия пересечения двух плоскостей является условием полной эквивалентности (требуемым законам компенсации) обратных связей и предлагаемого УДУ. Увеличение c_d будет приводить к отклонению коэффициентов при временных функциях в (17) от желаемого вида. Методом подбора параметров установлено, что вариация параметров УДУ, а именно, изменение $c_d > 0$, позволяет сохранять эффект демпфирования колебаний, по сравнению с исходной системой, при соблюдении следующего соотношения: $F_1 - F_2 < 0.5D_1$.

Проверка эффективности предлагаемого метода синтеза параметров УДУ выполнялась путем численного моделирования уравнений (1)-(4) в среде MatlabSimulinkc учетом системы управления электроприводом, и показало его высокую эффективность.

Таким образом, выбранные значения параметров УДУ на основе концепции обратных задач динамики позволяют обеспечить желаемый закон изменения усилия в канате и тем самым учесть несколько противоречивых показателей качества переходных процессов. В тоже время проведенные исследования показали, что синтез параметров УДУ из условия полной эквивалентности законов компенсирующих воздействий по обратным связям и УДУ невозможен из-за физической не реализуемости системы (наличие демпфера вязкого трения без упругого элемента), а введение упругого элемента приводит к отклонению от желаемого закона изменения усилия M_{12}.

Заключение.

Результаты выполненных исследований показали, что синтез параметров УДУ на основе решения обратной задачи динамики по заданной во временной области кривой изменения упругого усилия в канате тягового механизма экскаватора, позволяет получить оптимальные значения конструктивных параметров подобных устройств, удовлетворяющие не одному, а нескольким противоречивым показателям качества переходных процессов. Найденные с помощью аналитических и численных исследований необходимые соотношения жесткости и демпфирования УДУ, обеспечат снижение динамических нагрузок в тяговом механизме экскаватора-драглайна и сокращение длительности переходных процессов, и тем самым будут способствовать повышению эффективности и надежности работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гранта № 0667-2020-0037 «Развитие научных основ эффективных процессов получения ценных элементов, веществ и материалов из отходов и техногенных и природных многокомпонентных смесей, включая методы конструкторско-технологического обеспечения».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wu H.* Modelling and Simulation of Electric Mining Shovels. Ph.D. thesis. McGill University. – Monreal, 1995. - 159 p.
2. *Hendricks C.* Performance Monitoring of Electric Mining Shovels. Ph.D. thesis. McGill University. – Monreal, 1990. – 386 p.
3. *Паначев И.А.* Исследование влияния грансостава взорванных горных пород на параметры надежности шагающих экскаваторов / И.А. Паначев, М.Ю. Насонов, А.П. Путятин // Вестник КузГТУ. – Кемерово, 2004. №1. С. 13-15.
4. Дефекты металлоконструкции карьерных экскаваторов / Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. А.П. Богданов [и др.]. 2015. № 11 (22).
URL: http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2775
5. *Свинарчук В.П.* Обоснование и выбор динамических параметров рабочего оборудования карьерных экскаваторов: дисс. канд. техн. наук: 05.05.06. – М., 2012. – 143 с.

6. *Соловьев С.В.* Зависимость динамики рабочего процесса карьерного драглайна от упруго - демпфирующих параметров привода его тягового механизма / С.В. Соловьев, Д.А. Кузиев // Уголь, 2014. № 2. С. 60 – 62.
7. *Kuznetsov N.K., Iov I.A., Iov A.A.* 2019 Reducing of dynamic loads of excavator *IOP Conf. Series: Journal of Physics* 1210 012075.
8. *Kuznetsov N.K., Dolgih E.S., Iov I.A.* 2019 Synthesis of Optimal Structures of the Motion Controller of Elastic Mechatronic Systems *International Multi-Conference on Industrial Engineering and ModernTechnologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia* 1-6.
9. *Дорф Р.* Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер. с англ. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.

УДК 622.232.8

КУЗНЕЦОВ Д.В.,
КОСОЛАПОВ А.И.
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Рассмотрены особенности современного состояния карьерного автомобильного транспорта для разработки рудных месторождений Севера. Приведены показатели позволяющие оценивать эффективность его работы. Предложен подход для определения эксплуатационной производительности. Установлена динамика уровня снижения производительности автосамосвалов в зависимости от срока эксплуатации, дальности перевозок, сопротивления движению, организационных простоев и времени года. Обобщены данные для оперативного прогнозирования и принятия решений.

Ключевые слова: суровые климатические условия**,** карьер, автосамосвал, экскаватор, производительность, расстояние, время, скорость.

KUZNETSOV D.V.,
KOSOLAPOV A.I.
Siberian Federal University, Krasnoyarsk

THE STUDY OF THE DYNAMICS OF PERFORMANCE OF OPEN-PIT DUMP TRUKS IN ORE MINING IN SEVERE CLIMATIC ENVIRONMENT

Abstract. This considers the features of the current state of open-pit motor transport for development of ore deposits in the North, it provides the indicators allowing to evaluate the efficiency of the transport performance and suggests an approach for determining the operational performance. Along with the above, the authors determined the dynamics of the level of decline in the performance of dump trucks depending on the service life, transportation distance, resistance to motion, organizational downtime and season, and summarized data for expeditious forecasting and operational decision making.

Keywords: severe climatic environment, open-pit, dump truk, excavator, performance, distance, time, speed.

За последние десятилетия автомобильный транспорт стал основным технологическим транспортом для открытой разработки месторождений полезных ископаемых. В настоящее время его доля среди других видов в Австралии почти равна 100 %, в США, Канаде, Южной Америке составляет около 85 %, в России превышает 75 %. Такое широкомасштабное применение связано с техническим совершенствованием машин и повышением экстремальности условий их эксплуатации, обусловленной природно-технологическими особенностями разработки месторождений [1].

Обзор мирового рынка карьерных автосамосвалов позволил выделить более 30 фирм производителей с количеством моделей от единиц до нескольких десятков [2].

Анализ развития открытых горных работ на рудных месторождениях в России свидетельствует о постоянном их смещении в удаленные северные территории, где колебания температуры воздуха достигают от +45°С (в июле) до -60°С (в декабре-январе), зима длинная с большим количеством снегопадов и метелей, а лето короткое с ливнями.

При этом глубина таких карьеров достигла 500-600 м и непрерывно растет, причем при высокой интенсивности наращивания производственной мощности [3].

Вместе с тем, практика показывает, что в рассматриваемых условиях на каждые 100 м понижения горных работ затраты на транспортирование пород самосвалами возрастают до 20-30 % и в большей степени на это влияет снижение производительности автосамосвалов. Однако прогнозирование производительности несмотря на широкое развитие имеющихся методов (от дискретного программирования, моделирования и др. до использования субъективного искусственного интеллекта) имеет множество неопределенностей и недостатков [4, 5].

Известно, что для определения годовой эксплуатационной производительности автосамосвала (Q, т) можно использовать формулу:

$$Q = \frac{q \cdot K \cdot T \cdot n \cdot N}{0{,}5 \cdot (L_1 + L_2)/v + t_0}, \quad (1)$$

где q – грузоподъемность автосамосвала, т; K – коэффициент использования сменного времени в работе, д.ед; T – продолжительность смены, ч; n – число рабочих смен в сутки; N – число рабочих дней в году; L_1 – дальность транспортирования в грузовом направлении, км; L_2 – дальность транспортирования в порожнем направлении, км; v – средняя техническая скорость движения; t_0 – суммарная продолжительность простоев в течение транспортного цикла (загрузка, разгрузка, маневрирование, ожидание), ч.

При учете использования определенного рабочего времени подобным образом производительность автосамосвалов возможно рассчитать в месяц, сутки или час.

Дополнительными показателями для оценки работы автомобильного транспорта на карьере являются: коэффициенты технической готовности и использования автомобильного парка; коэффициент использования грузоподъемности автосамосвалов; средняя техническая скорость движения автосамосвалов; средний пробег списочного автосамосвала в смену, сутки, год; расход топлива и смазочных материалов одним автосамосвалом [6, 7].

Вместе с тем системный учет факторов, определяющих производительность автосамосвала в динамике развития горных работ с учетом постоянного роста их глубины и усложнения транспортных схем карьеров, изменения в процессе эксплуатации машин их технической надежности и временного влияния сурового климата [3, 8] достаточно затруднителен и требует установления дополнительных зависимостей.

С учетом этого для любого оцениваемого периода времени эксплуатационную производительность автосамосвала ($Q^{/}$, т) авторами предложено определять по формуле:

$$Q^{/} = Q_{\max} \cdot (1 - Y_1/100) \cdot (1 - Y_2/100) \cdot (1 - Y_3/100) \cdot (1 - Y_4/100) \cdot (1 - Y_5/100), \quad (2)$$

где $Q_{\max}$ – максимальная теоретическая производительность автосамосвала; Y_1 – уровень снижения производительности в зависимости от технической надежности в течение срока эксплуатации, %; Y_2 – уровень снижения производительности в зависимости от расстояния транспортирования, %; Y_3 – уровень снижения производительности в зависимости от сопротивления движению, %; Y_4 – уровень снижения производительности в зависимости от простоев по организационным причинам, %; Y_5 – уровень снижения производительности в зависимости от влияния климатических условий, %.

При этом максимальная теоретическая производительность автосамосвала соответствует следующим наилучшим условиям перевозок: первому году эксплуатации (P = 1 год); горизонтальному участку с сопротивлением движению (w= 2 %) и протяженностью (L=0,5 км); наиболее благоприятному климатическому периоду.

Уровень снижения производительности представляет отношения фактической производительности в оцениваемых условиях к максимальной теоретической.

По результатам исследований [3] и данным норм технологического проектирования установлено, что по мере увеличения срока эксплуатации автосамосвала его производительность закономерно уменьшается. За первые три года работы машины на линии такое снижение достигает порядка 15 %, к пятому году до 30 % и после семи лет

составляет более 50 %. Причем, следует отметить, что при такой динамике производительности экономически целесообразный срок эксплуатации автосамосвалов составляет до 10 лет.

Производительность автосамосвала также во многом зависит и от продолжительности транспортного цикла (*t,* ч), определяемой затратами времени на движение в груженом и порожнем направлениях и суммарными организационными простоями:

$$t = t_1 + t_2 + t_0, \qquad (4)$$

где t_1 – время движения в груженом направлении, ч; t_2 – время движения в порожнем направлении, ч.

В свою очередь время движения в груженом и порожнем направлениях зависит от дальности транспортирования и соответствующей технической скорости.

С учетом этого проведены численные исследования, результаты которых в качестве примеров проиллюстрированы графиками (см. рисунок 1).

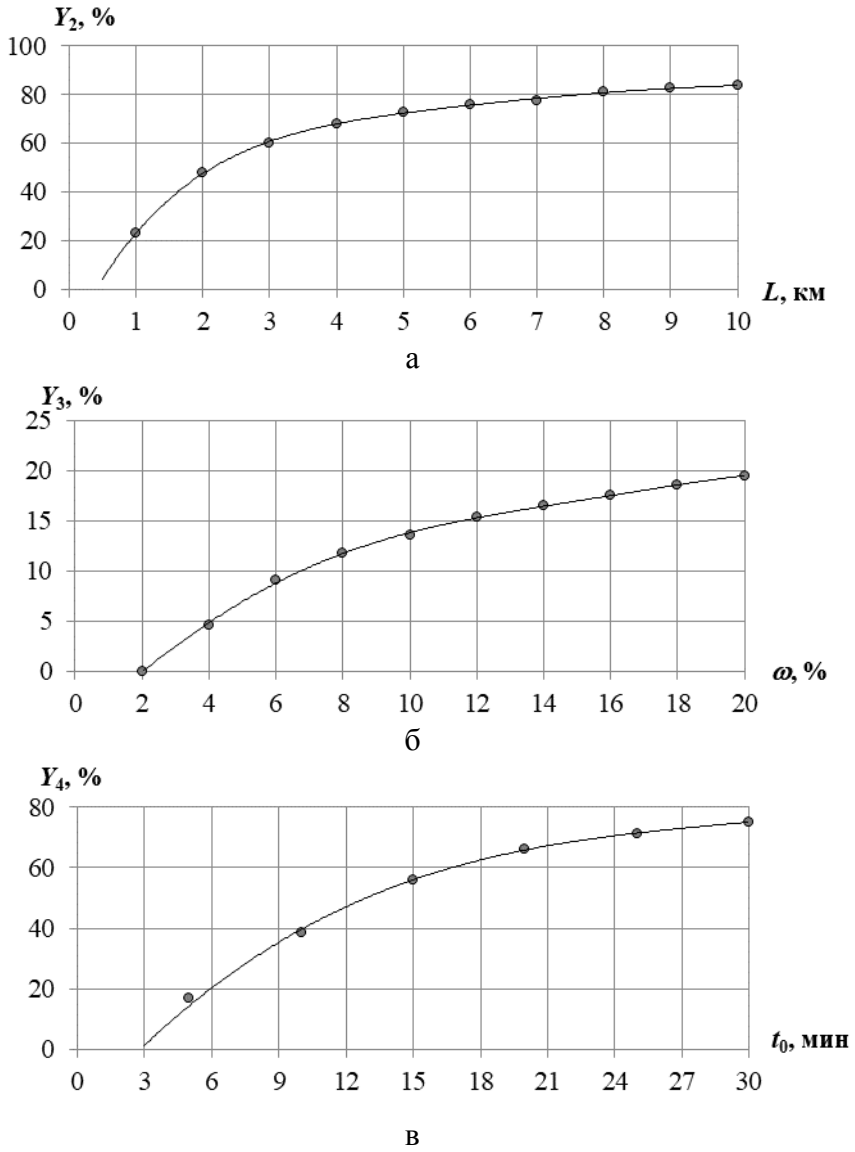


Рисунок 1. Средняя динамика уровня снижения производительности автосамосвалов в течение 3-го года их эксплуатации: а – при различии расстояния транспортирования (ω=2 %, t_0=8 мин); б – при различии сопротивления движению (L=1 км, t_0=8 мин); в – при различии организационных простоев во времени рейса (L=1 км, t_0=8 мин)

Исходя из практического опыта и многообразия условий эксплуатации карьерных автосамосвалов [9,10], дальность перевозок задана до 10 км, сопротивление движению до 20 %, продолжительность организационных простоев во времени рейса до 30 мин.

Сопротивление движению включает сопротивление от уклона, а также сопротивление качению, обусловленное инерцией вращающихся масс автомобиля (около 2 %) и качеством дорожного покрытия.

Суммарные организационные простои во времени транспортного цикла состоят из затрат времени на погрузку автосамосвала, маневрирование при загрузке и разгрузке, на ожидание загрузки и разгрузки. При этом затраты времени на погрузку автосамосвала зависят от его грузоподъемности, емкости кузова, характеристики пород, схемы работы в комплексе с экскаватором, и определяются исходя из количества загружаемых ковшей и времени рабочего цикла выемочно-погрузочного оборудования.

Исходя из практического опыта и многообразия условий эксплуатации карьерных автосамосвалов [9,10], дальность перевозок задана до 10 км, сопротивление движению до 20 %, продолжительность организационных простоев во времени рейса до 30 мин.

Сопротивление движению включает сопротивление от уклона, а также сопротивление качению, обусловленное инерцией вращающихся масс автомобиля (около 2 %) и качеством дорожного покрытия. Суммарные организационные простои во времени транспортного цикла состоят из затрат времени на погрузку автосамосвала, маневрирование при загрузке и разгрузке, на ожидание загрузки и разгрузки.

С учетом рассмотренных выше факторов на примере карьеров Олимпиадинского ГОКа, расположенных в Северо-Енисейском районе красноярского края, исследованы среднемесячные изменения производительности автосамосвалов в течение времени года см. рисунок 2). Горные работы здесь ведут уже более 30-ти лет. Для транспортирования пород используют автосамосвалы Caterpillar, Komatsu, Terex грузоподъемностью 90-220 т. В соответствии с нормативной классификацией климат района работ суровый. Минимальные зимние температуры воздуха (в декабре и январе) достигают -60°С, максимальные летние +34°С (в июле). Стабильный снеговой покров появляется в конце сентября и полностью исчезает в середине июня, его мощность достигает местами 3,5 м.

При этом оценка сезонной изменчивости производительности автосамосвалов показала, что её максимум соответствует августу и сентябрю. Наибольшее снижение производительности (до 20 %) происходит в холодный период декабря-марта, а снижение производительности в относительно теплый весенний период и в октябре-ноябре обусловлено ухудшением дорожных условий.

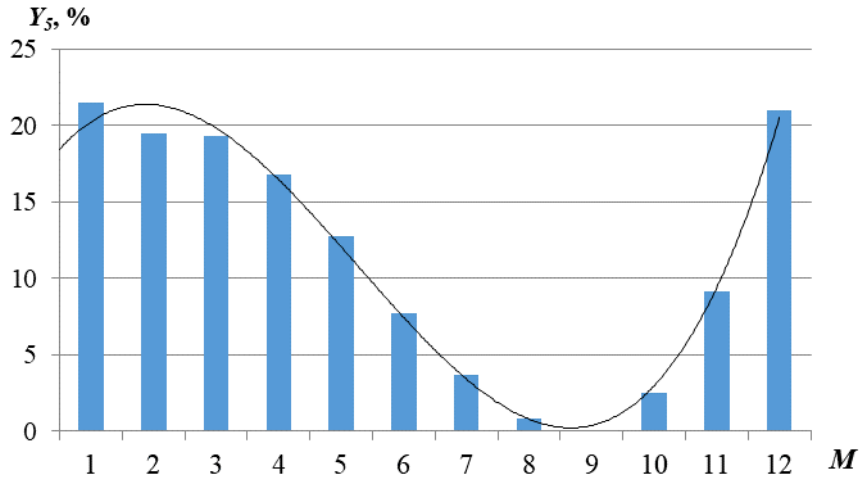


Рисунок 2. Средняя динамика уровня снижения производительности автосамосвалов в теченеие 3-го года их эксплуатации в условиях Олимпиадинского ГОКа (при L=7 км, ω=10 %, t_0=8 мин)

Таким образом, основными факторами, ограничивающими эксплуатационную производительность автосамосвалов, являются срок эксплуатации и техническая надежность, расстояние перевозок, уклон и состояние автодорог, схема организации работ и сочетание с экскавационным оборудованием, характеристики климата. Полученные результаты исследования (см. таблицу 1) показывают влияние этих факторов для возможных условий открытой разработки рудных месторождений, многообразия моделей автосамосвалов и с учетом сезонного воздействия сурового климата. Предложенный подход позволяет осуществлять оперативное прогнозирование производительности и принимать технологические решения.

Таблица 1.

Уровень снижения производительности автосамосвалов

***P*, лет**	***У*$_1$, %**	***L*, км**	***У*$_2$, %**	***w*, %**	***У*$_3$, %**	***t*$_0$, мин**	***У*$_4$, %**	***M***	***У*$_5$, %**
1-3	0-15	0,5-1	0-31	2-4	0-9	3-5	0-28	май-октябрь	0-10
3-5	15-29	1-2	31-57	4-6	9-14	5-10	28-61	апрель, ноябрь	10-15
5-8	29-57	2-3	57-69	6-8	14-17	10-15	61-70	декабрь-март	15-20
8-10	57-75	3-5	69-80	8-12	17-21	15-20	70-77	-	-
-	-	5-7	80-85	12-16	21-23	20-25	77-81	-	-
-	-	7-10	85-90	16-20	23-25	25-30	81-84	-	-

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кузнецов Д.В.* Особенности выбора технологического автотранспорта для разработки глубоких карьеров / Д.В. Кузнецов, Д.Г. Одаев, Я.Е. Линьков // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - №5. - С.54-65.
2. *Коптев В.Ю.* Обоснование выбора эффективной модели автосамосвала / В.Ю. Коптев // Современная техника и технологии. - 2014. - №5. - С.23-25.
3. *Кузнецов Д.* Комплексы оборудования для карьеров в суровых климатических условиях / Д. Кузнецов, А. Косолапов, Д. Малофеев. Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing. 2016. 135 с.
4. *Burt C.* Equipment Selection for Mining: With Case Studies / C. Burt, L. Caccetta. Cham: Springer International Publishing) 2018. p 155.
5. *Комленович Д.* Многокритериальный подход к выбору горного оборудования / Д. Комленович // Горное дело. - 2017. - №2. - С.10-19.
6. *Ржевский В.В.* Открытые горные работы. Производственные процессы / В.В. Ржевский. Москва: Либроком. 2010. - 512 с.
7. *Ржевский В.В.* Открытые горные работы. Технология и комплексная механизация / В.В. Ржевский. Москва: Либроком. 2010. - 551 с.
8. *Анистратов К.Ю.* Исследование показателей работы карьерных самосвалов для обоснования структуры парка и норм выработки автотранспорта / К.Ю. Анистратов, Л.В. Борщ-Компониец // Горная промышленность. - 2011. - №4(98). - С. 38-49.
9. *Тарасов П.И.* Дифференциация условий эксплуатации карьерных автосамосвалов / П.И. Тарасов, И.В. Зырянов, Е.В. Фефелов // Горная промышленность. - 2016. - №3(127). - С. 51-53.
10. *Кулешов А.А.* Проектирование и эксплуатация карьерного автотранспорта. Справочник / А.А. Кулешов // Санкт-Петербургский государственный горный институт. - 1995. - 203 с.

УДК 621.86

ЛАГЕРЕВ И.А.,
ЛАГЕРЕВ А.В.
Брянский государственный университет имени
академика И.Г. Петровского
ТАРИЧКО В.И.
Брянский автомобильный завод

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАБОТЕ МОБИЛЬНОГО ГРУЗОВОГО КАНАТНОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация. Грузовые подвесные канатные дороги являются эффективным видом транспорта в горной промышленности. Целью исследования является разработка метода моделирования рабочих процессов в механизмах движения несуще-тяговых канатов, оснащенных гидроприводами с частотно-дроссельным регулированием, на всех стадиях работы – стадиях разгона транспортируемого груза, установившегося движения и торможения. Рассматриваются односторонняя и двухсторонняя установка регулируемых дросселей относительно гидромотора. Разработанная математическая модель используется для компьютерного моделирования основных характеристик гидропривода – давлений и объемных расходов жидкости в характерных точках гидросистемы, а также кинематических и силовых параметров движения несуще-тяговых канатов (пройденного расстояния, линейной скорости и ускорения, требуемой мощности, преодолеваемых эксплуатационных нагрузок). Для конкретного варианта мобильного канатного комплекса были проведены расчеты указанных гидродинамических, кинематических и силовых параметров, выполнен анализ полученных результатов. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8.

Ключевые слова: мобильный канатный комплекс, канатная дорога, рабочие процессы, гидропривод, динамика, кинематика, компьютерное моделирование.

LAGEREV I.A.,
LAGEREV A.V.
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University
TARICHKO V.I.
Bryansk Automobile Plant JSC

MODELING OF HYDRODYNAMIC AND KINEMATIC WORKING PROCESSES DURING THE OPERATION OF A MOBILE CARGO ROPEWAY COMPLEX

Abstract. Freight suspended ropeways are an efficient type of transport in the mining industry. The aim of the research is to develop a method for modeling working processes in the mechanisms of movement of load-bearing and traction ropes equipped with hydraulic drives with frequency-throttle control at all stages of operation – the stages of acceleration of the transported cargo, steady movement and braking. One-way and two-way installation of adjustable throttles relative to the hydraulic motor are under consideration. The developed mathematical model is used for computer modeling of the main characteristics of the hydraulic drive – the pressure and volume flow of liquid at the characteristic points of the hydraulic system, as well as kinematics and power parameters of the movement of the ropes (the distance traveled, linear speed and acceleration, the required power, overcome operational loads). For a specific version of the

mobile ropeway complex, calculations of the specified hydrodynamic, kinematics and power parameters were performed, and the results were analyzed. The study was supported by President Grant for Young Russian Scientists No. MD-422.2020.8.

Keywords: mobile ropeway complex, ropeway, working processes , hydraulic drive , dynamics, kinematics, computer simulation.

1. ВВЕДЕНИЕ

Подвесные канатные дороги как системы надземного транспорта нашли широкое применение во многих странах мира в качестве непрерывного транспорта для организации грузовых и пассажирских перевозок [1, 2]. Большинство эксплуатирующихся канатных дорог относятся к стационарным канатным дорогам [3, 4], ориентированным на длительное использование в пределах места их установки. Однако известны конструкции мобильных канатных дорог, предназначенных для частого перебазирования вследствие технологических особенностей обслуживающихся ими производственных процессов [5].

Перспективной разновидностью мобильных канатных дорог являются мобильные канатные комплексы. Их оборудование размещается на базовых шасси - на колесных или гусеничных машинах высокой грузоподъемности и проходимости. Вследствие этого, мобильные канатные комплексы могут использоваться в тех местах или в тех условиях, когда невозможно или не целесообразно создание капитальных сооружений (мостов, эстакад, туннелей, насыпей) через различные преграды на территориях, предварительно не оборудованных для проведения транспортно-перегрузочных работ [6, 7].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидропривод механизма движения несуще-тягового каната мобильного канатного комплекса ориентирован на использование штатного двигателя внутреннего сгорания базовой машины. Работа объемного насоса гидропривода базируется на отборе мощности от штатного двигателя [10]. Это позволяет реализовать комбинированный частотно-дроссельный способ регулирования скорости движения несуще-тягового каната. Способ предусматривает возможность изменения частоты вращения выходного вала нерегулируемого насоса как путем изменения частоты вращения штатного двигателя базовой машины, так и путем изменения проходных сечений регулируемых дросселей.

Вариант гидравлической схемы, реализующей указанный способ регулирования, приведен на рис. 1. В данном варианте используется универсальная расчетная схема последовательной установки дросселей и гидромотора - односторонней установки при прямом и возвратном движении каната, а также двухсторонней установки.

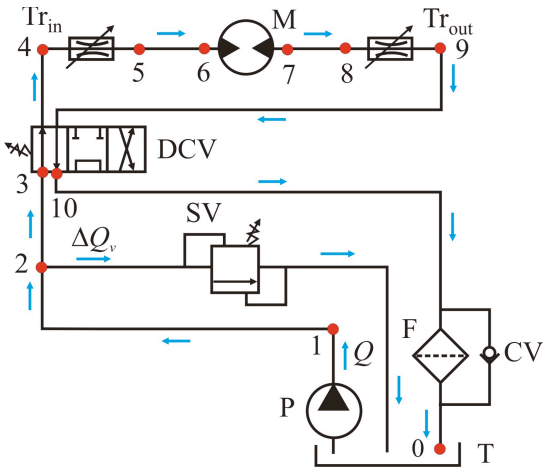


Рисунок 1 – Универсальная схема гидросистемы механизма движения канатной системы: CV – обратный клапан; DCV – гидрораспределитель; P – насос; SV – предохранительный клапан; T – гидробак; Tr – дроссель; F – фильтр

3. МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При построении математической модели гидропривода с частотно-дроссельным регулированием механизма движения канатной системы был использован подход на основе построения структурно-функциональных схем [8-10].

Структурно-функциональная схема, соответствующая приведенной на рис. 1 универсальной схеме гидросистемы, показана на рис. 2. На ней цифрами 0…10 обозначены расчетные точки j, в которых определяются параметры гидродинамических рабочих процессов при работе мобильного канатного комплекса – давление p_j и объемный расход Q_j рабочей жидкости. В точке j = 2 также определяется расход жидкости через предохранительный клапан ΔQ_v. На участках гидросистемы между соседними расчетными точками определяются потери давления $R_1,...,R_7$ (рис. 2). Они складываются из потерь давления в расположенных на этих участках гидроаппаратах и гидроустройствах, местных сопротивлениях и по длине гидролиний. Для вычисления $R_1,...,R_7$ используются известные зависимости [11]. Потери давления $R_{d,in}$ и $R_{d,out}$ определяются настройкой регулируемых дросселей.

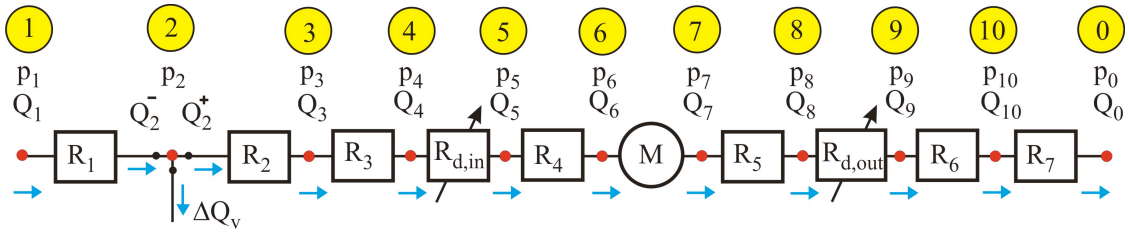


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема гидросистемы механизма движения канатной системы

Уравнение вращения выходного вала гидромотора механизма движения несуще-тягового каната имеет вид:

$$2\pi\left(\frac{J_{red}}{V_{hm}}\right)\dot{Q}_{hm} = V_{hm}(p_{in} - p_{out})/2\pi - M_{ol} - M_{br}, \qquad (1)$$

где J_{red} – приведенный к валу гидромотора момент инерции перемещаемого груза и движущихся элементов канатной системы; V_{hm} – рабочий объем гидромотора; $\dot{Q}_{hm}$ – скорость изменения во времени объемного расхода рабочей жидкости через гидромотор; p_{in}, p_{out} – давление рабочей жидкости на ходе и выходе гидромотора; M_{ol} – момент силы от эксплуатационных нагрузок, приведенный к валу гидромотора; M_{br} – приведенный момент силы торможения вала гидромотора, создаваемый дополнительным тормозом.

Решение дифференциального уравнения (1) в произвольный момент времени позволяет определить один гидравлический параметр – объемный расход рабочей жидкости $Q_{hm}(\tau)$, проходящий через гидромотор (он эквивалентен расходу на входе в гидромотор Q_6). На эту величину должно быть наложено ограничение: расход $Q_{hm}(\tau)$ не должен превышать объемную подачу насоса. С учетом этих ограничений записываются зависимости для определения расходов и давлений рабочей жидкости в расчетных точках универсальной структурно-функциональной схемы. Также учитываются гидравлические сопротивления элементов гидросистемы. Внешние усилия системы определяются с учетом подходов, изложенных в [12-15].

Разработанная математическая модель была реализована в компьютерной программе «Моделирование гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса с частотно-дроссельным регулированием».

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для тестовой оценки достоверности моделирования гидродинамических процессов в гидроприводе с частотно-дроссельным регулированием механизма движения несуще-тягового каната мобильного канатного комплекса была рассмотрена подвесная канатная система маятникового типа длиной L_{tr} = 200 м для транспортирования единичного груза весом G = 100 кН. В качестве гидромотора был взят нерегулируемый аксиально-поршневой гидромотор типа 210.20. На стадии разгона длительностью τ_{ov} = 10 с частота вращения выходного вала насоса изменялась по линейному закону (в об/мин):

$$n_{pump}(\tau) = 100 + 150\tau,$$

а на стадии торможения с длиной тормозного пути x_{br}^{n} = 10 м (при x = 190…200 м) – по линейному закону (в об/мин)

$$n_{pump}(x) = 1600 - 110x.$$

На стадии торможения (при x = 195…200 м) действовал создаваемый дополнительным тормозом момент силы торможения вала гидромотора M_{br}=100 Н·м.

На рис. 3 показаны графики изменения основных кинематических характеристик механизма движения каната на стадиях разгона и торможения.

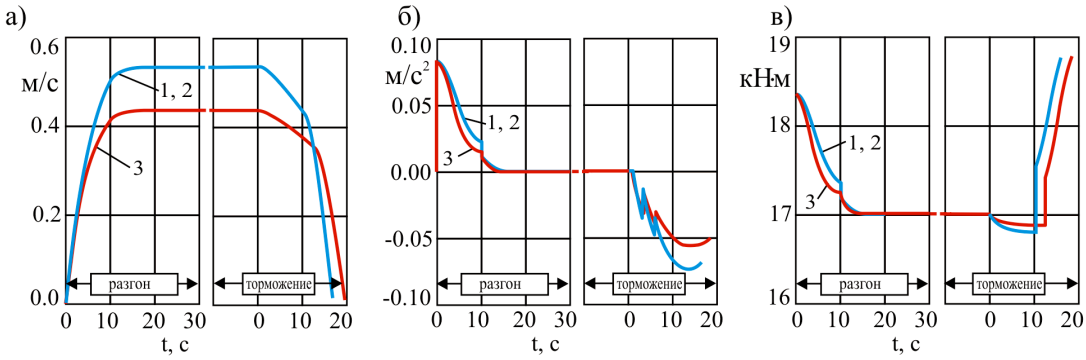


Рисунок 3 – Кинематические характеристики механизма движения каната на стадиях разгона и торможения:
а – скорость каната; б – ускорение каната; в – крутящий момент на приводном шкиве;
1 – односторонняя установка дросселя, прямое движение;
2 – односторонняя установка дросселя, возвратное движение; 3 – двухсторонняя установка дросселей с одинаковой настройкой

Для схем с односторонней установкой регулируемого дросселя характеристики для прямого и возвратного движения каната полностью совпадают. При одинаковой величине регулировки дросселей схема с односторонней установкой обеспечивает более высокую скорость стационарного движения (рис. 3, а) по сравнению со схемой с двухсторонней установкой дросселей (0,50 м/с против 0,43 м/с) и меньшее время транспортировки груза между конечными станциями (6,7 мин против 7,8 мин). Это объясняется большим расходом жидкости, проходящим через гидромотор при односторонней установке дросселя, и меньшими потерями жидкости через предохранительный клапан.

Для схем с односторонней установкой регулируемого дросселя графики изменения давления для прямого и возвратного движения каната не совпадают. Однако это не сказывается на величине перепада давления на гидромоторе, Поэтому кинематические характеристики движения оказываются одинаковыми независимо от направления движения каната. Скачки давления на входе гидромотора объясняются гистерезисом предохранительного клапана при переходе с открытия на закрытие и обратно.

Характерной особенностью работы всех вариантов гидравлических схем с последовательной установкой регулируемых дросселей относительно гидромотора является непрерывная работа предохранительного клапана, обеспечивающего

непрерывный слив части рабочей жидкости в гидробак в обход гидромотора. Это негативное свойство схем с последовательной установкой дросселей, так как вызывает снижение энергоэффективности работы гидропривода с частотно-дроссельным регулированием механизма движения несуще-тягового каната мобильного канатного комплекса.

5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Представленные в данном исследовании математические модели и компьютерная программа для моделирования гидродинамических процессов в гидроприводе с частотно-дроссельным регулированием при последовательной установке регулируемых дросселей позволяют установить количественную взаимосвязь между гидродинамическими и кинематическими процессами при работе механизма движения несуще-тягового каната. Это способствует повышению качества проектирования гидроприводов мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Scheingert Z.* Aerial Ropeways and Funicular Railways / Oxford: Pergamon Press, 1966. - 555 p.
2. *Vuchic V.R.*. Urban Transit Systems and Technology / NY: John Wiley & Sons, Inc., 2007. - 602 p.
3. Freight ropeways Available: https://mirinteresen.net/1175-gruzovye-kanatnye-dorogi.html.
4. *Lagerev I.A., Lagerev A.V.* 2018 Increasing the operating life of hinge lugs in manipulators of mobile transportation and production machines *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 194 042012.
5. *Beňo P.,* Krilek J., Kováč J., Kozak D., Fragassa C. 2018 The Analysis of the New Conception Transportation Cableway System Based on the Tractor Equipment *FME Transactions* 46 17-22.
6. *Winter J.A., Sesma I., Funda M.* 2016 Case Study of Cable-Propelled Transit to Be an Alternative Application to Conventional Means of Public Transportation *15th Int. Conf. on Automated People Movers and Automated Transit Systems*.
7. M-300 EN-2000. Mandate for standardisation addressed to CEN, CENELEC and ETSI in the field of cableway installations designed to carry persons.
8. *Krasnyy V.A.,* Maksarov V.V., Olt J. 2016 Increase of wear and fretting resistance of mining machinery parts with regular roughness patterns *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium* 27(1) 151-156.
9. *Skibin G.M., Shutova M.N., Evtushenko S.I., Chutchenko I.A.* 2017 Reliability increase of running gears elements of mining traction locomotives using finite–element analysis package *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 87 022021.
10. *Таричко В.И.* Комплексная математическая модель мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса / В.И. Таричко, А.В. Химич // Научно-техничексий вестник Брянского государственного университета, 2019. №4. С. 523-532.
11. *Ettema E.R.*. Hydraulic Modeling: Concepts and Practice / New York. ASCE, 2000. - 287 p.
12. Conveyor Belts. System design calculation. Service Manual. Hannover: Conveyor Belt Group, 2008. - 140 p.
13. *McGuire P*. Conveyors: application, selection, and integration / Boca Raton: CRC Press, 2010. - 182 p.
14. *Khoroshev A.S., Pavlenko A.V., Korotky A.A., Tchoutchkin D.A., Puzin V.S., Khorosheva E.V.* 2017 The use of magnetic marks in steel wire ropes / A.S. Khoroshev *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 177 012072.
15. *Lagerev A.V., Lagerev I.A.* 2019 Design of Passenger Aerial Ropeway for Urban Environment *Urban Rail Transit* 5 17-28.

УДК 62-51

МАКЕНОВА А.,
ОМУРАЛИЕВ У.К.
Кыргызский Государственный Технический
Университет им. И. Раззакова

АНАЛИЗ БИЗНЕС ПРОЦЕССОВ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗИФ

Аннотация: в статье рассматривается анализ современных способов мониторинга технологического процесса на территории золотоизвлекательной фабрики и возможность модификации и улучшения способов автоматического контроля состояния и работы оборудования.

Ключевые слова: мониторинг, современные технологии мониторинга, золотоизвлекательная фабрика (ЗИФ), горнорудное производство, датчики, автоматизация производства, эффективность работы оборудования, способы контроля технологического оборудования.

MAKENOVA A.,
OMURALIEV U.K.
Kyrgyz State Technical University. I. Razzakov

ANALYSIS OF BUSINESS PROCESSES OF MONITORING TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF MILL

Abstract. The article discusses the analysis of modern methods of monitoring the technological process on the territory of a gold-mining factory and the possibility of modifying and improving methods for automatically monitoring the condition and operation of equipment.

Keywords: monitoring, modern monitoring technologies, a mining plant, a gold-mining factory, mining, sensors, automation of production, equipment operating efficiency, methods of monitoring technological equipment.

Проблемы ремонтов в условиях горнорудного предприятия занимают особое положение и играют специфическую роль. Золотоизвлекательная фабрика имеет ряд особенностей.

Это, во-первых, прямая зависимость качества извлекаемой продукции от состояния и надежности работы технологического оборудования. Износ основного технологического оборудования обусловливает высокий выход брака. Также высокогорное расположение золотоизвлекательной фабрики вносит усложнения в функционирование технологического оборудования, вынуждая его работать под определенным давлением.

Во-вторых, существенные потери из-за брака и внеплановых (аварийных) простоев агрегатов. Анализ количества, продолжительности аварийных простоев и убытков по агрегатам это подтверждает.

В-третьих, уникальность, высокая стоимость агрегатов и достаточно продолжительный нормативный срок службы (до 25 лет) связаны с высокими затратами на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) и снижением качества добычи золота при предельных сроках эксплуатации оборудования. Фактический срок эксплуатации, как правило, превышает нормативный период службы за счет различных вариантов обновления агрегатов. В этих условиях планирование мероприятий по ТОиР

сопровождается лимитом ресурсов и необходимостью обеспечения качества продукции.

В-четвертых, отсутствие параллельных технологических схем на фабрикеи критичность некоторых агрегатов. Любая остановка оборудования приводит к потерям производства и снижению извлечения золотого концентрата.

Исходя из этого, анализ состояния оборудования является отправным моментом при разработке стратегии воспроизводства основных фондов. Для выполнения анализа необходимо проведение мониторинга состояния технологического оборудования. Мониторинг предполагает создание информационной базы, достоверно отражающей фактическое состояние основного технологического оборудования. В настоящее время в большинстве промышленных предприятиях контроль за состоянием технологического оборудования не имеет системного характера и осуществляется различными управленческими структурами, зачастую дублирующими друг друга. Нередко выявляются ситуации отсутствия достоверной информации о состоянии технологического оборудования. В связи с этим представляется целесообразной организация мониторинга как инструмента снижения уровня затрат на ТОиР. Мониторинг физического состояния технологического оборудования должен включать следующие этапы: формирование нормативно-справочной информации; формирование информационной базы о реальном состоянии технологического оборудования; непосредственно мониторинг физического состояния технологического оборудования; поддержание информационной базы в актуальном состоянии.

Нормативно-справочная информация должна включать в себя справочник состава технологического оборудования и информацию, отражающую реальное состояние объектов основных средств [0].

Детализация машин и оборудования до уровня узлов и деталей позволяет обосновать плановую потребность в запасных частях, обосновать нормы и нормативы запасов и установить плановую потребность в материальных ресурсах для выполнения ремонтных работ.В течение года техническое обслуживание и ремонт проводятся по системе ТОиР исходя из фактического состояния технологического оборудования, в пределах лимитов, выделенных на эти цели каждому производственному подразделению. При этом снижение потерь от аварийных простоев технологического оборудования предприятие пытается компенсировать увеличением запаса деталей и узлов. Для устранения приведенных недостатков необходимы сведения о реальном состоянии технологического оборудования. Информационная база о реальном состоянии технологического оборудования должна содержать данные результатов измерений уровня технических параметров, полученных в ходе мониторинга. Она включает справочник состояния технологического оборудования и справочник интенсивности использования данного оборудования.

Система управления и планирования ремонта и технического обслуживания основного технологического оборудования должна включать допустимый диапазон затрат на техническое обслуживание и ремонты оборудования, ограниченный лимитами ресурсов, заложенных в бюджете предприятия на эти цели, а также комплекс технико-экономических показателей, позволяющий оценить текущее состояние оборудования и выявить необходимость проведения его технического обслуживания или ремонта. В комплекс технико-экономических показателей входят:

- показатели состояния технологического оборудования: температура деталей и узлов (норма и факт); дефекты (наименование дефекта и его уровень); степень износа; длительность межремонтного периода; коэффициенты интенсивного, экстенсивного и интегрального использования оборудования;
- срок использования технологического оборудования (нормативный, оптимальный и фактический);
- амортизационные отчисления (ежегодные и накопленные за фактический срок использования);

- затраты на ТОиР (верхний и нижний пределы затрат на ремонт и межремонтное обслуживание; ежегодные фактические и накопленные затраты на ТОиР технологического оборудования).
- суммарные затраты на воспроизводство технологического оборудования (амортизационные отчисления и затраты на ТОиР).

Для выполнения установленной нормы добычи золотосодержащей руды, с последующей обработкой, ЗИФ работает непрерывно 24 часа в сутки. Очень важно поддерживать непрерывную работу ЗИФ каждый день для извлечения как можно большего количества золота из руды, которая проходит через нее. Для этого осуществляется 11 различных технологических ступеней (рис. 1):

1. Дробление,
2. Рудный отвал,
3. Измельчение,
4. Флотация,
5. Доизмельчение,
6. Выщелачивание,
7. Угольная адсорбция,
8. Десорбция угля,
9. Электролиз,
10. Плавка,
11. Удаление хвостов.

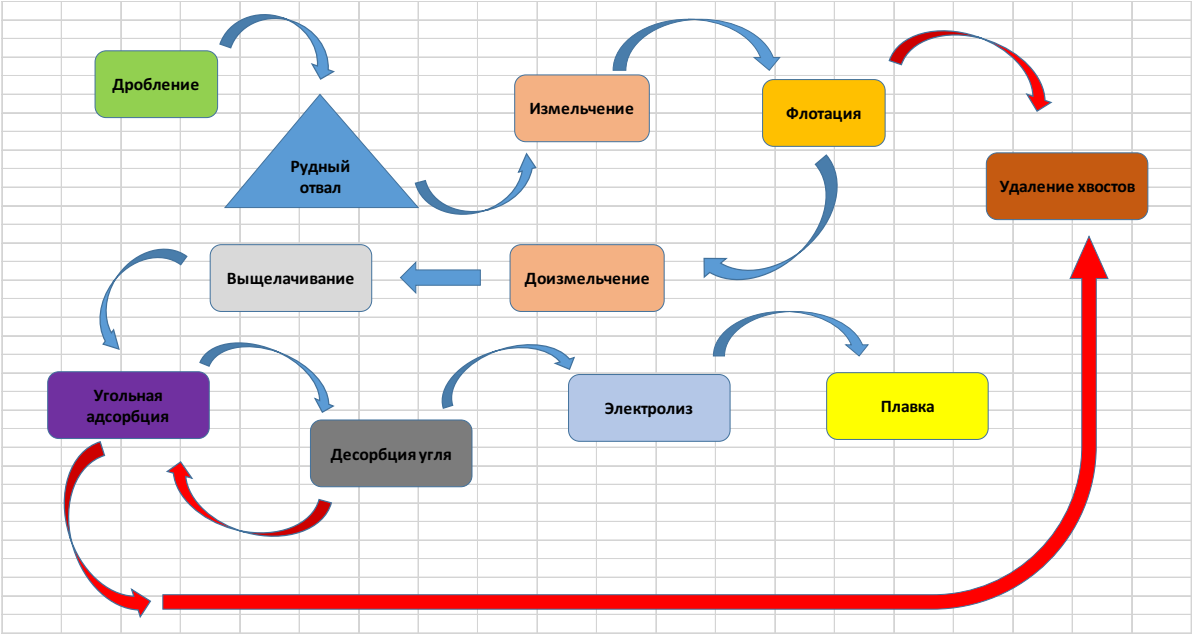


Рисунок 1 – Технологические ступени добычи золотосодержащей руды

Системы мониторинга состояния технологического оборудования позволяют проводить раннюю диагностику и обнаружение неисправностей механизмов и промышленных систем в режиме реального времени. Своевременное выявление и локализация таких неисправностей создает возможности для оптимизации запасов запчастей, более точного планирования времени простоя оборудования с целью проведения планового технического обслуживания и внесения корректировок в работу механизмов, которые могут продлить срок службы оборудования.

Такие параметры, как вибрация, ток и температура, дают представление о состоянии оборудования, к которому относятся различные механизмы от двигателей и насосов до подшипников. Измеренные вибрационные параметры также являются дополнительным источником данных, позволяющим отделить механический шум от

электрического, что еще больше улучшает качество диагностики механизма.

Использование этих данных о состоянии оборудования приводит к повышению производительности и эффективности работы механизмов, а также увеличению времени безотказной работы, ускоряя тем самым переход к Индустрии 4.0 [0, 3].

В последние годы ЗИФ успешно использует различные системы онлайн-контроля состояния технологического оборудования, одним из которых является система FoxboroEvo™. Система автоматизации производства FoxboroEvo представляет собой мощную платформу для повышения изащиты объема производства, а также нормативного контроля непрерывных и периодических операций. Обладая большими возможностями по сравнению с традиционной системой распределенного управления (DCS), система обеспечиваетстратегическую интеграцию базовых компонентов промышленной системы управления, а именно: высокопроизводительный, высокодоступный управляющий процессор, который легко интегрируется с усовершенствованным программным обеспечением; мощную систему с входами/выходами, включающую программно настраиваемую сортировку; пользовательский высокоэффективный человеко-машинный интерфейс, снабженный улучшенной графикой ситуативной информированности; встроенную систему безопасности в киберпространстве; интуитивно понятные средства проектирования на основе ролей доступа; единый контроль и безопасность благодаря интеграции с лидирующей в отрасли системой безопасности Triconex; интеллектуальную, интерактивную панель технического обслуживания [4].

Измерение параметров вручную портативными средствами имеет ряд недостатков, а именно: высокие расходы на специалистов;сложные производства требуют много точек измерения; необходимость периодической инспекции состояния во всех точках; сокращенный интервал проверки по критическим точкам требует большее количество персонала.

Создание систем, которые предоставляют точную информацию, позволит понять и решать задачи, связанные с состоянием оборудования на уровне предприятия, системном уровне и уровне встраиваемой электроники. В ассортимент технологий и комплексных решений входят:

Датчики и сигнальные цепи. Поскольку аналитическая информация будет настолько полезной, насколько будут качественны данные, высокоточные датчики (в том числе инерциальные МЭМС-датчики, датчики температуры и датчики магнитного поля), а также поддерживаемые сигнальные цепи обеспечивают получение точных и надежных данных.

Встраиваемое программное обеспечение. При разработке встраиваемых систем необходимо учесть все требования к дискретизации и обработке сигналов, чтобы гарантировать то, что полученные с датчика данные будут оптимальными для принятия важных решений. Интегрированные модули используют оптимизированные методы обработки сигналов для поддержания точности датчика, предупреждая о признаках возникновения проблем в механизмах и системах, тем самым сводя к минимуму количество ложных тревог.

Алгоритмы и аналитическая информация. Высококачественные, надежные данные открывают путь для алгоритмов, позволяющих получать аналитическую информацию о механизмах, благодаря которой можно диагностировать и прогнозировать работу оборудования. Возможность выявления в режиме реального времени различных аномалий и событий позволяет усовершенствовать решения для мониторинга состояния и обеспечивает более глубокое понимание состояния механизма в целом, помогая принимать действенные решения.

Чертежи механических систем. Оптимизированные решения для мониторинга состояния оборудования должны учитывать механические особенности монтажа и места крепления датчиков, чтобы гарантировать то, что решения на основе датчиков смогут выявить ранние признаки возникновения дефектов механизма.

Использование данных технологий хоть и очень эффективны для мониторинга оборудования, при этом имеет ряд сложностей при реализации на производстве. Один из важных факторов является платежеспособность предприятия. Приобрести один процессор от системы автоматизации производства FoxboroEvo, без учета прилагающих к нему датчиков и услуг установки и подключения к общей системе,требует не малую сумму.

Несмотря наличие у ЗИФ хорошего бюджета на техническое обслуживание, всего лишь 40% оборудования находится под контролем системы FoxboroEvo, в основном, это критическое оборудование и основные процессные насосы, которые требуют постоянного мониторинга. Остальные 60% находятся под ручным и визуальным контролем. Данным мониторингом занимается отдел неразрушающегося контроля. В основном преобладают два типа обслуживания – превентивное обслуживание и обслуживание по состоянию.

Превентивное обслуживание предусматривает выполнение действий по расписанию в зависимости от времени или наработки оборудования, контроль износа с целью увеличения жизненного цикла оборудования, что способствует продлению жизни и увеличение надежности оборудования.

При обслуживании по состоянию измерения выявляют износ, возникает возможность исключить рутинные операции и мгновенного обнаружения значительного износа; результаты определяют текущую и будущую возможность функционирования.

На основании проведенного анализа основных технологических процессов ЗИФ определены производственные факторы, оказывающие негативное воздействие на качество извлекаемой продукции от состояния и надежности работы технологического оборудования. Актуальность мониторинга состояния технологического оборудования предполагает создание информационной базы, достоверно отражающей фактическое состояние не только основного и критического, но и всё оборудование на производстве. Учитывая непрерывную работу ЗИФ и важность каждой технологической ступени процесса извлечения золота, мониторинг за каждым участком имеет огромное влияние на конечный результат. При этом система управления и планирования ремонта и технического обслуживания основного технологического оборудования должна включать допустимый диапазон затрат на техническое обслуживание и ремонты оборудования, ограниченный лимитами ресурсов, заложенных в бюджете предприятия на эти цели.

Система автоматизации производства FoxboroEvo хоть и представляет собой мощную платформу для повышения изащиты объема производства, а также нормативного контроля непрерывных и периодических операций, является очень дорогостоящим методом мониторинга. Ручной и визуальный контроль имеет недостатки, обусловленные не только дороговизной использования человеческих ресурсов, но и влиянием человеческого фактора на точность результатов контроля.

Отсюда следует вывод, что совершенствование системы мониторинга технологического оборудования не только актуален, но и технологически возможен. Улучшение системы мониторинга за оборудованием в ЗИФ позволит уменьшить влияние как человеческого фактора на процесс и результат мониторинга, так и благоприятно повлияет на расходы предприятия на техническое обслуживание.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорман В.Н., Баскакова. Н.Т.* Анализ состояния оборудования как инструмент снижения расходов на ремонты.
https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-oborudovaniya-kak-instrument-snizheniya-rashodov-na-remonty
2. Мониторинг состояния оборудования.
https://www.analog.com/ru/applications/markets/industrial-automation-technology-pavilion-home/condition-based-monitoring.html

3. *Абышев О.* Разработка системы принятия решений на основе данных мониторинга технологического оборудования / О. Абышев, У.К. Омуралиев, Е.И. Яблочников. – Бишкек: Известия КГТУ им. И. Раззакова, 2018. № 46. С. 15-23.
4. FoxboroEvo – система автоматизации производства.
https://www.se.com/ru/ru/product-range-presentation/63680-foxboro-evo-%E2%80%93-%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0-%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0/

УДК 621.865.8; 681.511

МЕШКОВСКИЙ Е.О.,
ФРОЛОВ В.Я.,
КУРМАШЕВ А.Д.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЧЕТЫРЁХКОЛЁСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Аннотация. Рассмотрена задача построения системы управления электроприводами четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками. В процессе синтеза системы была учтена несимметричность расположения приводных блоков, что даёт возможность учитывать различные конфигурации конструкции при выполнении траекторной движения корпуса робота. Итоговую систему возможно масштабировать для осуществления стабилизации контурного перемещениямобильных роботов с числом поворотных блоков больше двух. В заключении приведены результаты численных экспериментов по построению траектории движения, расчётов заданий углов положения поворотных блоков и работы системы управления исследуемого колёсного робота при различных конфигурациях.

Ключевые слова: колёсный робот; дифференциальный приводной блок; нелинейное управление электродвигателями; контурное движение; контроль траектории.

MESHKOVSKIY E.O.,
FROLOV V.YA.,
KURMASHEV A.D.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

CONROL OF ELECTRIC DRIVE OF FOUR-WHEEL MOBILE ROBOT

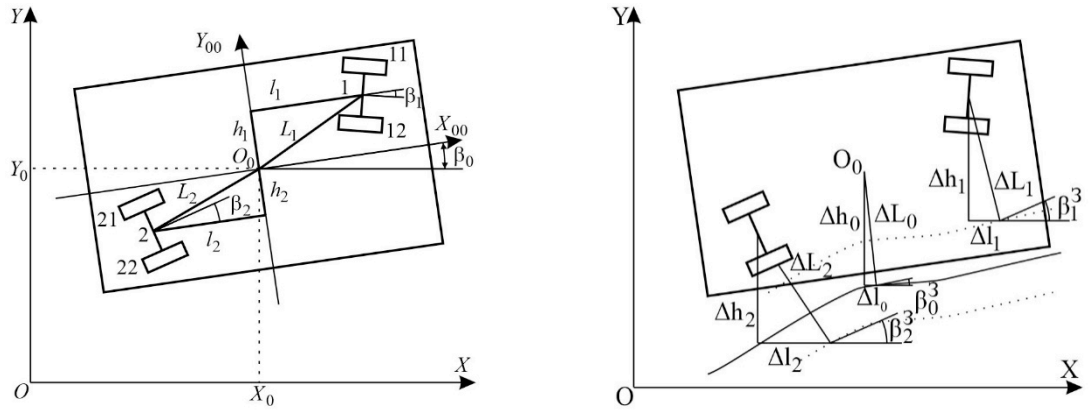
Abstract. The task of constructing a four-wheel mobile robot electric drive control system with two differential drive units is considered. During the synthesis of the system, the asymmetric arrangement of the drive units was taken into account, which makes it possible to take into account various configurations of the structure when performing the trajectory movement of the robot body. The final system can be scaled to stabilize the contour movement of mobile robots with more than two rotary blocks. The article concludes with the results of numerical experiments on constructing a trajectory of motion, calculating the tasks of the position angles of the rotary blocks and the operation of the control system of the wheeled robot under study for various configurations.

Keywords:mobile robot; differential drive unit; nonlinearmotorcontrol; contour movement; trajectory control.

На сегодняшний день, мобильные роботы охватывают всё больше областей применения. В горнодобывающей промышленности их используют с целью обезопасить человека, увеличить производительность технологического процесса [1-6]. Основной задачей, для которой применяют мобильные роботы, является перемещение по заданному маршруту (траектории) с необходимой скоростью перемещения (контурная скорость) [7-9]. Для выполнения поставленной задачи следует синтезировать такие системы управления, которые позволяют совершать перемещение с минимальными

отклонениями.В данной работе представлены результаты построения нелинейной системы управления электроприводами четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками.

Исследуемый мобильный робот представляет из себя многоприводный объект, расположенный на двух дифференциальных приводных блоках.Поворотный блок состоит из двух колёс, оси вращения которых располагаются на одной прямой; колёса осуществляют вращение за счёт электродвигателей, соединённых с валом колеса; приводной блок способен вращаться вокруг точки крепления к корпусу за счёт разности скоростей электроприводов. Приводные блоки могут располагаться несимметрично относительно центра корпуса. Схема описанного робота представлена на рис. 1, а.



a b

Рисунок 1 - Исследуемый колёсный робот с двумя дифференциальными поворотными блоками:
a – упрощённая схема; b – величины, вычисляемые блоком контроля траектории

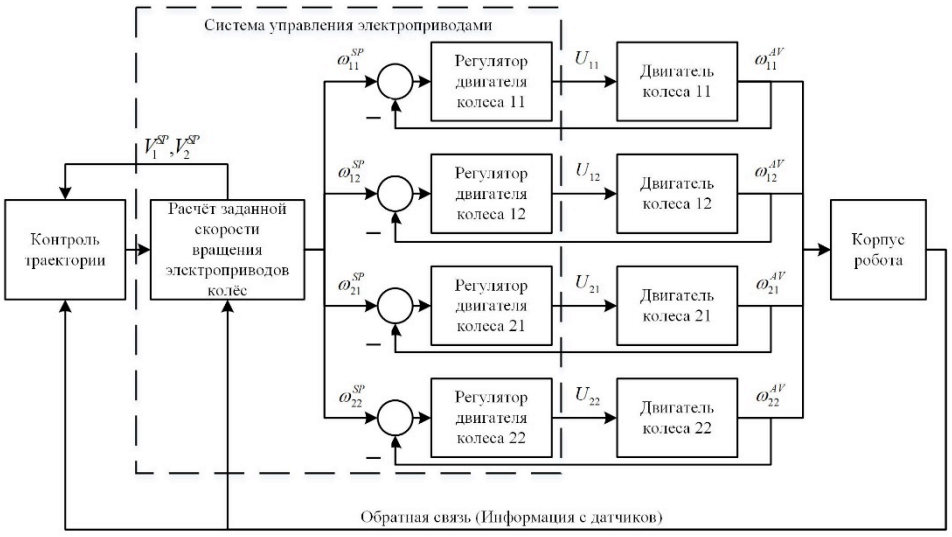


Рисунок 2 – Структура синтезируемой системы управления

Обозначения на рис. 1, а: OXYZ – глобальная неподвижная система координат, $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$ – локальная подвижная система координат, связанная с центром симметрии корпуса робота; 1, 2 – точки крепления поворотных блоков к корпусу; 11, 12, 21, 22 – колёса робота; $L_1 = [l_1, h_1]^T$, $L_2 = [l_2, h_2]^T$ – векторы, соединяющие центр корпуса робота O_0 с точками крепления поворотных блоков 1 и 2, состоящие из проекций на оси системы координат $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$; X_0, Y_0 – координаты центра корпуса робота в неподвижной системе координат OXYZ; β_0 – угол поворота корпуса робота (между неподвижной системой координат OXYZ и подвижной $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$); β_1, β_2 – углы положения поворотного блока 1 и 2 в подвижной системе координат $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$.

Необходимо построить систему управления электроприводами мобильного робота, способную стабилизировать центр корпуса вдоль заданной траектории. Обратной связью будут данные с датчиков: скорости вращения электроприводов колёс $\omega_{11}^{AV}, \omega_{12}^{AV}, \omega_{21}^{AV}, \omega_{22}^{AV}$ (номер в нижнем индексе указывает на номер колеса согласно рис. 1, а), углы положения поворотных блоков относительно корпуса $\beta_1^{AV}, \beta_2^{AV}$ скорость перемещения корпуса в пространстве V_0^{AV}, координаты центра корпуса $S_0^{AV} = \left[X_0^{AV}, Y_0^{AV}\right]^T$ и угол положения корпуса β_0^{AV} в глобальной системе OXYZ. Общую структуру синтезируемой системы управления можно увидеть на рис. 2.

При проектировании системы управления используем утверждение, вытекающего из геометрии мобильного робота: для стабилизации траекторного движения центра корпуса достаточно, чтобы точки крепления поворотных блоков перемещались вдоль контура с минимальными отклонениями. По этой причине, блок контроля траектории передаёт в подсистему управления электродвигателями векторы $\Delta L_1 = [\Delta l_1, \Delta h_1]^T$, состоящие из продольных и поперечных отклонений от траектории, задания углового положения β_i^{SP} и заданную контурную скорость V_0^{SP} (нижний индекс *I* указывает принадлежность: 0 – центр симметрии корпуса; 1, 2 – точка крепления поворотных блоков 1 и 2). Перечисленные величины изображены на рис. 1, b. Подсистема управления электроприводами вычисляет заданные скорости вращения электродвигателей колёс и производит их регулирование при помощи фазных напряжений.

Основной способ, используемый для описания траектории, заключается в аппроксимации исходной кривой маршрута кусочно-непрерывной функцией *f(s)* в параметрической форме от перемещения s. Система управления в целом является дискретной с фиксированным интервалом вызова Δt. Поэтому, расчёт пройденного пути центра корпуса и точек крепления поворотных блоков производится через приращение произведения заданной скорости V_i^{SP} и интервала вызова Δt:

$$s_i = s_i^* + V_i^{SP} \cdot \Delta t,$$

где s_i – пройденный путь; s_i^* – путь на предыдущем временном интервале.

Заданные углы положения векторов скоростей элементов колёсного робота можно найти как:

$$\beta_i^{SP} = \arctan\left(\frac{Y_i - Y_i^*}{X_i - X_i^*}\right), \quad (1)$$

где $S_i^{SP} = f(s) = \left[X_i, Y_i\right]^T, S_i^* = f(s_i^*) = \left[X_i^*, Y_i^*\right]^T$ – координаты точки траектории на текущем и предыдущем временных интервалах.

Векторы отклонений точек корпуса от траектории можно определить как:

$$\Delta L_i = R\left(\beta_i^{SP}\right) \cdot \left(S_i^{SP} - S_i^{AV}\right) = R\left(\beta_i^{SP}\right) \cdot \left(S_i^{SP} - \left(S_0^{AV} + R\left(-\beta_0^{AV}\right) \cdot L_i\right)\right), \quad (2)$$

где R(α) – матрица поворота [10, с. 56] на угол α; · – оператор умножения матрицы на вектор-столбец. Для центра корпуса $L_0 = [0.0, 0.0]^T$.Матрица поворота R(α) в (2) используется для определения величин отклонений относительно касательной к траектории в рассчитываемой точке. Применяя (1) и (2), можно получать задания углов положения корпуса робота и поворотных блоков, а также отклонения от программной траектории.

Подсистему управления электроприводами начнём синтезировать с контура стабилизации центра корпуса вдоль траектории. Будем производить контроль угла положения корпуса β_0 и регулирование задания контурной скорости V_0^{SP}:

$$\begin{cases} \omega_0^{cor} = K_0^{\beta} \cdot \left(\beta_0^{SP} - \beta_0^{AV} \right), \\ V_0^{cor} = \begin{cases} V_0^{SP} \cdot \left(1 - \dfrac{\Delta l_0}{2 \cdot \Delta l_0^{\max}} \right), & \text{при } \left| \Delta l_0 \right| < \Delta l_0^{\max}, \\ V_0^{SP} \cdot \left(1 - \dfrac{\operatorname{sgn}\left(\Delta l_0 \right)}{2} \right), & \text{иначе,} \end{cases} \end{cases} \tag{3}$$

где $\omega_0^{cor}, V_0^{cor}$ – задания угловой и продольной скорости корпуса робота с учётом корректировки; $\Delta l_0^{\max}$ – максимальное продольное отклонение центра симметрии корпуса робота, до значения которого действует линейная компенсация скорости; sgn(·) – функция знака числа; k_0^{β} – коэффициент контура стабилизации угла положения корпуса робота в глобальной системе координат OXYZ.

Формирование задания линейных скоростей поворотных блоков происходит из знания о характере их движения – движение корпуса робота является плоскопараллельным [11, с. 130–131]. Тогда, скорости и углы векторов скоростей приводных блоков (*I* равно1 или 2), приведённые к корпусу робота, можно вычислить по следующим формулам:

$$\begin{cases} V_i^{SP} = \sqrt{\left(V_0^{cor} \cdot \cos\left(\beta_0^{SP} \right) - \omega_0^{cor} \cdot h_i \right)^2 + \left(V_0^{cor} \cdot \sin\left(\beta_0^{SP} \right) + \omega_0^{cor} \cdot l_i \right)^2}, \\ \beta_i^{cor1} = \arctan\left(\dfrac{V_0^{SP} \cdot \sin\left(\beta_0^{SP} \right) + \omega_0^{cor} \cdot l_i}{V_0^{SP} \cdot \cos\left(\beta_0^{SP} \right) - \omega_0^{cor} \cdot h_i} \right) - \beta_0^{SP}. \end{cases} \tag{4}$$

Выражения (4)позволяют произвести компенсацию угловое положение корпуса. Вместе с ними существуют величины (1), необходимые для стабильного перемещения поворотных блоков вдоль траектории. Тогда, итоговое задание угла положения приводного блока можно определить как сумму углов в (1), приведённых к корпусу, и (4). Его стабилизация прозводится линейным регулятором. Для устранения поперечной ошибки поворотных блоков (продольная составляющая ошибки устраняется во внешнем контуре в выражении (3)) используем нелинейные регуляторы. Итоговая величина задания контура положения поворотного блока представляет является суммой заданных величин контуров стабилизации углового положения и устранения поперечной ошибки. Вышесказанное можно записать в систему:

$$\begin{cases} \omega_i^{cor1} = K_i^{\beta} \cdot \left(\beta_i^{cor} - \beta_i^{AV} \right) = K_i^{\beta} \cdot \left(\left(\beta_i^{cor1} + \left(\beta_i^{SP} - \beta_0^{SP} \right) \right) - \beta_i^{AV} \right), \\ \omega_i^{cor2} = \begin{cases} K_i^{\Delta L} \cdot \dfrac{V_i^{SP}}{\Delta l_i}, & \text{при } \left| \Delta l_i \right| > \Delta l_i^{\min}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \\ \omega_i^{cor} = \omega_i^{cor1} + \omega_i^{cor2}, \end{cases} \tag{5}$$

где ω_i^{cor1} – задание угловой скорости поворотного блока, компенсирующее угловое отклонение; k_i^{β} – коэффициент регулятора стабилизации угла положения поворотного блока относительно корпуса робота; ω_i^{cor2} – задание угловой поворотного блока, компенсирующее поперечное отклонение; $\Delta l_i^{\min}$ – минимальное поперечное отклонение центра поворотного блока, при котором работает регулирование; $k_i^{\Delta l}$ – коэффициент регулятора контура стабилизации положения поворотного блока относительно траектории; ω_i^{cor} – итоговое задание угловой скорости поворотного блока.

Для определения величины заданий скоростей вращения электродвигателей движение колеса рассматривается как сложное [11, с. 155–158], при котором переносным

является перемещение корпуса робота, а относительным – вращение приводного блока относительно точки крепления. Тогда, задания электроприводам, вычисленные через заданные линейные скорости колёс, можно рассчитать по формулам:

$$\omega_{ij}^{SP} = \frac{V_{ij}^{SP}}{R_{ij}^{Wh} \cdot I_{ij}^{R}} = \frac{V_i^{SP} \pm \left(\omega_0^{cor} + \omega_i^{cor}\right) \cdot l_{ij}}{R_{ij}^{Wh} \cdot I_{ij}^{R}}, \quad (6)$$

где ω_{ij}^{SP} – заданная скорость вращения электропривода *i j*-го колёса (согласно рис. 1); V_{ij}^{SP} – заданная линейная скорость *i j*-го колёса (согласно рис. 1); R_{ij}^{Wh} – радиус *i j*-го колёса; I_{ij}^{R} – передаточное отношение редукторов электродвигателя *ij*-го колеса; l_{ij} – расстояние от точки крепления *i*-го поворотного блока до оси *i j*-го колеса; знак «+» выбирается для колёс 11 и 21, «–» – для колёс 12 и 22.

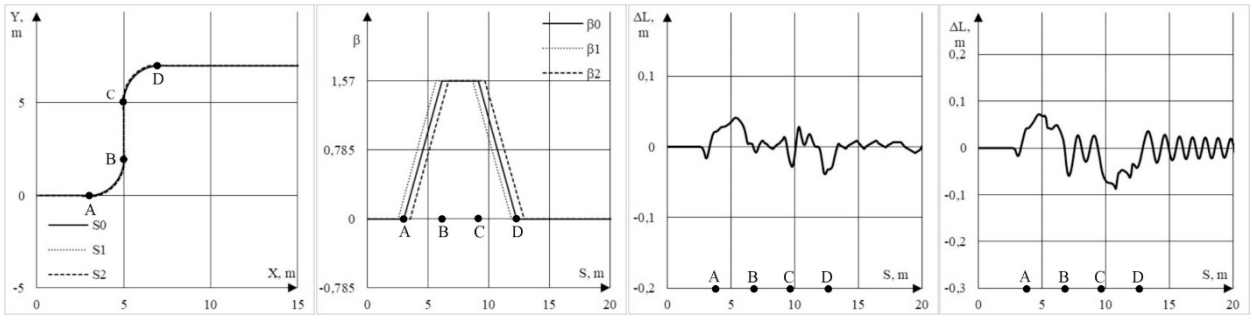
Регуляторы контуров управления скоростью электродвигателей получают сигнал рассогласования скорости вращения электродвигателя и управляют преобразователем подаваемого на фазную обмотку напряжения. Для этой цели можно использовать типовой (П, ПИ, ПИД и т. п.).

Продемонстрируем результаты программной реализации полученной системы управления электроприводами, проведя ряд численных экспериментов.Коэффициенты усиления контуров управления установлены в оптимальное значение. Контуры скорости электроприводов колёс регулируются ПИ-регуляторами, настроенные на модульный (технический) оптимум.

Первая серия экспериментов проведена при условии симметричного расположения поворотных блоков относительно горизонтально оси корпуса (L_1 = [0.5, 0.0]^T, L_2 = [-0.5, 0.0]^T, в метрах). На рис. 3 представлены графические изображения результатов.

Вторая серия экспериментов проведена при условии симметричного расположения поворотных блоков относительно вертикальной оси корпуса (L_1 = [0.0, 0.5]^T, L_2 = [0.0, -0.5]^T, в метрах). На рис. 4 представлены результаты вычислений.

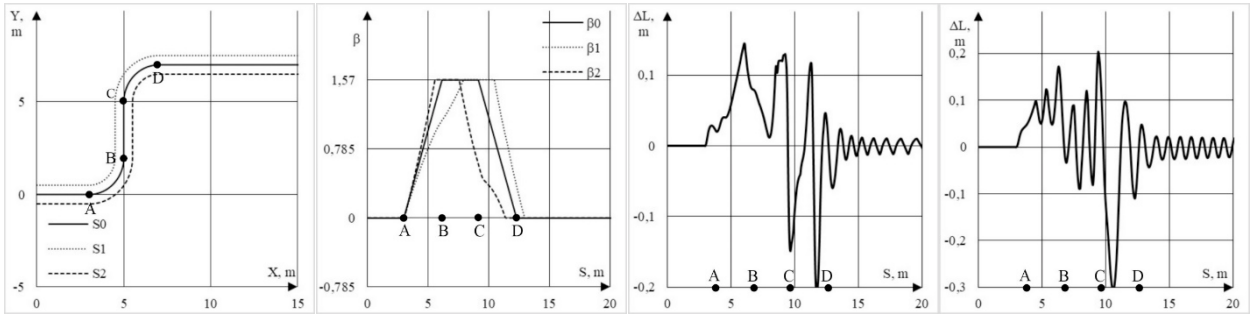
Третья серия экспериментов проведена при условии несимметричного расположения поворотных блоков относительно центра симметрии корпуса (L_1 = [0.5, 0.2]^T, L_2 = [-0.5, 0.4]^T , в метрах). Результаты представлены на рис. 5.



a b c d

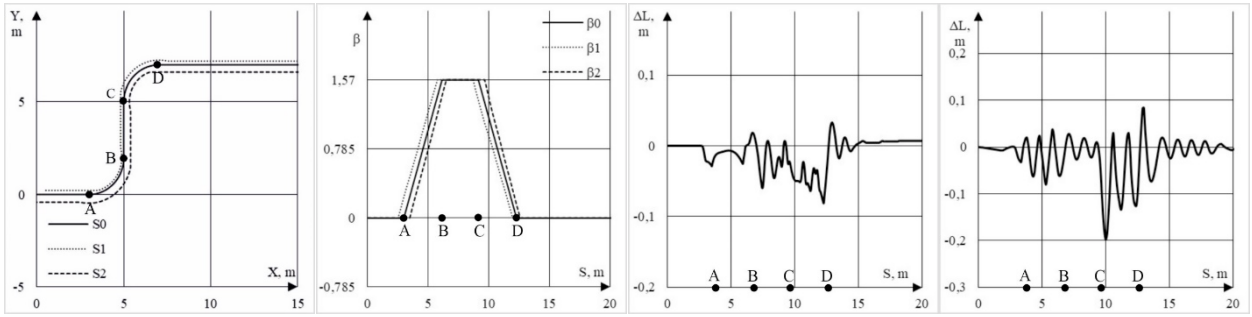
Рисунок 3 - Результаты моделирования при горизонтально симметричном расположении поворотных блоков:

a – заданные траектории движения центра корпуса и поворотных блоков; b – заданные углы положения центра корпуса и поворотных блоков (радианы); c – поперечное отклонение центра корпуса от траектории при V_0^{SP} = 0.5 м/с; d – поперечное отклонение центра корпуса от траектории при V_0^{SP} = 1.0 м/с



a b c d

Рисунок 4 - Результаты моделирования при вертикально симметричном расположении поворотных блоков:
a – заданные траектории движения центра корпуса и поворотных блоков; b – заданные углы положения центра корпуса и поворотных блоков (радианы); c – поперечное отклонение центра корпуса от траектории при V_0^{SP} = 0.5 м/с; d – поперечное отклонение центра корпуса от траектории при V_0^{SP} = 1.0 м/с



a b c d

Рисунок 5 - Результаты моделирования при несимметричном расположении поворотных блоков:
a – заданные траектории движения центра корпуса и поворотных блоков; b – заданные углы положения центра корпуса и поворотных блоков (радианы); c – поперечное отклонение центра корпуса от траектории при V_0^{SP} = 0.5 м/с; d – поперечное отклонение центра корпуса от траектории при V_0^{SP} = 1.0 м/с

По результатам моделирования видно, что, независимо от скорости перемещения и конструкции мобильного робота, отклонение от траектории не превышает (0.2 – 0.3) метра. Меньше отклонение у горизонтально симметричной конструкции, больше у вертикально симметричной.

В результате проведённого исследования построена система управления электроприводами мобильного робота с двумя поворотными блоками. Структура итоговой системы позволяет производить управление электродвигателями при несимметричном расположении приводных блоков. При необходимости проведения расчётов для роботов с числом приводных блоков больше двух, достаточно повторить уравнения (1) – (6) необходимое количество раз, указав геометрические параметры дополнительных поворотных блоков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кауркин И.А.* Роботизация в горнодобывающей промышленности / И.А. Кауркин, В.В. Зиновьев // Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 2017. С. 35006.

2. *Певзнер Л.Д.* Робототехника в горном деле / Л.Д. Певзнер, М.Л. Ким // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2014. №S1. С. 240–251.
3. *Соколов И.А.* Роботы, автономные робототехнические системы, искусственный интеллект и вопросы трансформации рынка транспортно-логистических услуг в условиях цифровизации экономики / И.А. Соколов, А.С. Мишарин, В.П. Куприяновский, О.Н. Покусаев, Ю.В. Куприяновская // International Journal of Open Information Technologies, 2018. №4. С. 92–108.
4. *Шангираев И.М.* Мобильные роботы в шахтах / И.М. Шангираев, Т.С. Доронин, Н.А. Фролов, И.А. Алексеев // Международная научно-практическая конференция «УРАЛЬСКАЯ ГОРНАЯ ШКОЛА – РЕГИОНАМ», 2019. С. 198–199.
5. *Grehl S., Mischo H., Jung B.* 2017 Research perspective - Mobile robots in underground mining *AusIMM Bulletin* Feb 2017 44–47.
6. *Moczulski W.A., Przystałka P., Sikora M., Zimroz R.* 2016 Modern ICT and Mechatronic Systems in Contemporary Mining Industry *IJCRS: Int. Joint Conf. on Rough Sets* Oct 2016 33–42.
7. *Ван Цзянь.* Траекторное управление движением твердого тела в пространстве / Ван Цзянь, А.Ю. Краснов, Ю.А. Капитанюк, С.А. Чепинский, С.А. Холунин, Чэнь Ифань, Лю Хуэйминь, Д.А. Хвостов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2017. №8. С. 704–711.
8. *Капитанюк Ю.А.* Задача управления многоканальной динамической системой по кусочно-гладкой траектории / Ю.А. Капитанюк, С.А. Чепинский // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2013. №4. С. 65–70.
9. *Ткачев С.Б.* Реализация движения колесного робота по заданной траектории / Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки», 2008. №2. С. 33–55.
10. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. – М.: Физматлит, 1961. – 824 с.
11. *Тарг С.М.* Краткий курс теоретической механики: Учеб. для втузов. 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 416 с.

УДК 622.23.05

МИХАЙЛОВ А.В.,
БРИГЕН Х.
Санкт-Петербургский горный университет

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ВЫЕМОЧНОГО ТОРФЯНОГО КОВШОВОГО БУРА

Аннотация. Статья посвящена выделению и анализу основных факторов, определяющих параметры выемочного торфяного залежей в полевых условиях. Рассмотрена классификация факторов влияния и указаны перспективные направления разработки оборудования для ковшового бура.

Ключевые слова: торфяная залежь, разработка, выемка, резание, параметры выемочного торфяного залежей, ковшового бура.

MIKHAILOV A.V.,
BRIGHEN H.
Saint-Petersburg Mining University

THE ANALYSIS OF FACTORS CHOICE PARAMETERS FOR EXCAVATION OF PEAT WITH BUCKET DRILL

Abstract. The article is devoted to the selection and analysis of the main factors determining the parameters of the excavated peat deposits in the field. The classification of influencing factors is considered and the promising directions of the bucket drill development equipment are indicated.

Keywords: peat deposit, development, excavation, cutting, parameters of excavation peat deposits, bucket drill**.**

В настоящее при работы на слабых мягких и обводненных грунтах I-категории, применяются на одной ковшовой гусеничного экскаватора с ковшовым обратной лопаты [0, 0].

Представляется интерес, производит вертикальную выемку грунтов I-категории при помощи ковшового бура навешенного на стрелу экскаватора.

Ковшовый бур представляет собой полую цилиндрическую конструкцию, на нижнем торце которой располагаются резцы (ножи), которые при вращательном движении измельчают породу [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Основной целью такой замены является повышение эффективности функционирования выемочного ковшового бура путем снижения удельных энергозатрат и увеличения производительности при совершенствовании конструкции и обосновании параметров режущих элементов.

Энергоемкость процесса характеризуется величиной усилия на ножах и величиной удельной работы, необходимой для выемки торфяного сырья, и определяется геометрией режущего инструмента (нож) и формой рабочего органа (ковшовый бур).

Эффективность функционирования ковшового бура при выемке торфяного сырья зависит от большого количества факторов, в той или иной степени влияющих на процесс выемки. Критерии выбора оборудования можно сгруппировать в три категории [5]:

- Производственный категорий;
- Размерно-массовые и прочностные параметры торфяного сырья;
- Параметры оборудования.

Факторы, определяющие эффективность процесса выемки торфяного сырья с учетом различных сторон этого процесса, можно классифицировать по ряду показателей [0-0].

1. Технологические:
1.1. Технологические свойства торфяного сырья:
1.1.1. Влажность;
1.1.2. Ботанический состав;
1.1.3. Степень разложения торфа.
1.2. Физико-механические свойства торфяного залежи:
1.2.1. Предел прочности на сдвиг;
Модуль деформации;
1.2.2. Коэффициенты внешнего и внутреннего трения (сцепления);
1.3. Размерно-массовые и прочностные параметры древесных включений.
2. Механические:
2.1. Динамические:
2.1.1. Масса ковшового бура;
2.1.2. Момент инерции ковшового бура;
2.1.3. Скорость резания рабочего органа ковшового бура (ножи).
2.2. Привод ковшового бура:
2.2.1. Тип привода;
2.2.2. Требуемая мощность;
2.2.3. Частота вращения.
3. Конструктивные:
3.1. Конструктивно-технологическая структура ковшового бура:
3.1.1. Сменное оборудование на экскаватор;
3.1.2. Размеры и форма режущего органа;
3.1.3. Способ выгрузки торфяного сырья;
3.2. Конструкция рабочего органа ковшового бура;
3.2.1. Режущие элементы (ножи): количество, способ загрузки ковшового бура;
3.2.2. Металл режущих элементов;
3.2.3. Разгружающее устройство.
4. Экономические:
4.1. Капитальные затраты;
4.2. Эксплуатационные расходы.

На стадии обоснования и выбора типа ковшового бура для выемки торфяного сырья следует учесть основные факторы, определяющие процесс выемки: энергические и геометрические характеристики рабочего органа: способ выемки мягких и обводненных пород и выгрузки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mikhailov A.V., Kremcheev E.A.; Nagornov D.O.* 2012 Mechanisation of extraction of peat from undrained deposit *Journal of Mining Institute* 196 256-260.
2. *Mikhailov A.V. et al.* 2017 Excavating and loading equipment for peat mining *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 87 022014.
3. *Михайлов А.В., Иванов С.Л., Габов В.В.* Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний / Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2015. №14. С. 82-91.
4. *Белицкая О.И, Филатов М.И.* Анализ и исследование факторов, влияющих на качество измельчения корнеклубнеплодов / Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018, №2(70), С. 53-55.

5. *Mikhailov A.* 2014 Peat surface mining methods and equipment selection *Mine Planning and Equipment Selection. Proceedings of the 22nd MPES Conference, Dresden, Germany, 14th – 19th October 2013. Drebenstedt, Carsten, Singhal, Raj (Eds.), XXVII* 2 1243-1249.
6. *Антипов В.В.* СОЭЗ: Вчера, сегодня, завтра / Горное оборудование и электромеханика, 2012. № 4. С 2-5.
7. *Яконовская Т.Б,. Жигульская А.И* Экономические и инженерные аспекты нового оборудования и технология комплексной безотходной добычи и переработки ресурсов торфяного месторождения. Рукопись деп. В изд-ве МГГУ от 30.01.2013 г. ¹ 953/04–13, 160 р. / Горный информационноаналитический бюллетень, 2013. ¹ 4. С. 50.
8. *Жигульская А.И., Яконовская Т.Б.* Новое оборудование и технологии комплексной безотходной добычи и переработки ресурсов торфяного месторождения: учебное пособие; Тверской гос. техн. ун-т, Каф. ТМО. – Тверь: ТвГТУ, 2012. – 159 с.
9. *Михайлов А.В., Кремчеев Э.А,. Телего А.В.* Системный подход к исследованию торфяного транспортно-тракторного агрегата / Теоретические и прикладные проблемы науки и образования в 21 веке: сб. науч. тр. // Мин. обр. и науки РФ. – Тамбов: Бизнес – Наука – Общество, 2012. Ч.1. С. 135–138.
10. *Лышко Г.П., Зангиев А.А., Скороходов А.Н.* Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка. – М.: Колос, 1996. – 319 с.
11. *Mikhailov A.* Peat surface mining methods and equipment selection *Mine Planning and Equipment Selection. Proceedings of the 22nd MPES Conference, Dresden, Germany, 14–19 October 2013. – Dreden, 2014. – № XXVII* 2 1243–1249.
12. *Nagornov D., Mikhailov A* 2012 Peat excavation and drying for factory-made local fuel production – Peatlands in Balance *Book of Abstracts of the 14th International Peat Congress Stockholm, Sweden, June 3–8. – Stockholm*.
13. *Bahrami A. , Monjezi M., Varjani A.Y., Sayadi A.R.* 2011 Prediction and controlling of flyrock in blasting operation using artificial neural network *Arabian Journal of Geosciences* 4(3–4) 420–425.
14. *Михайлов А.В., Кремчеев Э.А., Большунов А.В., Нагорнов Д.О.* Перспективы развития новых технологий добычи торфа / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2010. № 9. С. 189-194.
15. *Михайлов А.В., Таранов А.Г.* Комплект выемочного оборудования для селективной добычи торфяного сырья / Инновации на транспорте и в машиностроении: сб. трудов III междунар. науч.-пр. конфер. Том II. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. С. 55-59.

УДК 622.243.94

МУСТЕЙКИС А.И.,
ЛЕВИХИН А.А.
Балтийский государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

КОНВЕРСИЯ ДОСТИЖЕНИЙ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ОБРАЗЦОВ БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования конверсионного применения газогенератора ракетного двигателя для создания устройства термического бурения твердых горных пород. Показано, что температура рабочего тела такого устройства может быть существенно ниже температуры продуктов сгорания, используемых в существующих термобурах. Предложена математическая модель рабочего процесса такого устройства и аналитическая методика выбора его параметров. Приведено сравнение результатов экспериментального исследования и расчетных данных.

Ключевые слова: реактивный буровой аппарат, конверсия, термобур.

MUSTEYKIS A.I.,
LEVIKHIN A.A.
Baltic State Technical University
“VOENMEH” named after D.F. Ustinov

CONVERSION OF ACHIEVEMENTS OF ROCKET ENGINE'S CONSTRUCTION IN THE AREA OF CREATION OF NEW SAMPLES OF DRILLING EQUIPMENT

Abstract. In the article the results of research of conversional use of rocket engine’s gas generator for creation of thermal drilling equipment for hard rock materials are presented. It is shown that working gas temperature of such equipment can be significantly lower compared with conventional thermal drills. Mathematical model of working process of this equipment and analytical method for choosing its parameters is proposed. Comparison of analytical and experimental results is presented.

Keywords: jet drilling equipment, conversion, thermal drill.

В последнее время ввиду повышенного интереса к освоению природных ресурсов северных территорий, в том числе Арктики, богатых полезными ископаемыми, становится актуальной задача повышения эффективности и модернизации парка бурового оборудования, зачастую сильно изношенного и устаревшего [1].

Метод термического бурения скважин термобурами, сконструированными и функционирующими по принципу реактивного двигателя, известен с середины 20-го века [2, 3]. Такой метод бурения, в особенности для крепких и особо крепких пород, имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с механическими методами бурения [4], однако существующие устройства термического бурения обладают крайне низким ресурсом, обусловленным высокой температурой рабочего тела, которая близка к температуре полного сгорания компонентов топлива [5].

Реализовать потенциал подобных устройств можно путем снижения температуры рабочего тела до уровня, обеспечивающего процесс разрушения породы и одновременно длительную термическую стойкость конструкции [6].

Анализ параметров существующих термобуров показывает, что температура

рабочего тела подобных устройств близка к температуре неохлажденных продуктов сгорания компонентов топлива и составляет от 1900 до 3200 К [7].

При этом желательный диапазон температуры рабочего тела для разрушения твердых горных пород может быть определен следующим образом.

Нижняя граница диапазона температуры рабочего тела определяется как температура разрушения породы [8]:

$$T_{\text{Р}} = \frac{2\sigma_C(1-\mu)}{\beta \cdot E},$$

где σ_C - предел прочности на сжатие; μ - коэффициент Пуассона; β - коэффициент теплового расширения; E - модуль Юнга.

Верхнее значение диапазона температуры рабочего тела определяется наименьшей из температур: характерных тепловых эффектов $T_{ЭФ}$ в материале породы (плавление, диссоциация, дегидратация и т.п.) и максимальной температуры длительной термической прочности материала конструкции аппарата $T_{MAX\ ДОП}$. Конструкция аппарата по возможности должна изготавливаться из распространенных конструкционных материалов.

Характерные значения границ диапазона температур приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Характерные значения температур для различных материалов

Порода	$T_Р$, К	$T_{ЭФ}$, К	Материал конструкции	$T_{MAX\ ДОП}$, К
Кварцит	500-600	1700	12Х18Н10Т	1073
Граниты, гнейс	600-800	1700	10Х23Н18	1273
Габбро	1200-1300	-	ХН60Ю	1473

Видно, что температура рабочего тела может быть понижена по сравнению с существующими термобурами. При этом актуальным становится вопрос исследования эффективности применения бурового инструмента с таким уровнем температуры и выбор конструктивных и режимных параметров устройства, обеспечивающих максимальную эффективность разрушения породы.

Основной характеристикой эффективности подобных устройств является удельная энергетическая эффективность, определяемая как отношение приращения объемной производительности разрушения на единицу энергосодержания горючего [9]:

$$V_Q = \frac{V_{\text{РАЗР}}}{m_{\text{Г}} \cdot H_U},$$

где V_Q - удельная энергетическая эффективность, м3/Дж, $V_{РАЗР}$ - объемная производительность разрушения породы, м3/с, $m_Г$ - массовый расход горючего в КРД, кг/с, Hu – низшая теплотворная способность горючего, Дж/кг.

При этом отсутствуют зависимости, которые позволяли бы проводить анализ влияния параметров подобных устройств на величину их удельной энергетической эффективности, а также отсутствует подход к описанию рабочего процесса такого устройства, который бы учитывал особенности, связанные с использованием рабочего тела с пониженной температурой.

Рабочее тело должно обладать необходимой температурой, которая должна изменяться в достаточно узком диапазоне, а также быть экологически безопасным. Достичь этого в реактивном двигателе позволяет использование третьего компонента (хладагента), не участвующего в химических реакциях, но позволяющего получить рабочее тело с необходимыми параметрами [10, 11]. Схема организации процесса близка при этом к схеме работы газогенератора жидкостного ракетного двигателя [12, 13].

Качественная схема работы исследуемого устройства, далее называемого

реактивный буровой аппарат (РБА), в условиях направленного разрушения твердой горной породы приведена на рис. 1.

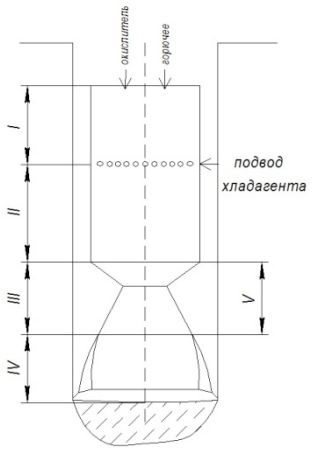


Рисунок 1 – Качественная схема рабочего процесса РБА

Зона I - преобразование химической энергии компонентов топлива (окислитель и горючее) в тепловую энергию высокотемпературных продуктов сгорания. Зона II - взаимодействие продуктов сгорания и хладагента с формированием на выходе рабочего тела с заданными параметрами. Вводится параметр - коэффициент избытка хладагента, определяемый как:

$$K_{ХЛ} = \frac{m_{ХЛ}}{m_{РТ}},$$

где $m_{ХЛ}$ - секундный массовый расход хладагента; $m_{РТ}$ - секундный массовый расход рабочего тела. Зона III (Сопло Лаваля с параметрами: M_a – число Маха потока на срезе сопла; θ_a – угол полураствора сопла) - истечение рабочего тела и формирование на срезе сопла потока с заданным числом Маха. Зона IV - сверхзвуковое течение рабочего тела при взаимодействии с разрушающейся поверхностью породы. Зона V - течение рабочего тела с взвешенными частицами материала преграды за зоной взаимодействия рабочего тела с породой.

На основе разработанной качественной схемы работы РБА была впервые предложена математическая модель рабочего процесса РБА в условиях направленного разрушения твердых горных пород, учитывающая влияние конструктивных и режимных параметров устройства на его удельную энергетическую эффективность. На ее основе была предложена аналитическая методика, позволяющая проводить выбор конструктивных и режимных параметров РБА на ранних этапах проектирования. Методика реализована виде программного кода в среде Matlab (государственная регистрация программы для ЭВМ № 2018618489). Проведено расчетное исследование влияния параметров РБА на компонентах: керосин, воздух, хладагент (воздух или вода) на величину его удельной энергетической эффективности для различных крепких горных пород (граниты, гнейсы, кварциты). Некоторые из полученных результатов приведены на рис. 2-3.

Результаты расчетного исследования позволяют сделать вывод о том, что максимум удельной энергетической эффективности РБА в условиях направленного разрушения твердых гонных пород достигается при минимальной величие внутрикамерного давления, обеспечивающей значение степени нерасчетности потока на срезе сопла > 1 и площадь «пятна контакта» струи рабочего тела с преградой б**о**льшую, чем площадь миделя РБА. Использование газообразного воздуха в качестве хладагента требует существенного увеличения расхода воздуха в РБА, например, для материалов типа гранит потребный расход воздуха увеличивается на 76%, что приводит к оцениваемому росту энергопотребления на 131%. Проведенные расчетные оценки

показывают, что в качестве хладагента в РБА желательно использовать воду.

На кафедре «Двигатели и энергоустановки ЛА» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова создан и конструктивно проработан РБА, обеспечивающий получение рабочего тела с требуемыми физико-химическими характеристиками [14]. Конструкция РБА защищена патентом РФ [15]. Спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд для исследования рабочего процесса РБА в условиях направленного разрушения твердых горных пород.

Проведенное экспериментальное исследование показало удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных данных (рис. 4).

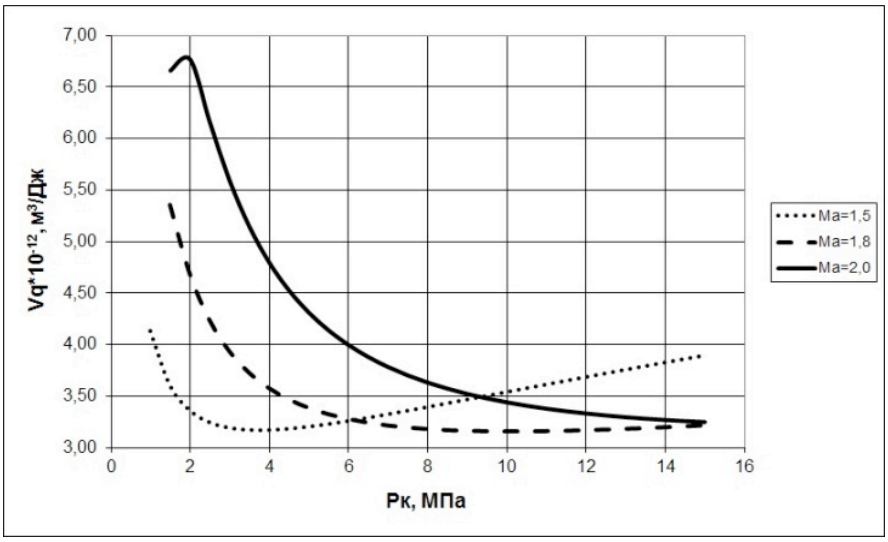


Рисунок 2 – Влияние числа Маха на срезе сопла при $К_{ХЛ} = 0,4$; $\theta_a = 5°$. Хладагент – вода. Порода – гранит

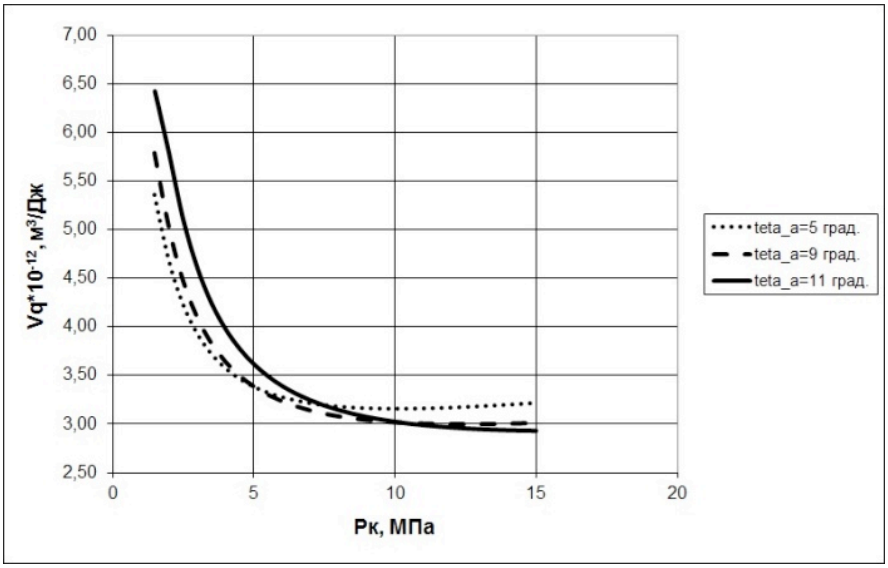


Рисунок 3 – Влияние угла полураствора сопла при $К_{ХЛ} = 0,4$; $M_a = 1,8$. Хладагент – вода. Порода – гранит

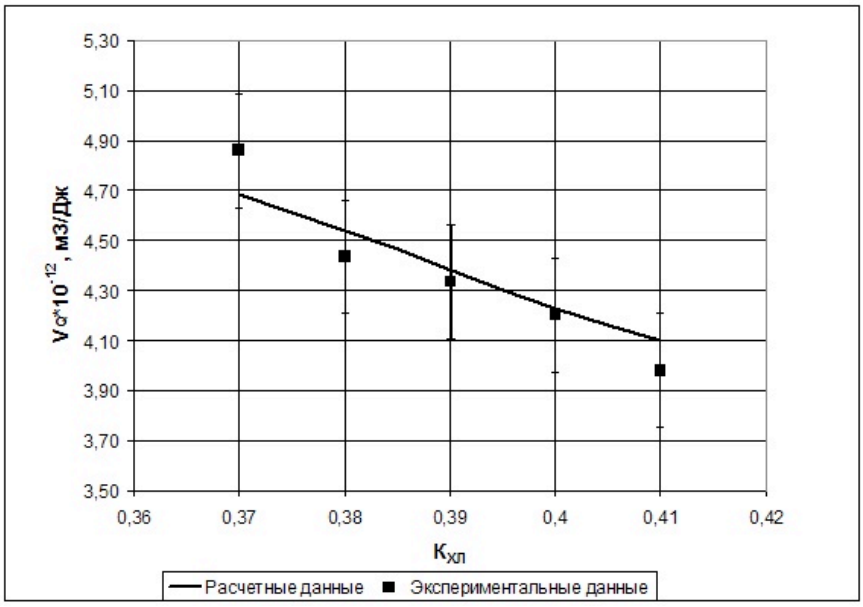


Рисунок 4 – Зависимость удельной энергетической эффективности РБА от коэффициента избытка хладагента

В результате проведенного исследования был обоснован схемный облик РБА, позволяющего получать рабочее тело с требуемыми физико-химическими характеристиками, и предложены рекомендации для определения геометрических и режимных параметров РБА на этапе раннего проектирования. На созданный РБА получено разрешение на применение на опасных производственных объектах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лель Ю.И., Захаров А.В.* Эффективность эксплуатации новых моделей буровых станков на карьерах Урала / Горный информационно-аналитический бюллетень, 2011. №6. С. 199-206.
2. *Решетняк С.П., Паладеева Н.И.* Основные направления развития техники для бурения взрывных скважин на открытых горных выработках / Горная техника, 2012. №1. С.2-8.
3. *Левихин А.А., Мустейкис А.И.* Использование технологии ракетостроения для создания опытных образцов парогазогенераторов народно-хозяйственного назначения / Пятые Уткинские чтения: Труды Международной научно-технической конференции. Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2011. С. 76-77.
4. *Первышин А.Н., Буланова Е.А.* Нагрев плоской преграды струей продуктов сгорания ракетного двигателя / Известия Самарского научного центра Российской Академии наук, 2013. Т. 15. №6-4. С. 917-920.
5. *Мустейкис А.И.* Физико-математическая модель процесса хрупкого термического разрушения горных пород / Итоги диссертационных исследований: Материалы V Всероссийского конкурса молодых ученых. Том 4. – М.: РАН, 2013. С. 34-42.
6. *Мустейкис А.И.* Новая технология термического бурения горных пород / Сборник научных трудов «Новые технологии»: Материалы X Всероссийской конференции. Т. 3. – М.: РАН, 2013. С. 137-140.
7. *Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю., Щадов М.И.* Справочник по открытым горным работам. - М.: НТЦ «ГОРНОЕ ДЕЛО», 2010. - 700 с.
8. *Дмитриев А.П.* Термическое разрушение горных пород. – М.: Недра, 1990. – 225 с.
9. *Фурсов А.П.* Взаимосвязь основных параметров процесса газоструйного воздействия на соприкасаемую среду / Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика: Тематический сборник научных трудов // Харьковский авиационный институт, 1983. Вып.3. С. 15-23.

10. *Левихин А.А., Мустейкис А.И.* Наукоемкие технологии создания опытных образцов теплогенерирующих установок на базе трехкомпонентных парогазогенераторов / Молодежь. Техника. Космос: Труды III Общероссийской молодежной научно-технической конференции // Балт. гос. техн. ун-т. – СПб.;\, 2011. С. 66-68.
11. *Буланова Е.А., Первышин А.Н.* Исследование модели движения полидисперсного потока частиц в струе продуктов сгорания / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева, 2008. №3(16). С. 7-14.
12. *Добровольский М.В.* Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 461 с.
13. *Первышин А.Н.* Ракетные двигатели малой тяги: электрон, учеб. пособие / А.Н. Первышин, Е.А. Буланова // Минобрнауки России, Самар, аэрокосм, ун-т им. С.П. Королёва (нац. исслед. ун-т). Электрон, текстовые и граф. дан. - Самара, 2011.
14. *Левихин А.А., Мустейкис А.И., Кузьмин А.М., Побелянский А.В., Анистратов К.Ю.* Методы реализации технологии термического бурения горных пород различной крепости / Электронный журнал «Горное дело». 2016. №1(7). С. 43-49.
15. Патент РФ на полезную модель №136083.

УДК 622.243.94

МУСТЕЙКИС А.И.,
ЛЕВИХИН А.А.
Балтийский государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
АНИСТРАТОВ К.Ю.
ООО «СистемаМаксимум»

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОГО БУРЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Аннотация. В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований применения газогенератора ракетного двигателя для создания устройства термического бурения твердых горных пород. Основным отличием исследуемого устройства от традиционных термобуров является относительно невысокая температура рабочего тела. Экспериментально показано, что данный уровень температуры рабочего тела обеспечивает устойчивый процесс термического разрушения породы и одновременно длительный ресурс конструкции. Разработанный математический аппарат позволяет подбирать параметры устройства для различных типов горных пород. Предложен концепт реактивной буровой установки для бурения взрывных скважин на открытых горных работах.

Ключевые слова: реактивный буровой аппарат, конверсия, термобур, реактивный буровой комплекс, газогенератор, термическое бурение.

MUSTEYKIS A.I.,
LEVIKHIN A.A.
Baltic StateTechnical University
«VOENMEH» named after D.F. Ustinov,
ANISTRATOV K.Y.
Systema Maximum Ltd.

THEORETICAL AND PRACTICAL REALISATION OF PERSPECTIVE THERMAL SPALLATION DRILLING TECHNOLOGY

Abstract. The article presents the results of theoretical and experimental studies of the conversional use of a rocket engine gas generator to create a device for thermal spallation drilling of solid rocks. The main difference between the studied device and traditional thermal drills is the relatively low temperature of the working fluid. It has been experimentally shown that this level of temperature of the working fluid provides a stable process of thermal spallation of the rock and at the same time a long life of the structure. The developed mathematical apparatus allows to select device parameters for various types of rocks. The concept of a jet drilling rig for drilling blast holes in open pit mines is proposed.

Keywords: jet drill, conversion, thermal drill, jet drilling rig, gas generator, thermal spallation drilling.

Бурение является одним из самых энергоемких процессов открытых горных работ. Буровые станки, применяемые в современной практике бурения взрывных скважин, по способу бурения подразделяются на пять основных типов (табл.1) [1].

Таблица 1.

Область применения и типы буровых станков

Способ бурения	Тип пород, условия применения	Диаметр скважин, мм	Типы буровых станков
Вращательное бурение режущими коронками с очисткой шнеками	В плотных и полускальных породах крепостью f=1÷8	160–200	Буровые станки типа СБР
Вращательное бурение шарошечными долотами с очисткой сжатым воздухом	В скальных породах крепостью f=6÷18, при большом объеме бурения	160–406	Буровые станки шарошечного типа СБШ
Ударно-вращательное бурение с погружными пневмоударниками и бурение с верхним расположением гидроперфоратора	В скальных породах крепостью f=10÷20	100–300	Буровые станки с погружными пневмоударниками типа СБУ Буровые станки с гидроперфораторами
Огневое бурение	В чрезвычайно крепких породах крепостью f≥14 с кристаллической структурой	До 600	Буровые станки типа СБО
Ударно-канатное бурение	В сильно трещиноватых или закарстованных породах, где бурение возможно только с обсадными трубами	450–1200	Буровые станки типа БС

Перспективы совершенствования технологии горных работ в значительной мере связаны с развитием способов высокоэффективного разрушения горных пород при термическом бурении скважин на основе интеграции тепловых и газодинамических методов бурения [3,4].

С точки зрения удельного энергопоглощения при бурении традиционными методами буровой орган прилагает к породе усилие для преодоления предела прочности породы на сжатие.

Метод термического бурения скважин термобурами, сконструированными и функционирующими по принципу реактивного двигателя, известен с середины 20-го века [5]. Такой метод бурения в особенности для крепких скальных горных пород имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с механическими методами бурения [6, 7].

Термическое бурение реактивной горячей струей реализует принцип разрушения шелушением за счет растягивающих напряжений. Предел прочности пород на растяжение в 7-10 раз меньше предела прочности на сжатие. Таким образом, энергопоглощение при термическом бурении на порядок меньше.

Существующие устройства термического бурения обладают крайне низким ресурсом, что обусловлено высокой температурой рабочего тела, которая близка к температуре неохлажденных продуктов сгорания компонентов топлива и составляет от 1900 до 3200 К [5, 8]. При этом, как показывают исследования, например [9], температура разрушения крепких горных пород находится в пределах 670-900 К.

Реализовать потенциал подобных устройств можно путем снижения температуры рабочего тела до уровня, обеспечивающего процесс разрушения породы и одновременно длительную термическую стойкость конструкции [10].

Диапазон температуры рабочего тела для разрушения крепких горных пород может быть определен следующим образом.

Нижняя граница диапазона температуры рабочего тела определяется как температура разрушения породы [11, с.]:

$$T_{\text{Р}} = \frac{2\sigma_C(1-\mu)}{\beta \cdot E},$$

где σ_C - предел прочности на сжатие; μ - коэффициент Пуассона; β - коэффициент теплового расширения; E - модуль Юнга.

Верхнее значение диапазона температуры рабочего тела определяется наименьшей из температур: характерных тепловых эффектов $T_{ЭФ}$ в материале породы (плавление, диссоциация, дегидратация и т.п.) и максимальной температуры длительной термической прочности материала конструкции аппарата $T_{МАХДОП}$. Конструкция аппарата по возможности должна изготавливаться из распространенных конструкционных материалов.Характерные значения границ диапазона температур приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Характерные значения температур для различных материалов

Порода	$T_Р$, К	$T_{ЭФ}$, К	Материал конструкции	$T_{МАХДОП}$, К
Кварцит	500-600	1700	12Х18Н10Т	1073
Граниты, гнейс	600-800	1700	10Х23Н18	1273

Температура рабочего тела может быть понижена по сравнению с существующими термобурами. При этом актуальным становится вопрос исследования эффективности применения бурового инструмента с таким уровнем температуры и выбор конструктивных и режимных параметров устройства, обеспечивающих максимальную эффективность разрушения породы.

Рабочее тело бурового инструмента должно обладать необходимой температурой, которая должна изменяться в достаточно узком диапазоне, а также быть экологически безопасным. Достичь этого в реактивном двигателе позволяет использование третьего компонента (хладагента), не участвующего в химических реакциях, но позволяющего получить рабочее тело с необходимыми параметрами [12]. Схема организации процесса близка при этом к схеме работы газогенератора жидкостного ракетного двигателя [13, с.].

Для исследования возможности реализации описанной выше схемы бурового инструмента на кафедре «Двигатели и энергоустановки ЛА» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова создан и конструктивно проработан реактивный буровой аппарат (РБА), обеспечивающий получение рабочего тела с требуемыми физико-химическими характеристиками (рис.1 и 2) [14].

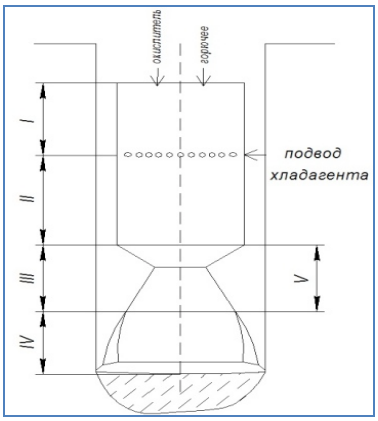


Рисунок 1 – Качественная схема рабочего процесса РБА

Рисунок 2 – Внешний вид стенда для испытания РБА

Пояснения к рисунку 1: Зона I - преобразование химической энергии компонентов топлива (окислитель и горючее) в тепловую энергию высокотемпературных продуктов сгорания. Зона II - взаимодействие продуктов сгорания и хладагента с формированием на выходе рабочего тела с заданными параметрами. Зона III (Сопло Лаваля с параметрами:M_a– число Маха потока на срезе сопла; θ_a – угол полураствора сопла) - истечение рабочего тела и формирование на срезе сопла потока с заданным числом Маха. Зона IV - сверхзвуковое течение рабочего тела при взаимодействии с разрушающейся поверхностью породы. Зона V - течение рабочего тела с взвешенными частицами материала преграды за зоной взаимодействия рабочего тела с породой.

Разработана методика, позволяющая проводить выбор конструктивных и режимных параметров РБА на ранних этапах проектирования. Методика реализована виде программного кода в среде Matlab (государственная регистрация программы для ЭВМ № 2018618489).

В результате стендовых экспериментов получен устойчивый процесс термического разрушения крепких горных пород (граниты и гнейсы) со скоростью до 2,5 мм/сек (рисунок 3-4).

Рисунок 3 – Буровое отверстие в образце гнейса

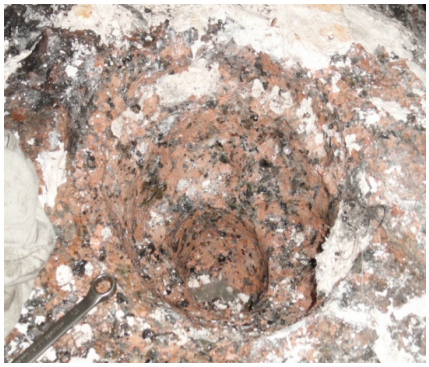


Рисунок 4 –Буровое отверстие в образце гранита

Проведенные полевые испытания показали, что данный способ бурения также может быть применим для рыхлых пород и пород средней крепости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анистратов Ю.И.* Открытые горные работы - XXI Век. Справочник. Том 1. / Ю.И. Анистратов, К.Ю. Анистратов и др., под ред. К.Ю. Анистратова // М.: ООО «Система максимум», 2019. - 640 с.
2. *Решетняк С.П.* Основные направления развития техники для бурения взрывных скважин на открытых горных работах / С.П. Решетняк, Н.И. Паладеева // Горная техника, 2012. - №1. - С.2-8.
3. *Mingbo Wang, Songyang Zhang and Gouemo Niangui Josue Edwin.* Hydrothermal Spallation Drilling Technology: An Alternative Method of Geothermal Energy Development. Advances in Engineering Research, volume 86, January 2017, pp. 302-305.
4. *Song X. Z., Lyu Z. H., Li G. S., Hu X. D.* Numerical analysis of the impact flow field of multi-orifice nozzle hydrothermal jet combined with cooling water. International Journalof Heatand Mass Transfer, Vol.114, 2017, pp. 578-589.
5. *Лель Ю.И.* Эффективность эксплуатации новых моделей буровых станков на карьерах Урала / Ю.И. Лель, А.В. Захаров // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - №6. - С. 199-206.
6. *Первышин А.Н.* Нагрев плоской преграды струей продуктов сгорания ракетного

двигателя / А.Н. Первышин, Е.А. Буланова // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. - 2013. – том 15, №6-4. -С. 917-920.
7. *ZehaoLyu, Xianzhi Song, Gensheng Li, Yu Shi, Rui Zheng, Gaosheng Wang, Yu Liu*. Investigations on thermal spallation drilling performance using the specific energy method. Journal of Natural Gas Science and Engineering, Volume 54, June 2018, pp. 216-223.
8. *Мустейкис А.И.* Физико-математическая модель процесса хрупкого термического разрушения горных пород // Итоги диссертационных исследований: Материалы V Всероссийского конкурса молодых ученых. Том 4. – М.: РАН, 2013. - С.34-42.
9. *Kant, M. A., E. Rossi, C. Madonna, D. Höser, and P. Rudolf von Rohr.* A theory on thermal spalling of rocks with a focus on thermal spallation drilling. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122, 2017, pp. 1805– 1815.
10. *Мустейкис А.И.* Новая технология термического бурения горных пород // Сборник научных трудов «Новые технологии»: Материалы X Всероссийской конференции. Том 3. – М.: РАН, 2013. - С.137-140.
11. *Дмитриев А.П.* Термическое разрушение горных пород – М.: Недра, 1990. –225 с.
12. *Буланова Е.А.* Исследование модели движения полидисперсного потока частиц в струе продуктов сгорания / Е.А. Буланова, А.Н. Первышин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева, 2008. – №3(16) – С. 7-14.
13. *Добровольский М.В.* Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 461 с.
14. Патент РФ на полезную модель №136083/27.12.2013. Мустейкис А. И., Кузьмин А. М., Левихин А. А., Ильинов Е. В., Побелянский А. В., Попов В. В., 2013, Бюл. № 36.

УДК 622.232

НГУЕН ВАН СО
Ханойский Горно-геологический университет,
Ханой, Вьетнам
НГУЕН КХАК ЛИНЬ
Санкт-Петербургский горный университет

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОГРУЗКИ УГЛЯ НА КОНВЕЙЕР ШНЕКОВЫМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

Аннотация. В статье анализируются процессы выгрузки угля из зоны разрушения на конвейер и формирования потока угля в переходной зоне от отстающего исполнительного органа до забойного конвейера, а так же влияние на процесс расстояния от шнека до конвейера, угла падения пласта, скоростей и направлений движения цепи конвейера и очистного комбайна. При этом учитывается характер выгрузки угля лопастями шнека из зоны разрушения и его влияние на производительность отстающего шнекового исполнительного органа по погрузке угля на конвейер.

Ключевые слова: уголь, очистной комбайн, шнековый исполнительный орган, конвейер, погрузка, эффективность.

NGUYEN VAN XO
Ha Noi University of Mining and Geology,
Ha Noi, Vietnam
NGUYEN KHAC LINH
Saint-Petersburg Mining University

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF LOADING COAL ONTO THE CONVEYOR BY SCREW EXECUTIVE BODIES OF SHEARERS

Abstract. This article discusses processes of coal loading by shearer loader drum from the cutting zone to the conveyor and formation of coal flow in the transition zone between the rear drum and conveyor. Furthermore, the influence exerted on these processes by the drum–conveyor distance, seam dip, as well as velocities and directions of shearer loader and conveyor chain is considered. The mechanisms of coal loading from the cutting zone by the drum blades and the related productivity of the rear drum in coal loading to conveyor are taken into account.

Keywords: coal longwall, shearer loader, drum, conveyor, loading, productivity.

Введение.

В настоящие время в процессах добычи угля в угольных шахтах преобладающее распространение получили очистные механизированные комплексны, которые включают механизированные крепи, забойные конвейеры и очистные комбайны со шнековыми исполнительными органами [1-3]. Шнековые исполнительные органы одновременно выполняют функции отделения угля от массива и погрузки его на забойный конвейер, который скребковой тяговой цепью перемещает уголь волочением по желобу вдоль лавы. Производительность очистного комбайна является основным показателем эффективности его работы. Применительно к опережающему шнеку используемая методика расчета его производительности по отбойке угля согласуется с результатами расчета его производительности по погрузке угля [4]. Однако с увеличением производительности

отстающего шнека очистного комбайна по отбойке угля нелинейно возрастают удельные затраты энергии, выход мелких фракций угля и объём угля, остающийся на почве. Кроме того невозможно повышение производительности очистных комбайнов, работающих в пластах средней мощности и мощных, без обеспечения выгрузки разрушенного угля, даже при условии роста их энерговооруженности [5, 6]. Известная формула для определения производительности отстающего шнекового исполнительного органа по погрузке, полученная на основании теории работы винтового конвейера, не учитывает ряд факторов, а именно (рис. 1): постоянное заполнение межлопастного пространства шнека 1 разрушаемым углем и большое сопротивление перемещению лопастями 2 шнека угля в осевом направлении. Сопротивление зависит от размеров борта конвейера 4 и корпуса редуктора 3 привода шнека, угла бокового крена конвейера и расстояния между отстающим шнеком и забойным конвейером.

Проблема заключается в том, что нет технических решений и отработанных методик, которые бы позволяли однозначно определять структуру и параметры погрузочных устройств очистных комбайнов, обеспечивающих заданные показатели эффективности процесса погрузки отбитого угла на забойный конвейер с учетом влияния указанных выше факторов.

В процессе погрузки (рис. 1) отстающий шнек 1 лопастями 2 вытесняет разрушенную массу угля последовательно из зоны разрушения массива через переходную зону II на конвейер в зону IV. Поток преодолевает линии скольжения а-а и поступает в зону III (на конвейер) под давлением, создаваемым вращающимся шнеком [7, 8]. Часть угля остается в зоне I очистного комбайна в зазоре между шнеком конвейером.

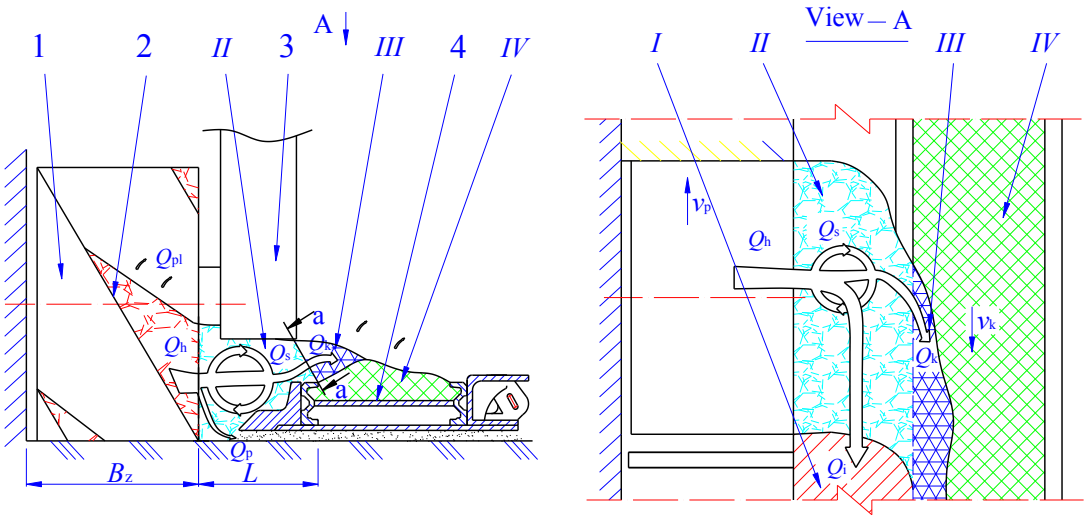


Рисунок 1 – Схема процесса формирования потока угля при погрузке на забойный конвейер:
зона I – слой угля в зазоре между шнеком и конвейером; зона II – поток угля в зазоре между конвейером и шнеком; зона III – поток угля, поступающий на конвейер;
зона IV – поток угля на конвейере;
1 – шнек; 2 – лопасть шнека; 3 – редуктор; 4 – конвейер

Анализируя факторы, влияющие на процесс погрузки угля шнековыми исполнительными органами очистных комбайнов на конвейер, по их физико-механической сущности следует отметить, что процесс погрузки в целом относится к сложным, а по количеству влияющих факторов – к многофакторным. При этом наиболее существенное влияние на него оказывают угол бокового крена конвейера и расстояние между отстающим шнеком и забойным конвейером.

Влияние размера переходной зоны на эффективность погрузки.

На рис. 1 представлены схема движения потоков материала в зоне работы

комбайна, роль погрузочных щитов в улучшении процесса погрузки.

Производительность отстающего шнекового исполнительного органа, по погрузке угля на конвейер с учетом формируемых потоков и характера выгрузки угля лопастями шнека (рис. 1), определится по формуле:

$$Q_к = Q_h - Q_{pl} - Q_p - Q_s - Q_i, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (1)$$

где Q_h – расчетная производительность шнека, м^3/мин; Q_k – производительность погрузки на конвейер шнеком; $Q_{pl.}$ – интенсивность мелкой летучей пыли, поступающей в воздух, м^3/мин; Q_i – интенсивность формирования слоя непогруженного угля, м^3/мин. Q_s – интенсивность циркуляции, м^3/мин; Q_p – объем угля под конвейером (потери), м^3/мин.

Анализируя выражение (1), следует отметить, что каждое значение Q_{pl}, Q_p, Q_s меньше, чем значение производительности Q_s. Интенсивность формирования слоя не погруженного угля может быть определена по выражению [9, 10]:

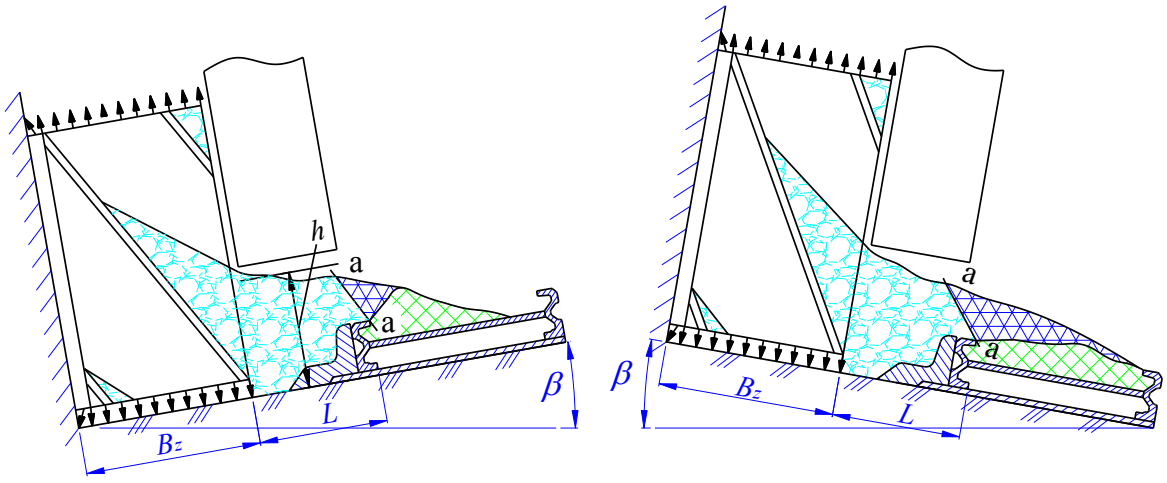
$$Q_s = v_p.L.h, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (2)$$

где $v_п$ − скорость подачи очистного комбайна, м/мин; L − расстояние между шнеком и конвейером, м; h – высота слоя угля в зазоре между шнеком и конвейером (рис.2, а).

Чем больше расстояние (L) от шнекового исполнительного органа до конвейера, которое обусловлено особенностями компоновки узлов сопрягаемого оборудования, тем больше сопротивление движению потока угля в процессе его погрузки на конвейер. Из формулы (2) следует, что чем короче путь перемещения (L) разрушенной массы до конвейера, тем меньше объём не погруженного угля и выше эффективность процесса погрузки. Однако в современных конструкциях очистных комбайнов и конвейеров это расстояние (L) составляет 300 мм и более. Уменьшение этого зазора между шнеком и конвейером затруднено из-за конструктивных особенностей их компоновки.

Влияние угла падения пласта на эффективность погрузки.

Из всего комплекса горно-геологических факторов на эффективность погрузки угля наиболее существенно влияет угол β боковой крен очистного комбайна (рис. 2, а, б), например, при отработке столбов по падению или восстанию, приводящий к перераспределению величины и направлений потоков угля от верхнего и нижнего шнеков.



а, β< 0 *б, β ≥ 0*

Рисунок 2 – Влияние угла падения пласта на эффективность погрузки

По результатам исследований Ш.И. Аксанова и Г.Н. Боброва [11-13] при увеличении угла (рис. 2) бокового крена β с -7° до -12° условия погрузки угля резко ухудшаются. При β с -14° до -18° коэффициент машинного времени возрастает по этой причине в 1,4-1,74 раза, а производительность очистного комбайна снижается. Согласно исследованиям Kuidong Gao и Changlong Du [14, 15] при увеличении угла β с -10 до 10° эффективность процесса погрузки угля на забойный конвейер возрастает более чем в 2 раза. При отрицательных углах наклона забоя β увеличивается количество не

погруженного угля как в зазоре (зона II) (рис. 2, а) между конвейером и шнеком, так и на почве за шнеком. Исследованиями работы шнекового исполнительного органа комбайна на шахте им. Ленина установлено, что при превышении угла бокового крена (β с -7 до -12° условия погрузки угля резко ухудшаются, что приводит к снижению рабочей и максимально допустимой скорости подачи (рис. 3) [13].

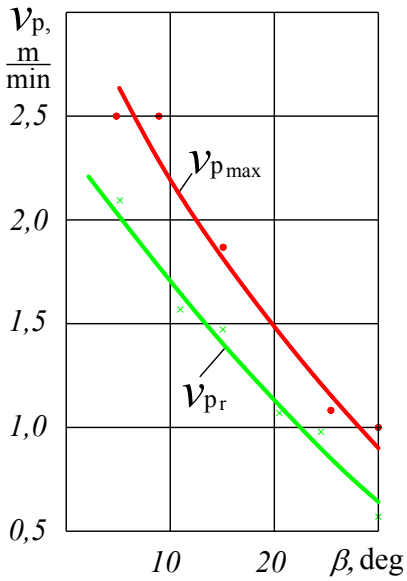


Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости скорости подачи от угла бокового крена

Выводы.

На основе анализа процесса погрузки угля отстающим ШИО очистных комбайнов на конвейер установлено:

- чем короче путь перемещения разрушенной массы до конвейера, тем меньше объём не погруженного угля и выше эффективность процесса погрузки;
- выбор параметров погрузочных устройств необходимо осуществлять с учетом зонной структуры процесса в сопряженных пространственных зонах, что обеспечивает обоснованность и повышает точность описания процессов и оценки степени их влияния на эффективность процесса погрузки угля в целом;
- при превышении угла бокового крена с -7 до -12° условия погрузки угля резко ухудшаются, что приводит к снижению рабочей и максимально допустимой скорости подачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peng S.S.* Longwall Mining. U.S.: 2nd edition, October 2006. - 621 p.
2. *Солод В.И., Гетопанов В.Н., Рачек В.М.* Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. - М.: Недра, 1982. - 350 с.
3. *Wang F., Tu S., Bai Q.* 2012 Practice and prospects of fully mechanized mining technology for thin coal seams in China *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 112(2) 161-170.
4. *Малеев Г.В., Гулияев В.Г., Бойко Н.Г., Горбатов П.А* Проектирование и конструкирование горных машин и комплексов. - М.: Недра, 1988. - 368 с.
5. *Бойко Н.Г.* Погрузка угля очистными комбайнами. - Донецк : ДонНТУ, 2002. - 157 с.
6. *Загривный Э.А., Басин Г.Г.* Формирование внешней динамики горных машин / Записки Горного института, 2016. Т.217. С. 140-149.
7. *Kuidong Gao* 2016 Particle movement behavior in drum coal loading process by discrete element method *EJGE* 21 163-173.

8. *Gospodarczyk P.* 2016 Modeling and simulation of coal loading by cutting drum in flat seams *Archives of Mining Sciences* 61(2) 365–379.
9. *Nguyen K.L., Gabov V.V., Zadkov D.A., Le T.B.* 2018 Justification of process of loading coal onto face conveyors by auger heads of shearer-loader machines *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 327 042132.
10. *Gabov V.V., Nguyen K.L., Nguyen V.X., Le T.B., Zadkov D.A* 2018 The rationale of geometric and modal parameters of cutter drums ensuring the efficiency of coal loading onto a downhole conveyor *Ugol'* 2 36-39.
11. *Бобров Г.Н.* Исследование работы механизмов комплекса при слоевой отработке мощных пологих пластов столбами по падению: Автореф. дис. канд. техн. наук, 1973. – 23 с.
12. *Вернер В.Н.* Погрузочная способность шнеков с дисковыми шарошками по результатам производственных испытаний / Меж-вуз. сб. науч. тр. КузПИ, Вып. 1. Механизация горных работ, 1977. - С. 23-26.
13. *Вернер В.Н.* Исследование и обоснование рациональных параметров шнековых погрузочно-транспортирующих органов выемочных машин: Дис. докт. техн. наук. − Кемерово, 1999. - 319 с.
14. *Kuidong Gao, Changlong Du, Jianghui Dong, Qingliang Zeng* 2015 Influence of the Drum Position Parameters and the Ranging Arm Thickness on the Coal Loading Performance *Minerals* 5 723-736.
15. *Kuidong Gao, Liping Wang, Changlong Du, Jiannan Li, Jianghui Dong* 2016 Research on the effect of dip angle in mining direction on drum loading performance: a discrete element method *Int J Adv Manuf Technol* 89 2323-2334.

УДК. 62-722, 62-727, 62-728, 62-24

САФРОНЧУК К.А.,
КНЯЗЬКИНА В.И.,
ИВАНОВ С.Л.
Санкт-Петербургский горный университет

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА МАСЛЯНОГО НАСОСА С ЗУБЧАТО-ЭКСЦЕНТРИКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. Существующие на отечественном рынке поршневые насосы, применимые при проведении смазочно-запарочных работ на горных машинах, имеют встроенный червячный редуктор. Известно, что коэффициент полезного действия червячной передачи не превышает 60%, а такжеданная передача быстро изнашивается и требует постоянного ухода и частого ремонта.
В связи с этим предложено использовать зубчато-эксцентриковый механизм преобразования возвратно-поступательно движения поршневого насоса высокого давления с оптимизированной геометрией зубчатого зацепления привода поршня и изменяемой величиной его хода в конструкции насоса. Установлено влияние заданного эксцентрика на изменение угла между зубчатыми колесами от угла поворота зубчатого колеса. Показано влияние заданного эксцентрика на изменение хода поршня от угла поворота зубчатого колеса. Выведен закон движения поршня, т.е. зависимость хода поршня от угла поворота зубчатого колеса. За счет этого упрощается конструкция механической части насоса, исключается необходимость в червячной передаче и повышается надежность насоса.

Ключевые слова: насос, преобразование движения, возвратно-поступательное движение, эксцентриситет, ТОиР, горная машина.

SAFRONCHUK K.A.,
KNYAZKINA V.I.,
IVANOV S.L.
[1]St. Petersburg Mining University

PARAMETER EVALUATION OF AN OIL PUMP MECHANISM WITH A GEAR-TYPE ECCENTRIC MOVEMENT TRANSDUCER

Abstract. Existing piston pumps on the domestic market, used for lubrication and welding operations on mining machines have a built-in worm gear. It is known that the coefficient of efficiency of worm gear does not exceed 60%, and this gear wears out quickly and requires constant care and frequent repair.
In this connection it is offered to use the gear-type eccentric mechanism of transformation of reciprocating movement of the high-pressure piston pump with the optimized geometry of gear gearing of a drive of the piston and variable value of its stroke in a pump design. Influence of the given eccentric gear on change of the angle between gear wheels from the gear wheel rotation angle is established. Influence of the given eccentric piece on change of a course of the piston from a corner of rotation of a gear wheel is shown. The law of piston movement is derived, i.e. the dependence of the piston stroke on the toothed wheel rotation angle. This simplifies the mechanical design of the pump, eliminates the need for worm gear and increases the reliability of the pump.

Keywords:pump, motion conversion, reciprocating motion, eccentricity, MRO, mining machine.

Для добычи полезных ископаемыхв горной промышленности применяют тысячи технических средств. Эксплуатация машин сопровождается процессами изнашивания, физическим и моральным старением. В результате ухудшаются технико-экономические показатели использования техники. Для поддержания машин в исправном состоянии необходимо управлять техническим состоянием машин, своевременно и качественно проводить ТОиР (техническое обслуживание и ремонт), осуществлять хранение техники при оптимальном расходовании трудовых и материальных ресурсов [1, 2, 3].

Специфика условия применения горных машин в горнодобывающей отрасли (значительное удаление от нефтескладов и ремонтно-обслуживающих баз) требуют мобильных средств ТО (техническое обслуживание), которые позволяют в период напряженных горных работ сократить загрузку мастерских.

Помимо всего прочего гарантированный нормальный режим функционирования технологических производственных процессов горного производства невозможен без насосов специального назначения, предназначаемых для работы с ГСМ (горюче-смазочные вещества) [4, 5].

Гидравлические насосы, при помощи которых выполняются смазочно-заправочные работы,служат для перекачки под давлением различных технологических жидкостей, например, консистентной смазки технологического оборудования производственных линий и агрегатов.Например, плунжерный или поршневой насос позволяет регулировать подачу масла, не останавливая технологический процесс, в гидравлическую систему горной машины, что значительно упрощает управление оборудованием. Однако конструкция данных насосов предусматривает наличие червячной передачи. В ходе эксплуатации насосного оборудования возникают проблемы, связанные с малыми создаваемыми давлениями и небольшой производительностью [6]. Увеличение данных параметров (давление и производительность) приводит к интенсивному изнашиванию привода червячно-кривошипного узла с образованием свободного хода, повышает динамику износа и снижает его долговечность.

Это приводит к выходу из работы насоса, что может вызвать остановку объектов подготовки и сбора смазочных вещества, что в свою очередь приведет к отказам горной техники.

В связи с этим предложено использовать детерминированное возвратно-поступательное движение поршня насоса посредством зубчато-эксцентрикового редуктора со сложным движением приводного и ведомого зубчатых колес для подачи лубриканта поршневым насосом высокого давления в систему смазки при проведении смазочно-заправочных операций ее технического обслуживания на карьере и снижения трудоемкости этих работ [7, 8, 9, 10].

Для определения скорости перемещения поршня необходимо установить закон движения поршня, т.е. зависимость ходя l поршня от угла поворота φ ведущего зубчатого колеса.

Для преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное линейное движение поршня в предлагаемом устройстве используются только два зубчатых колеса, что позволяет упростить конструкцию поршневого устройства, обеспечить его компактность при возможности передачи значительных усилий на поршень, и, кроме того, повысить долговечность и надежность работы устройства [11, 12].

Для выведения закона движения выходного вала плоского механизма с кинематической парой 4-го класса необходимо рассмотреть плоскопараллельное движение твердого тела (рис. 1).

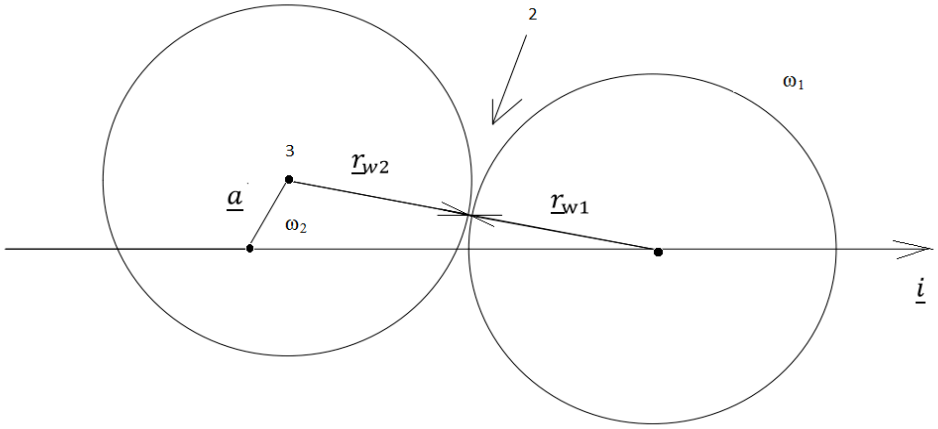


Рисунок 1 – Постановка задачи для плоскопараллельного движения твердых тел (дисков) без проскальзывания

Так как точка 2 движется вдоль прямой, получим:

$$\underline{v}_2 \cdot \underline{i} = 0 \ . \tag{2}$$

Составим систему уравнений для ω_2 и $\underline{v}_3$:

$$\begin{cases} \underline{\omega}_1 \cdot \underline{r}_{w1} = \underline{v}_3 + \underline{\omega}_2 \cdot \underline{r}_{w2} \\ \left(\underline{v}_3 + \underline{\omega}_2 \cdot \underline{a}\right) \cdot \underline{i} = 0 \end{cases} . \tag{3}$$

Движение плоское, поэтому скорости с учетом проекции будут равны:

$$\underline{\omega}_2 = \omega_2 \cdot \underline{k}, \tag{4}$$

$$\underline{v}_3 = v_x \underline{i} \cdot v_y \underline{j} \ . \tag{5}$$

Проецируя (3) на $\underline{i}, \underline{j}, \underline{k}$, получим:

$$\begin{cases} v_x = \underline{\omega}_2 \left(\underline{k} \cdot \underline{r}_{w2}\right) \cdot \underline{i} - \left(\underline{\omega}_1 \cdot \underline{r}_{w1}\right) \cdot \underline{i} \\ v_y = \underline{\omega}_2 \left(\underline{k} \cdot \underline{r}_{w2}\right) \cdot \underline{j} - \left(\underline{\omega}_1 \cdot \underline{r}_{w1}\right) \cdot \underline{j}. \\ v_y = -\left(\underline{a} \cdot \underline{i}\right) \cdot \underline{\omega}_2 \end{cases} \tag{6}$$

И, следовательно, имеем:

$$\underline{\omega}_2 = \frac{(\underline{\omega}_1 \cdot \underline{r}_{w1}) \cdot \underline{j}}{(\underline{k} \cdot \underline{r}_{w2}) \cdot \underline{j} + \underline{a} \cdot \underline{i}}, \tag{7}$$

$$v_y = -\frac{(\underline{a} \cdot \underline{i})(\underline{\omega}_1 \cdot \underline{r}_{w1}) \cdot \underline{j}}{(\underline{k} \cdot \underline{r}_{w2}) \cdot \underline{j} + \underline{a} \cdot \underline{i}}, \tag{8}$$

$$v_x = -\left(\underline{\omega}_1 \cdot \underline{r}_{w1}\right) \cdot \underline{i} + \frac{(\underline{k} \cdot \underline{r}_{w2}) \cdot \underline{i} \cdot (\underline{\omega}_1 \cdot \underline{r}_{w1}) \cdot \underline{j}}{(\underline{k} \cdot \underline{r}_{w2}) \cdot \underline{j} + \underline{a} \cdot \underline{i}}, \tag{9}$$

$$\underline{v}_2 = v_x \underline{i} + v_y \underline{j} + w_2 \underline{k} \cdot \underline{a}. \tag{10}$$

Т.о. при заданном положении механизма решение получается подстановкой (7), (8), (9) в (10).

Рассмотрим схему движения характерных точек (рис. 2).

Сложное вращательно-качательное движение, включающее собственно вращение колес вокруг своих осей без скольжения и начального движения эксцентрично расположенного колеса по дуге в пределах угла ±γ, величина которого определяется величиной эксцентриситета ведомого колеса.

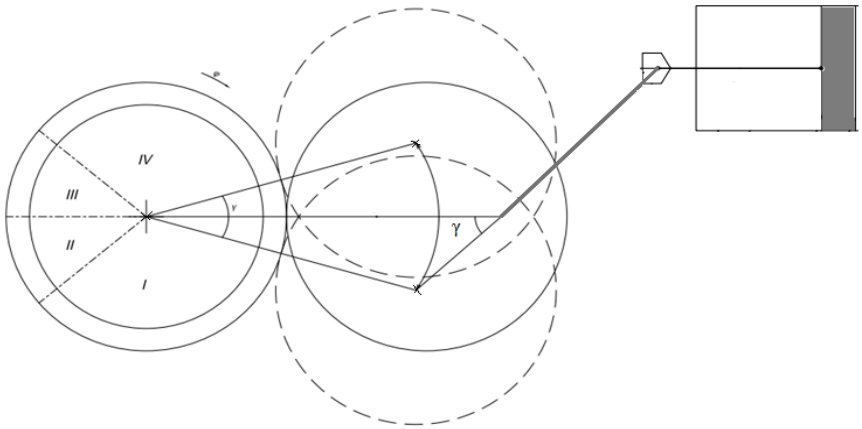


Рисунок 2 – Траектория движения характерных точек качающего механизма насоса с зубчато-эксцентриковым приводом, где I-IVзоны моделирования

Полное уравнение закона движения поршня для схемы, изображенной на рис. 1, запишется в виде:

$$S = r_{w1} + r_{w2} + e - [(r_{w1} + r_{w2})^2 + e - 2(r_{w1} + r_{w2}) \cdot e \cdot cos\,(\pi - \varphi)]^{0.5}, \qquad (11)$$

где φ - угол поворота ведущего зубчатого колеса, r_{w1} – начальный радиус первого зубчатого колеса; r_{w2} – начальный радиус второго зубчатого колеса; e_2 - эксцентриситет ведомого зубчатого колеса; S – ход поршня.

Таким образом, можно сделать вывод, что ход поршня при заданномзначении межосевого расстояния зависит отэксцентриситета, так же как и угол качанияγ ведомогозубчатого колеса

Для доказательства полученного вывода построим графики зависимостей хода поршня и угла качания от эксцентриситета, выразив значение эксцентриситета как отношение эксцентриситета к межосевому расстоянию (рис. 3, 4).

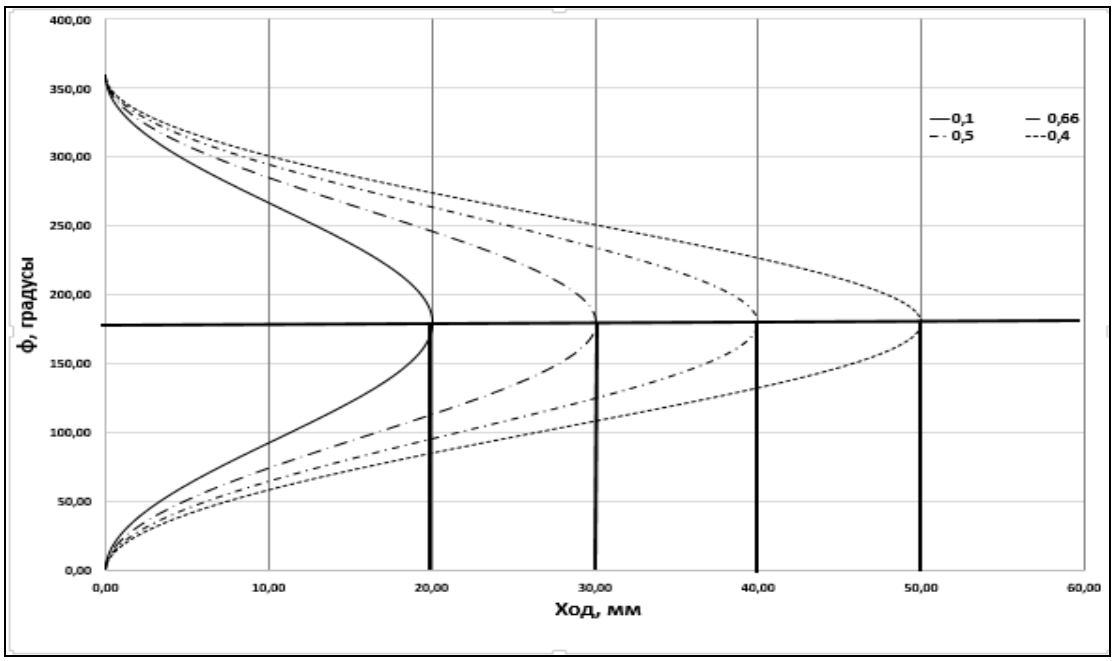


Рисунок 3 – Зависимость хода поршня от угла поворота кривошипа

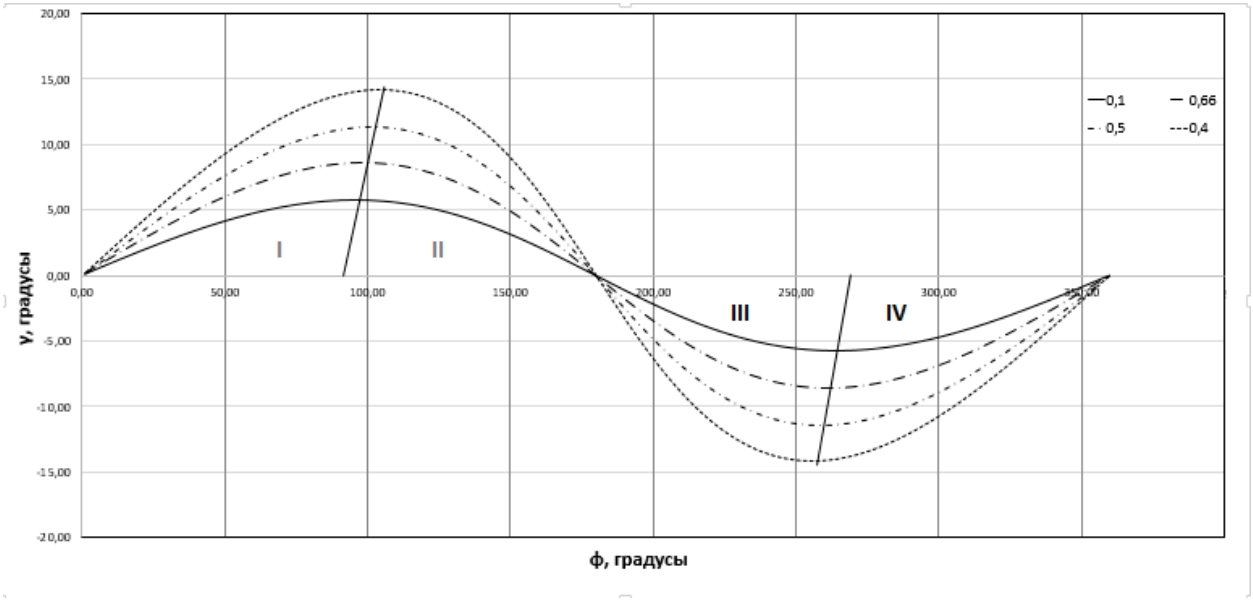


Рисунок 4 – Изменения угла качания от угла поворота ведущего зубчатого колеса

Таким образом, в качестве исполнительных механизмов насоса, во время работы которого необходимо преобразование вращательного движения в возвратно-поступательное, предложено использовать механизм регулирования подачи с зубчато-эксцентриковым преобразователем движения. Такой механизм является более компактным, а также КПД передачи, по предварительным оценкам, составит не менее 90%. Помимо всего прочего данный механизм позволит решить проблемы с утечками и существенно сократит время обслуживания, а также позволит добиться экономии реагентов путем обеспечения точности закачки смазочных- веществ и увеличит срок службы насосов путем надежности [13, 14, 15].

Рассмотрение плоскопараллельного движения механизма показало, что при заданном значении межосевого расстояния, а соответственно, и габаритных размеров корпуса ход поршня зависит отэксцентриситета. Также приувеличенииэксцентриситета изменяется уголкачания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пумпур Е.В. Князькина В.И. Сафрончук К.А. Иванов С.Л.* Оценка факторов влияния на выбор стратегии технического обслуживания экскаваторов / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2019. №12 (специальный выпуск 41). С. 19.

2. *Ананьин А.Д.* Диагностика и техническое обслуживание машин: учебник для студентов высш. учеб. заведений /.А.Д. Ананьин, В.М. Михлин, И.И. Габитов и др. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 438 с.

3. *Варнаков В.В.* Организация и технология технического сервиса машин: учебное пособие для ВУЗов / В.В.Варнаков, В.В Стрельцов, В.Н Попов, В.Ф. Карпенков. - М.: Колос, 2007.- 277 с.

4. *Бурданов В.Н.* Непрерывное дозирование жидкости насосами возвратно-поступательного действия: справочное пособие. – СПб.: Геликон Плюс, 2012. - 222 с.

5. *Knyazkina V.I., Safronchuk K.A. and Ivanov S.L.* 2019 About possibility of immediate evaluation of technical condition of mining equipment using signal value of acoustic emission friction *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 560 012068.

6. *Safronchuk K.A., Knyazkina V.I, Ivanov S.L.* 2019 Mobile lubrication and filling units to reduce mining machines and equipment downtime when providing maintenance *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 560(1) 012088.

7. *Сафонов В.В.* Планирование ремонтно-обслуживаемых работ хозяйства и разработка технологического процесса восстановления детали: учебное пособие / В.В. Сафонов, В.Н. Буйлов, В.А. Александров, С.А. Шишурин; ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2011. – 100 с.
8. *Пумпур Е.В.* Применение агрегатно-узлового метода при обслуживании горной техники / Е.В. Пумпур, С.Л. Иванов // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: 14-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. В 2 т. Т.1: материалы конференции. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С. 214-219.
9. *Вержанский А.П.* Прогрессивные технологии в производстве, техническом обслуживании и ремонте горного оборудования / Горный информационно-аналитический бюллетень, 2011. Отд. вып. 1. С. 519-524.
10. *Ivanov S.L., Shishkin P.V.* 2018 Manufacturing and design technology of Combined corrected gearing and nonstandard Radial clearance *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 194 022013.
11. *Ivanov S.L., Shishkin P.V.* 2017 Integral criterion of mining machines technical condition level at their operation *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 87 022009.
12. *Емельянов А.А.* К вопросу оценки влияния квалификации машиниста на техническое состояние экскаватора / А.А. Емельянов, С.Л. Иванов, Д.А. Шибанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2017. S38. - С. 442-453.
13. *Масляков Н.С.* Механизация и автоматизация механической обработки в ремонтном производстве. Сборник научных трудов семинара № 23 «Современные технологии в горном машиностроении», «Неделя горняка» 28 января - 1 февраля 2013. - М.: МГГУ, 2013. С. 265-278.
14. *Бойко П.Ф.* Оптимизация технического обслуживания и ремонта механического оборудования / Горный журнал, 2011. №6. С. 52-54.
15. *Сафрончук К.А.* Роль и место смазочно-заправочных работ при проведении технического обслуживания техники / К.А. Сафрончук, С.Л. Иванов, О.Р. Механошина // Master’s journal, 2018, №1. С. 56-60.

УДК 622.23.037.008

СЕРЖАН С.Л.,
МАЛЕВАННЫЙ Д.В.
Санкт-Петербургский горный университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ ГЛУБОКОВОДНОГО ДОБЫЧНОГО КОМПЛЕКСА С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ КАПСУЛОЙ В УСЛОВИЯХ РРР-ЖМК

Аннотация. В работе рассматривается технология разработки месторождения твердых полезных ископаемых, а именно железо-марганцевых конкреций (ЖМК) в Российском разведочном районе (РРР). Приведеныгорно-геологические условия залегания ЖМК в РРР. Представлено описание технологии добычи конкреций комплексом с промежуточной капсулой, а также рассмотрен принцип его работы. Произведен расчетрациональной глубины погружения капсулы по условию устойчивого гидроподъема в конкретных горно-геологических условиях, а также вычислена мощностьнасосного оборудования.

Ключевые слова: глубоководный добычной комплекс, промежуточная капсула,железомарганцевые конкреции, Российский Разведочный Район.

SERZHAN S.L.,
MALEVANNYI D.V.
Saint-Petersburg Mining University

DETERMINATION OF THE AREA OF EFFECTIVE WORK OF A DEEP-SEA MINING COMPLEX WITH INTERMEDIATE CAPSULE IN THE CONDITIONS OF RUSSION EXPLORATION AREA – FERROMANGANESE NODULES (REA – FMN)

Abstract. In the article considers the technology of development of deposits of solid minerals, namely ferromanganese nodules (FMN) in Russian exploration area (REA). The mining and geological conditions of the deposit FMN are given.A description of the technology for extracting nodules by a complex with an intermediate capsule is presented, as well as the principle of its operation. The calculation of the rational depth of immersion of the capsule according to the condition of stable hydraulic hoisting in specific mining and geological conditions is made, also the power of pumping equipment is calculated.

Keywords: deep-sea mining complex, intermediate capsule, ferromanganese nodules. Russianexplorationarea.

В настоящее время большинство минеральных невозбновляемых ресурсов Земли практически исчерпано. Но темпы роста потребления этих ресурсов только увеличиваются. В сложившихся обстоятельствах, стоит обратить внимание на другой источник полезных ископаемых – Мировой океан. В нем сосредоточены значительные запасы твердых ископаемых и энергетических ресурсов, которые представляют промышленное значение, так как содержание полезного компонента не уступает, а иногда и превышает, значения схожих континентальных ресурсов. Полезные ископаемые по глубине залегания можно разделить на шельфовые и глубоководные. Наибольший промышленный интерес среди ТПИ дна представляют железомарганцевые конкреции (ЖМК), кобальтмарганцевые корки (КМК) и глубинные полиметаллические сульфиды (ГПС) [1].

Контроль за добычей ресурсов Мирового океана осуществляет Международная

Организация Морского Дна (МОМД), которая выдает контракты сроком на 15 лет для исследования, разведки и разработки определенной зоны, а также распределяет зоны между заинтересованными государствами. Россия на настоящий момент имеет три контракта: на разработку ГПС, КМК и ЖМК истекающих в 2026, 2031 и 2021 годах соответственно. Помимо того, что ЖМК являются наиболее распространёнными твердыми полезными ископаемыми, явно видна необходимость выполнения контрактных обязательств [2].

Российской зоной разработки ЖМК является участок площадью в 75 тыс. км^2 в Тихом океане, в провинции Кларион-Клиппертон. Суммарные ресурсы ЖМК района составляют 580 млн. тонн во влажной массе.Коэффициент рудоносности данного участка 0,34. Интервал глубин локализации залежей - от 4700 до 5200 м, большая часть рудной площади локализована в интервале глубин 4900-5000 м. По форме встречаются овальные, лепешковидные, шаровидные, почкообразные и коркообразные конкреции. Плотность 1,6-2,7 г/см^3, среднее количество влаги 30-50%. Размеры конкреций по различным данным составляют от 4-10см [3], преобладают размеры ЖМК в диапазоне 5-10 см, но встречаются и до 20 см [2, 4].

Для разработки конкреций РРР-ЖМК предлагается использовать глубоководный добычной комплекс с промежуточной капсулой (рис. 1) [5].

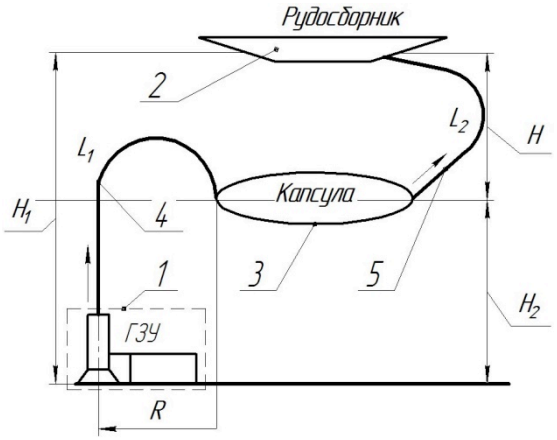


Рисунок 1 – Принципиальная схема комплекса:
1 - грунтозаборное устройство ГЗУ с гидравлическими приводными двигателями;
2 – рудосборник с энергетической установкой; 3 – погруженная под уровень капсула с пульпоперекачным оборудованием; 4 – пульповод положительной плавучести - нижний ПН; 5 - пульповод положительной плавучести - верхний ПВ

Комплекс состоит из придонного добычного оборудования с грунтозаборным устройством [6, 7], поверхностного плавсредства с энергетической установкой (рудосборник), погружной капсулы с пульпоперекачным оборудованием [8], и системы трубопроводов [8].

Придонное добычное оборудование включает в себя самоходную гусеничную тележку с дистанционным управлением и грунтозаборное устройство. ГЗУ, соединенное с тележкой посредствам стрелы, способно перемещаться в вертикальной плоскости, с целью забуривания в пласт, а так же в горизонтальной плоскости при непосредственной добычи конкреций (подача на забой). Рабочий орган грунтозаборного устройства 1, выполненный в виде рыхлителей закрепленных на валу гидродвигателя, отделяет конкреции от дна, причем последние попадают в кольцевой канал, образованный приводным гидродвигателем и ловителем. Конусный ловитель накрывает рабочую зону и не позволяет попадать отделенным фракциям в открытую акваторию. Кольцевой канал грунтозаборного устройства гидравлически сообщен с промежуточной капсулой, поэтому конкреции в виде гидросмеси транспортируются по нижнему пульповоду положительной плавучести 4 и попадают в капсулу 3. Попадание отделенных от дна конкреций сначала в

кольцевой канал, а потом и в пульповод обусловлено наличием тяги, созданной за счет разницы напоров на входе вловитель и в капсуле с атмосферным давлением, определяемой глубиной погружения капсулы H (рис. 1). После попадания в капсулу 3, конкреции в составе гидросмеси, с помощью пульпоперекачного оборудования, транспортируются по верхнему пульповоду положительной плавучести 5 непосредственно на рудосборник 2, где хранятся до дальнейшей транспортировки на берег.

Энергообеспечение оборудования обеспечивает дизель-генератор, размещенный на рудосборнике, который передает электроэнергиюдвум электродвигателям, один из которых размещен в капсуле 3, а другой –на судне. Первый электродвигательвращает грунтовый насос в капсуле 3, второй – водяной насос на судне, который питает водяной гидродвигатель, размещенный на самоходной тележке ГЗУ. Гидродвигатель, приводит в действие маслонасос, также расположенный на самоходной тележке. Маслонасоспитает гидромотор, вращающий выходной вал с установленными на нем рыхлителями, неполноповоротный гидродвигатель, который осуществляет движение рабочего органа в горизонтальной плоскости, пару гидроцилиндров, обеспечивающих забуривание рыхлителей и гидромоторы привода ходовой тележки.

Особенность работы представленного комплекса, заключается в осуществлении двух стадийного гидроподъема отделенных конкреций. Первая стадия – гидроподъем конкреций в виде гидросмеси от придонного добычного комплекса до промежуточной капсулы. Вторая стадия – от промежуточной капсулы до рудосборника. Процесс гидроподъема гидросмеси до капсулы осуществляется за счет гидростатического напора H (рис. 1), который создает поток жидкости определенной скорости. Вторая стадия гидроподъема реализуется с помощью грунтовых насосов, смонтированных в промежуточной капсуле с атмосферным давлением.

Энергетические затраты на первую стадию гидроподъема отсутствуют, а величина энергозатрат на вторую стадию гидроподъема зависит от глубины погружения капсулы: чем больше величина погружения капсулы, тем больший напор должно создавать насосное оборудование, расположенное в капсуле. С другой стороны, величина погружения капсулы формирует гидростатический напор, создающий скорость потока в нижнем пульповоде, которая должна соответствовать критической скорости для конкреций заданной крупности, т.е. необходимым и достаточным является условие:

$$v_{П} \geq 1{,}1 \cdot v_{КР}, \qquad (1)$$

где: $v_{П}$ - скорость потока несущей среды (воды) в нижнем пульповоде; $v_{КР}$ - критическая скорость потока, определяемая крупностью и плотностью транспортируемого материала (конкреций).Причем увеличение глубины погружения капсулы для повышения скорости потока в нижнем пульповоде не приведет к повышению производительности комплекса, т.к. придонное добычное оборудование, включающие ГЗУ имеет постоянную производительность по твердому и будет наблюдаться процесс «разжижения», т.е. будет уменьшаться концентрация гидросмеси.

Таким образом, эффективность работы комплекса зависит от глубины погружения капсулы, величину которой можно определить по формуле, в основе которой реализовано условие устойчивого гидроподъема в нижнем пульповоде [5]:

$$\overline{H} = [\frac{a}{4} - \frac{\sqrt{\dfrac{16a^3 \cdot N + 9a^4 - 256\left[\dfrac{b}{3M} + \dfrac{a^2}{16} - M\right]^2}{16a^2 - \dfrac{128b}{3M} + 128M}}}{2} + \frac{4a^2 - \dfrac{32b}{3M} + 32M}{32 \cdot N}]^2, \qquad (2)$$

где: *a, b, M, N* – соответствующие расчетные коэффициенты;

$$M = \left(\sqrt{\frac{a^4 b^2}{256} + \frac{b^3}{27}} - \frac{a^2 b}{16} \right)^{0,33}, \; N = \sqrt{\frac{a^2}{4} - \frac{2b}{3M} + 2M} \; [5].$$

Величина $\overline{H} = H / H_1$ названа нами относительной глубиной погружения капсулы (рис.1) [5]. Параметры, необходимые для определения $\overline{H}$, в горно-геологических условиях РРР-ЖМК:

- H_1 = 4900 м – глубина акватории в месте добычи конкреций;
- R = 100 м – радиус обрабатываемого поля;
- D = 0,25 м – диаметр трубопровода, транспортирующего гидросмесь;
- ℓ = 5 м – длина одной секции шарнирно-сочлененного трубопровода;
- λ = 0,02 – коэффициент гидравлического трения;
- ξ = 1,76 – местные потери напора в одном шарнирном соединении;
- $\rho_т$ = 2,1 т/м^3 – плотность добываемых конкреций;
- ρ_w = 1,03 т/м^3 – плотность морской воды;
- m = 0,25 – пористость ЖМК;
- G_m = 320 т/ч = 0,089т/с - производительность ГЗУ по массе;
- C = 0,45 – коэффициент лобового сопротивления единичной конкреции;
- d = 50…100 мм – крупность добываемых конкреций.

Определяются соответственно коэффициенты *K1, K2, K3, K4, a, b* по формулам, представленным в работе [5]:

$$K_1 = 8,7 м/с; \; K_2 = 1,16 с/м; \; K_3 = 0,75; \; K_4 = 9,37 м/с; \; a = 0,074, \; b = 0,12.$$

Для получившихся значений рассчитанных коэффициентов значение, определяемое по формуле (2) $\overline{H} = 0,331$. Тогда величина погружения капсулы H может быть найдено по соотношению $H = H_1 \cdot \overline{H} = 4900 \cdot 0,331 = 1622 м$. Таким образом, высота гидроподъема первой стадии составляет 3278 метров, а высота гидроподъема второй стадии – 1622 м.

Для оценки энергозатрат процесса гидроподъема конкреций в Российском Разведочном районе необходимо определить затрачиваемую мощность. Гидроподъем с глубины 4900 м до глубины 1622 м происходит без затрат энергии, а с глубины 1622 м до водной поверхности за счет грунтовых насосов. Приводная мощность грунтовых насосов может быть определена по формуле [9]:

$$N_H = \frac{g}{\eta_H \eta_Э} \left(\frac{K_1 K_2 \cdot \rho_w \sqrt{\overline{H}} + \rho_T K_3}{K_1 K_2 \sqrt{\overline{H}} + K_3} \right) \cdot \overline{H} \cdot H_1 \cdot \left[1 + \beta \left(\frac{\lambda}{D} + \frac{\zeta}{l} \right) \cdot \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \cdot \left(\frac{G_m}{\rho_T} \right)^2 \times \right.$$
$$\left. \times \left(K_3 + K_1 K_2 \sqrt{\overline{H}} \right)^2 + \frac{0.022 \cdot \beta}{\left(K_1 K_2 \sqrt{\overline{H}} \right)^{0.52}} \right] \cdot \left[\frac{G_m}{\rho_T} \cdot \left(K_3 + K_1 K_2 \sqrt{\overline{H}} \right) \right] \quad (3)$$

Приводная мощность пульпоперекачного оборудования в описанных условиях составит 15 МВт, для обеспечения производительности 3 млн. тонн/год сухой массы конкреций. Полные энергозатраты добычного комплекса включают не только затраты на гидроподъем, но и затраты на отделение конкреций от дна, подводимые к придонному добычному оборудованию. Однако, в данной работе энергозатраты на отделение конкреций не рассматривались, по причине незначительной их доли по отношению к затратам на гидроподъем.

Таким образом, область эффективной работы комплекса в условиях РРР-ЖМК при годовой производительности 3 млн. тонн в год достигается, при погружении капсулы, заполненной атмосферным воздухом, на глубину 1622 м, тем самым обеспечивая требуемую производительность, при энергозатратах на подъем пульпоперекачным

оборудованием в 15 МВт. Увеличение глубины погружения капсулы может дать положительный эффект и увеличить годовую производительность за счет увеличения скорости движения конкреций на первой стадии подъема, однако, при этом необходимо увеличивать производительность придонного комплекса, в противном случае, увеличения производительности достигаться не будет, а будет наблюдаться снижение концентрации гидросмеси. Так же увеличение глубины погружения увеличит энергозатраты силового оборудования, причем большое увеличение глубины может привести к тому, что грунтовый насос не сможет дать требуемого напора. Уменьшение глубины погружения может снизить энергозатраты, но в этом случае не будет выполняться условие (1), что не позволит поднять конкреции требуемого диаметра, а также уменьшит скорость потока несущей среды в нижнем пульповоде, что приведет к снижению производительности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голева Р.В.* К проблеме изучения и освоения минерально-сырьевых ресурсов Мирового океана / Рациональное освоение недр, 2010. №1. С. 53-42.
2. *Кондратенко А.В., Неизвестнов Я.В.* Формирование инженерно-геологических условий глубоководных конкрециеносных площадей зоны Кларион-Клиппертон Тихого океана / Записки Горного института, 1992. №133. С. 90-102.
3. *Добрецов В.Б., Рогалев В.А.* Основные вопросы минеральных ресурсов Мирового океана / Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы. – СПб., 2003. С. 524.
4. *Константинова Н.П.* Железомарганцевые корки поднятия Менделеева: особенности состава и формирования / Н.П. Константинова и др. // Арктика: экология и экономика, 2016. С.16-28.
5. *Сержан С.Л., Медведков В.И.* Влияние глубины погружения капсулы с пульпоперекачным оборудованием на эффективность добычи полезного ископаемого морским добычным комплексом / Горное оборудование и электромеханика. – Кемерово: 2016. С. 34-42
6. *Сержан С.Л.* Оснащение грунтозаборного устройства рабочим органом с объемным гидродвигателем / Горное оборудование и электромеханика, 2013. №10. С. 39-42.
7. *Медведков В.И., Незаметдинов А.Б., Кондаков Д.Ю., Сержан С.Л.* Грунтозаборное устройство; пат. РФ 2459083 МПК E21C 50/00, 2010 г.; опубл. 20.08.2012.
8. *Сержан С.Л., Медведков В.И.* Особенности энергообеспечения грунтозаборного устройства добычного комплекса для подводной добычи / Горное оборудование и электромеханика, 2014. №10. С. 23-29.
9. *Сержан С.Л.* Обоснование рациональных параметров системы с грунтозаборным устройством и гидродвигателем для добычи железомарганцевых конкреций. Автореф. дис. канд. тех. наук: 05.05.06. – СПб., 2015. – 20 с.

УДК 622.063.23

УРАЗБАХТИН Р.Ю.,
ЮНГМЕЙСТЕР Д.А.,
ЯЧЕЙКИН А.И.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫРАБОТОК МАЛОГО СЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Аннотация. Проанализированы конструкции различных проходческих машин и комплексов для проведения горизонтальных и наклонных выработок. Представлены результаты обоснования конструкции проходческого комплекса, указано, что предлагаемое техническое решение проходческого комплекса позволит повысить скорость проведения выработок малого сечения и безопасность ведения горноспасательных работ.

Ключевые слова: забой, проходческий комплекс, сменный исполнительный орган, ударник, коронка.

URAZBAKHTIN R.Y.,
YUNGMEYSTER D.A.,
IACHEIKIN A.I.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of mechanical engineering

SUBSTANTIATION OF THE DESIGN AND PARAMETERS OF THE COMPLEX FOR CARRYING OUT THE WORKING OUT OF SMALL SECTION IN THE CONDITIONS OF COAL MINES

Abstract. The designs of various tunneling machines and complexes for horizontal and inclined workings are analyzed. The results of the justification of the construction of the tunnel complex are presented, it is indicated that the proposed technical solution of the tunnel complex will increase the speed of development of small sections and the safety of mining operations.

Keywords: face, tunneling complex, shift executive body, drummer, crown.

Проходка горизонтальных выработок в настоящее время осуществляется тоннелепроходческими комплексами, устройствами и комплексами для проведения выработок малого сечения в слабоустойчивых грунтах и крепких породах (рис. 1, а–г) [1, 2, 3, 4].

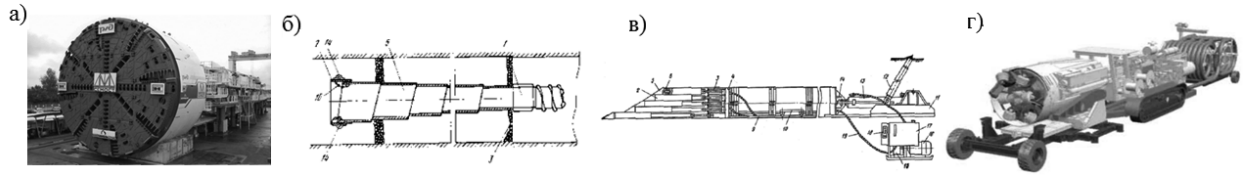


Рисунок 1 – Проходческое оборудование для проведения выработок малого сечения в:
а) породах различной крепости; б) завалах;
в) слабоустойчивых грунтах; г) крепких породах

При проведении выработок малого сечения не представляется возможным использовать существующее проходческое оборудование, поскольку проходческие комплексы и устройства (рис. 1, а–г) имеют крупные габариты, большую массу, высокий уровень сложности монтажно-демонтажных работ, ограниченную область использования комплекса в породах различной крепости, наличие стартового оборудования, усложняющего МДР.

Кроме того, на сегодняшний день для спасения горняков на угольных шахтах выработки проходятся вручную. На кафедре машиностроения разработан и запатентован проходческий комплекс [5], состоящий из быстросборных модульных узлов, обеспечивающий механизацию проведения выработок малого сечения по породам различной крепости и кровлям переменной устойчивости, исключив трудоемкий ручной труд и снизив при этом сроки проходческих работ.

Проведены теоретические исследования по выявлению закономерностей изменения силовых параметров проходческого комплекса на базе шагающей крепи от воздействия внешних нагрузок при его пошаговом перемещении в различных по крепости породах и переменных по устойчивости кровлях. Область влияния горной выработки на перекрытия секции комплекса, вызванная перераспределением напряжений в массиве пород, зависит от формы и наибольшего линейного размера (l) сечения выработки.

Обоснование схем нагружения перекрытий и ограждений крепи (рис. 2) позволяет определить значения величин усилия передвижки $F_т$ и рассчитать основные конструктивные параметры частей крепи, на основе которых возможно обоснованно выбрать гидроцилиндры, маслостанцию.

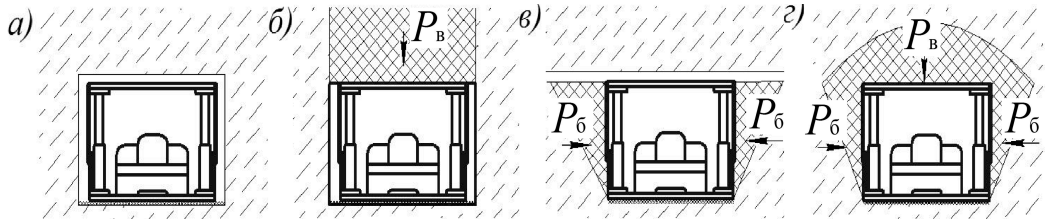


Рисунок 2 – Варианты нагружения проходческого комплекса:
а – отсутствие внешних нагрузок на перекрытия крепи комплекса; б – нагружение со стороны кровли выработки; в – нагружение со стороны боков выработки;
г – нагружение со стороны кровли и боков выработки

По результатам теоретических исследований определен интервал значений коэффициента сопротивления передвижки крепи проходческого комплекса в зависимости от вариантов нагружения (рис. 2) [6]:

1) отсутствие внешних нагрузок на перекрытия комплекса ($k_{сопр}$ = 0,4-0,6);

2) нагружение со стороны кровли выработки ($k_{сопр}$ = 0,5-3,0);

3) нагружение со стороны боков выработки ($k_{сопр}$ = 0,40-0,85);

4) нагружение со стороны кровли и боков выработки ($k_{сопр}$ = 0,5-6,0).

Приведена номограмма определения диаметров гидродомкрата (рис. 3) на основе определенного интервала изменения коэффициента сопротивления передвижки шагающей крепи в зависимости от коэффициента крепости пород f и вариантов нагружения перекрытий комплекса с учетом методики выбора основных характеристик гидравлических цилиндров при использовании параметрических рядов диаметров поршней и давлений гидравлической системы.

На рис. 3: 1 – кривая изменения коэффициента сопротивления передвижки шагающей крепи от коэффициента крепости пород при отсутствии нагрузки на перекрытия и стенки крепи; 2 – при наличии боковых нагрузок, действующих на боковые стенки крепи со стороны боков выработки; 3 – при наличии вертикальной нагрузки, действующей на перекрытия крепи со стороны кровли выработки; 4 – при наличии

вертикальной и боковых нагрузок, действующих на перекрытия, боковые стенки крепи со стороны кровли и боков выработки; 5 – кривая изменения усилия передвижки от диаметра поршня при давлении в гидравлической сети 63 МПа; 6 – 50 МПа; 7 – 40 МПа; 8 – 32 МПа; 9 – 25 МПа; 10 – 20 МПа.

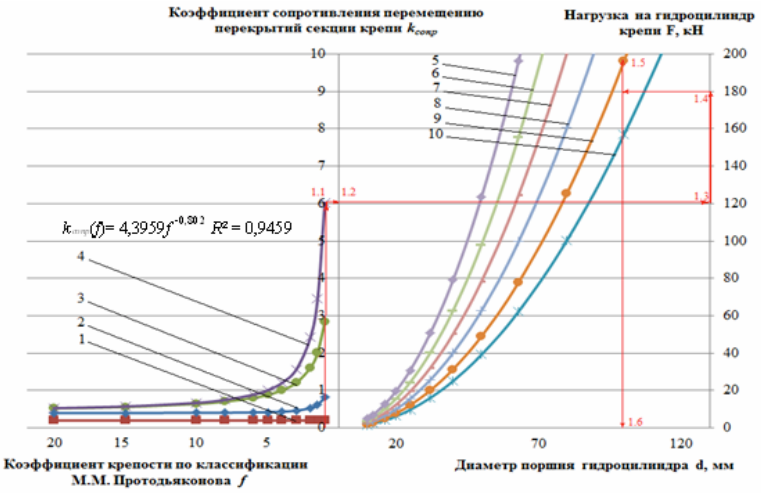


Рисунок 3 – Номограмма для определения диаметра гидродомкрата шагающей крепи проходческого комплекса в зависимости от крепости f и варианта нагружения перекрытий

На рис. 3, кривая 4 представлен пример использования номограммы. При крепости пород в выработке $f = 1$ максимальное значение коэффициента сопротивления передвижки крепи комплекса $k_{\text{сопр}} = 6$, которое соответствует неблагоприятным горно-геологическим условиям, при которых значения вертикальной и боковых нагрузок, действующих на перекрытия, боковые стенки крепи со стороны кровли и боков выработки максимальны (точка 1.1, 1.2 на рис. 3). Определяется необходимое рабочее усилие, развиваемое гидродомкратом передвижки крепи $F_{\text{н}} = 120$ кН (точка 1.3 на рис. 3). Дальнейшее определение усилия передвижки крепи осуществляется с учетом коэффициента запаса $k_{\text{з}} = 3$ и количества гидродомкратов $n = 2$, обеспечивающих передвижку крепи. Таким образом, усилие гидродомкрата должно быть не меньше 180 кН (точка 1.4 на рис. 3). В соответствии с параметрическими рядами диаметров поршней гидроцилиндров и номинальных давлений в гидравлической сети значение усилия одного гидродомкрата передвижки крепи составляет $F = 196$ кН при диаметре поршня гидродомкрата $d = 100$ мм и давлении в гидравлической сети $p = 25$ МПа, а необходимое усилие для передвижки проходческого комплекса на базе шагающей крепи должно быть не менее 392 кН [6].

Суммарное время проходки эвакуационной выработки малого сечения механизированным способом, с учетом подготовительных и монтажно-демонтажных работ, должно быть меньше, в сравнении с ручным способом, поэтому необходимо выполнять следующие условия: наличие проходческого комплекса для проведения скоростных эвакуационных выработок в подразделениях ВГСЧ во всех добывающих регионах РФ; максимальная масса узлов комплекса не должна превышать 200 кг; наличие обученного персонала.

Для уменьшения сроков проходческих работ при проведении выработки малого сечения и соответственно повышения скорости проходки разработан алгоритм операций проведения проходческой выработки на основе указанного алгоритма создана имитационная модель функционирования проходческого комплекса при проходке выработок малого сечения с использованием различных исполнительных органов для обработки забоя в породах различной крепости; крепления кровли переменной устойчивости над проходческим оборудованием и крепления пройденной выработки комплектами рам специальной конструкции [7].

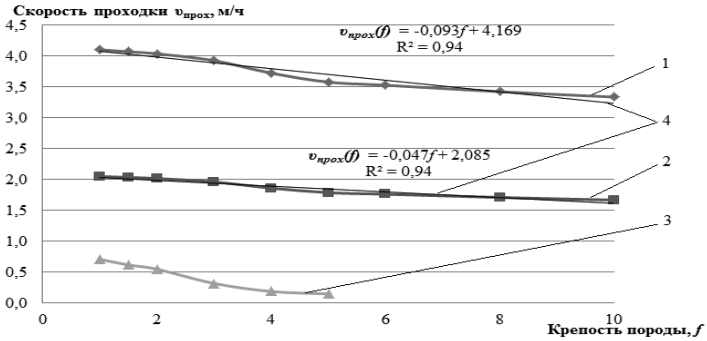


Рисунок 4 – Результаты имитационного моделирования: график зависимости скорости проведения выработки малого сечения от крепости пород (*f*) при использовании: 1 – проходческого комплекса с шагом передвижки каждый 1 м; 2 – комплекса с шагом передвижки каждые 0,5 м; 3 – ручного труда с шагом крепления выработки каждые 0,5 м; 4 – проходческого комплекса (усредненные значения скоростей проходки)

По результатам имитационного моделирования, которые представлены на рис. 4, видно, что на величину скорости проведения выработки малого сечения значительное влияние оказывают крепость пород *f*, а также устойчивость кровли и боков выработки так, например, даже в сложных горно-геологических условиях, когда породный состав забоя меняется (f = 2–6) и появляется необходимость смены исполнительного органа проходческого комбайна и частого крепления пройденной выработки каждые 0,5 м, скорость проходки комплексом как минимум в 3,5 раза выше, чем скорость проведения сбойки вручную шахтерами по однородному забою (f = 2) с использованием минимального технического оснащения (ручных инструментов).

Для промышленного использования проходческого комплекса, используемого при проведении скоростных выработок малого сечения и повышения безопасности ведения горноспасательных работ, требуется выполнение рабочих чертежей, изготовление опытного образца и испытание комплекса в подземных условиях, при этом приблизительная потребность проходческих комплексов для ВГСЧ составляет 20 штук.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреннер В.А.* Щитовые проходческие комплексы / В.А. Бреннер, А.Б. Жабин, М.М. Щеголевский. - М.: Издательство «Горная книга», 2009. – 447 с.
2. Патент № 2067175 Российская Федерация, E21D9/06. Агрегат для проведения выработок по завалу / А.Ф. Эллер, Н.Б. Пушкина; Заявл. 08.02.1994. Опубл. 27.09.1996.
3. Авторское свидетельство СССР №534569. Устройство для проведения спасательных эвакуационных выработок в шахтных завалах / А.А. Попович, В.В. Дыдзинский, В.С. Горбатов, В.Г. Короленко; Заявл. 18.03.1969. Опубл. 05.11.1976.
4. *Kogler P.* 2008 Blind boring system *Third International Platinum Conference "Platinum in Transformation", The Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 277–284.
5. Патент № 2612165 Российская Федерация, МКП E21F 11/00. Устройство для проведения спасательных работ / Д.А. Юнгмейстер, Р.Ю. Уразбахтин, Г.В. Соколова, заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – № 2016116428; заявл. 26.04.2016, опубл. 02.03.2017, Бюл. № 7.
6. Уразбахтин Р.Ю. Результаты теоретических и лабораторных исследований спасательного комплекса для угольных шахт / Р.Ю. Уразбахтин, Д.А. Юнгмейстер // Известия Уральского государственного горного университета? 2019. № 3. С. 98–103.
7. *Urazbakhtin R.Yu., Yungmeyster D.A.* 2019 The results of studies of the tunneling rescue complex for coal mines *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 560 012130.

622:658.562; 622.121; 622.142.1; 622.143.1

ШИБАНОВ Д.А.,
ИВАНОВ С.Л.,
ШИШКИН П.В.
Санкт-Петербургский горный университет

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МОДЕЛИРОВАНИИ И ПРОЕКТИРОВАНИИ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Аннотация. Развитие и применение цифровых технологий актуально на стадии проектирования новых моделей. Изготовление опытного образца и его полноценные опытные испытания для российских производителей карьерных экскаваторов не возможны в виду высокой стоимости головного образца и отсутствия специальных испытательных полигонов. Для снижения рисков машиностроительных предприятий, как изготовителя техники, и ГОКов, как потребителя опытного образца экскаватора необходимо внедрение и развитие технологий «цифрового двойника» на стадии проектирования новых моделей. Общим ориентиром при разработке цифрового двойника карьерного экскаватора служит минимальное участие человека. Благодаря интеграции работ по этапам создания цифрового двойника в информационно-диагностическую систему машины, появится возможность управлять жизненным циклом изделия и оптимизировать ТОиР под фактические условия и режимы эксплуатации.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, цифровые технологии, имитация процесса экскавации, режимы работы, эффективность эксплуатации, техническое обслуживание, ремонт, жизненный цикл.

SHIBANOV D.A.,
IVANOV S.L.,
SHISHKIN P.V.
Saint Petersburg Mining University

DIGITAL TECHNOLOGY IN THE MODELLING AND DESIGN OF MINING EXCAVATORS

Abstract. The development and application of digital technology is relevant at the stage of new models designing. Production of a prototype and its full-scale pilot tests for Russian mining excavators manufacturers are not possible due to the high cost of the head sample and the lack of special testing facilities. For decrease in risks of the machine-building enterprises, as the manufacturer of technics, and Open Pit Mines, as the consumer of a pre-production model of an excavator introduction and development of technologies of "digital twin" at a design stage of new models is necessary. The general reference point at working out of a digital twin of a career excavator is the minimum participation of the person. Thanks to integration of works on stages of creation of a digital double in information-diagnostic system of the machine, there will be a possibility to operate product life cycle and to optimise maintenance and repair under actual conditions and operating modes.

Keywords: mining excavator, digital technology, simulation of excavating process, operating modes, operating efficiency, maintenance, repair, life cycle.

Введение.

При современном инжиниринге карьерных экскаваторов проектирование ведется с использованием передовых CAD/CAM/CAE-систем компьютерного 3*D*-моделирования.

На стадии технического проекта проводятся прочностные расчеты по разработанным трехмерным моделям, проводится оценка режимных параметров главных механизмов экскаватора [1], решаются нелинейные задачи, в т.ч. контактных нелинейностей, нелинейных свойств материалов, геометрических нелинейностей при больших деформациях.

Изготовление опытного образца и его полноценные опытные испытания для российских производителей карьерных экскаваторов не возможны в виду высокой стоимости головного образца и отсутствия специальных испытательных полигонов. Наиболее востребованные на горнодобывающих предприятиях экскаваторы с объемом ковша 20 $м^3$ и более имеют массу более 700 т [2, 3], что влечет за собой соответствующую высокую стоимость самого изделия. Поэтому новая разработанная модель карьерного экскаватора с заводским № 1 частично финансируется Заказчиком, и поставляется на условиях опытно-промышленной эксплуатации.

Для снижения рисков машиностроительных предприятий, как изготовителя техники, и ГОКов, как потребителя опытного образца экскаватора необходимо внедрение и развитие технологий «цифрового двойника» (ЦД-технологий) на стадии проектирования новых моделей.

Цифровые двойники и их создание.

Современное понятие ЦД-технология [4, 5] выходит за рамки обычной 3D-модели. Цифровой двойник – это совокупность самой модели объекта, симуляций рабочего процесса копания с динамической моделью распределения нагрузки на узлы и агрегаты экскаватора, а также данных о работе объекта, получаемых с помощью тензометрии. При этом цифровой двойник не ограничивается сбором данных, полученных на стадии разработки и изготовления продукта. Он продолжает агрегировать данные в течение всего жизненного цикла объекта.

Технология дает возможность моделировать самые разные ситуации при реальной эксплуатации экскаватора. ЦД-технология позволяет заблаговременно оптимизировать конструкцию по выбранным критериям.

При наличии прототипа объекта проектирования, например – рабочее карьерного экскаватора для создания его цифрового двойника необходимо проведение испытаний в реальных условиях эксплуатации для выявления деформаций и действующих напряжений в элементах конструкции. Это позволит получить более точную симуляционную модель, наиболее близкую к реальности. Далее необходимо обеспечить работоспособность и динамичность такого цифрового двойника.

Для этого симулируют процесс копания с возможностью фиксации нагрузок на рабочее оборудование в динамике, сопоставимых с фактическими; моделируется процесс развала горной массы; проводят анализ напряженно-деформированного состояния по полученным нагрузкам в статическом и динамическом режимах нагружения. Как итог появляется возможность симуляции процесса поведения экскаватора на всем протяжении его срока службы.

Общим ориентиром при разработке цифрового двойника рабочего оборудования служит минимальное участие человека в процессе определения и анализа нагрузок, режимов работы конструкции и ее жизненного цикла, в чем состоит главное отличие цифрового двойника от трехмерной модели.

Для реализации заявленной цели, указанной в заголовки настоящей статьи, необходимо выполнение следующих задач:

– разработать параметрические модели узлов рабочего оборудования;

– осуществить моделирование энергетических потоков от главных приводов к рабочему оборудованию;

– моделировать распределения силовых потоков на рабочем оборудовании при экскавации экскаватора;

– моделировать забой с вариативными характеристиками;

– моделировать кинематику процесса экскавации;

– симулировать процесс экскавации с фиксацией нагрузок на элементы рабочего оборудования в процессе копания;

– осуществить статический и динамический расчет конструкции рабочего оборудования по полученной циклограмме нагрузок с учетом полученного напряженно-деформированного состояния;

– имитация изменение рабочего состояния в период срока службы изделия.

Имитация функционирования карьерного экскаватора.

Имитация работы карьерного экскаватора частично реализована [6] в тренажерном комплексе экскаватора ЭКГ-18Р (тренажерный комплекс принадлежит ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова»), а именно работа по моделированию кинематики процесса экскавации, процесса передачи энергии от главных приводов и частичное моделирование забоя. Принцип работы тренажера основывается на математической модели экскаватора, максимально приближенной к реальной машине, учитывая возможные вариации типа электрического привода и установленного рабочего оборудования. Программные средства и алгоритмы тренажерного комплекса позволяют записывать и снимать показания штатной информационно-диагностической системы (ИДС) экскаватора: объем отгруженной горной массы, массивы фактических значений энергетических параметров основных приводов в процессе цикла экскавации и др. Проведенные экспериментальные исследования показали, что значения параметров приводов снятых с ИДС тренажерного комплекса с большой долей вероятности соответствуют значениям при аналогичном цикле реального экскаватора.

В настоящее время выполнено моделирование распределение силовых потоков по рабочему оборудованию (рис. 1). В рамках моделирования изменялся угол резания (угол между осевыми линиями зуба и рукояти, изменение угла производилось регулировкой тяг крепления ковша к рукояти).

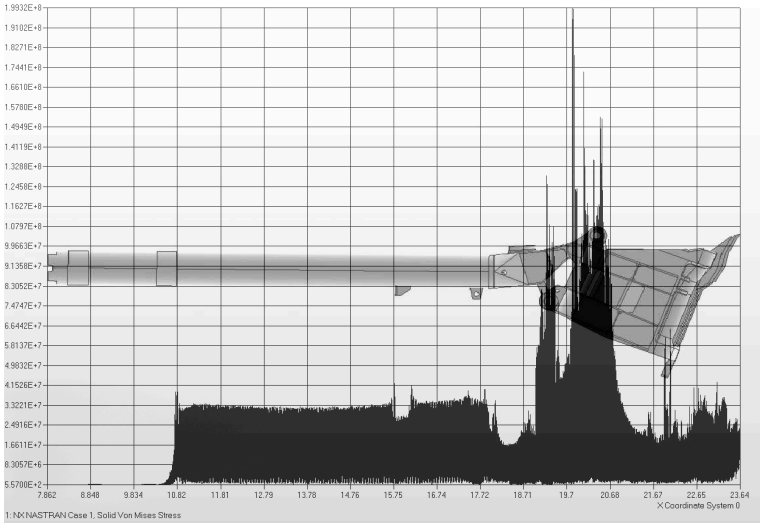


Рисунок 1 – Моделирование распределения силовых потоков по рабочему оборудованию при экскавации

Результаты работ по тем или иным этапам создания цифрового двойника карьерного экскаватора необходимо интегрировать в информационно-диагностическую систему машины [7]. Тем самым будет формироваться статистическая база работы, появится возможность управлять жизненным циклом изделия и оптимизировать ТОиР под фактические условия и режимы эксплуатации, даст сервисным подразделениям широкий спектр возможностей для анализа текущего состояния изделия.

Наличие на всех современных карьерных экскаваторов штатной ИДС обуславливает требование интеграции технологий ЦД с программами и алгоритмами, заложенными в ИДС, для управления жизненным циклом машины и своевременной корректировки ремонтных воздействий при фирменном техническом обслуживании по фактическому состоянию. На рис. 2 изображена схема, описывающая перспективный путь развития интеллектуализации карьерного экскаватора путем развития функций ИДС.

Интеллектуализации карьерных экскаваторов.

Первый этап, подразумевающий сбор и отображение информации о режимах работы экскаватора, электрического оборудования, о неисправностях электрики, температурах и давлениях в редукторах механизмов, пневмо- и гидросистемах, о времени полезной работы, расхода электроэнергии на данный момент реализован на новых карьерных экскаваторах.

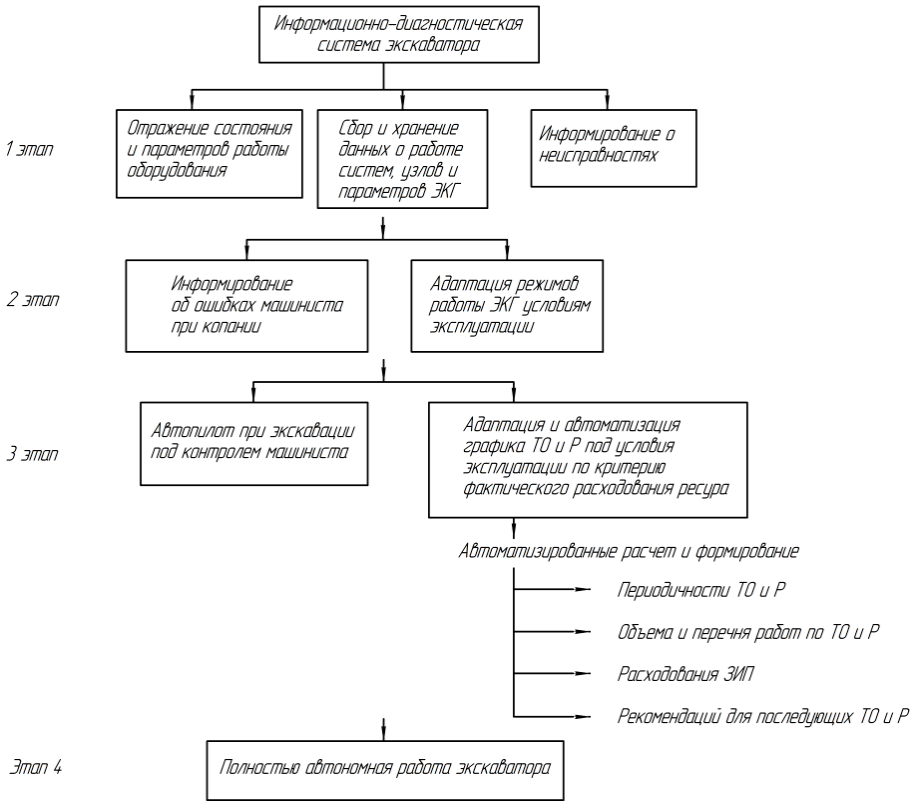


Рисунок 2 – Этапы развития интеллектуализации карьерных экскаваторов

Второй этап заключается в участии информационно-диагностической системы в корректировании режимов работы экскаватора в конкретных условиях эксплуатации. На данный момент, эти возможности ИДС реализованы частично: разработаны системы автоматической защиты механического оборудования и контроля нагрузки на рабочих органах экскаватора [8, 9].

Следующий этап развития ИДС заключается, во-первых, в автоматизации процесса экскавации горной массы, при которой машинист только контролирует работу экскаватора, во-вторых, в автоматизированной адаптации графика технического обслуживания и ремонта к конкретным условиям эксплуатации. Именно сюда входит разработка способов определения фактического технического состояния экскаваторов, на основании которых и должна быть реализована система ТО и Р, полностью рассчитываемая информационно-диагностической системой. ИДС на этом уровне развития должна определять периодичность и объемы работ, считать количество необходимых запасных деталей, диагностировать время простоя на ремонт, помогать в поиске причины отказа, обеспечивать смазку узлов и систем и в первую очередь

ресурсоопределяющих на базе достоверной диагностической информации (рис. 3) [11, 12].

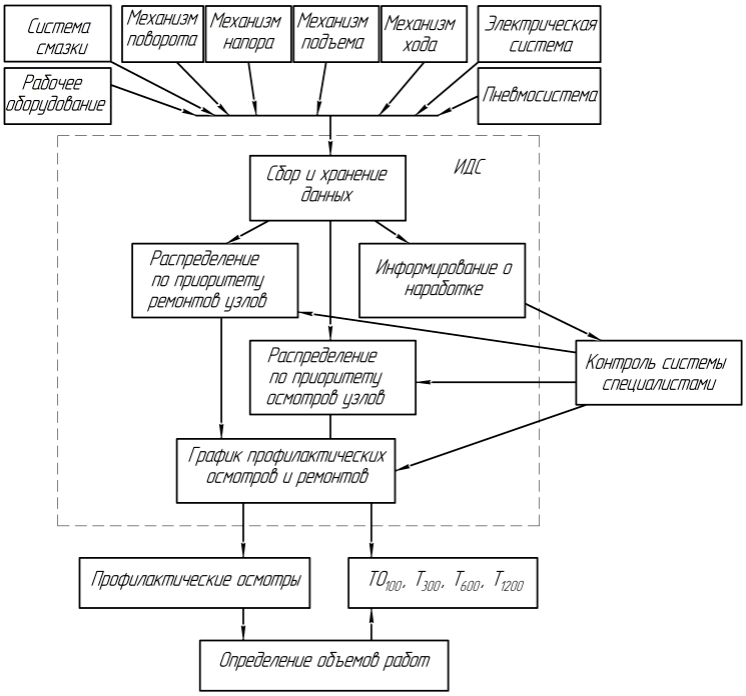


Рисунок 3 – Функционирование системы ТО и Р экскаватора по фактическому состоянию

Для каждой группы узлов и агрегатов экскаватора должны быть разработаны критерии оценки фактической наработки, сформированы и алгоритмы управления жизненными циклами. Данные о фактическом состоянии отдельных узлов от каждой такой подсистемы передаются в ИДС, где они аккумулируются, обрабатываются и интерпретируются для управления жизненным циклом экскаватора по средствам влияния на график ТО и Р. Специалисты ремонтной службы предприятия и завода-изготовителя осуществляют контроль за работой системы. Таким образом, обеспечивается функционирование технического сервиса в рамках стратегии технического обслуживания по фактическому состоянию. Алгоритм работы этой системы представлена на рис. 3.

Выводы.

Применение и дальнейшее развитие цифровых технологий при проектировании карьерных экскаваторов для повышения уровня их интеллектуализации и управления техническим состоянием в период жизненного цикла четвертым, и конечным, этапом является создание экскаватора, работающего полностью автономно и требующего вмешательства человека, для определения производственных задач и выполнения ремонтных и наладочных работ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Комиссаров А.П.* Оценка режимных параметров главных механизмов экскаватора «Горный» / А.П. Комиссаров, Ю.А. Лагунова, В.С. Шестаков, О.А. Лукашук // Горное оборудование и электромеханика, 2019. № 3(143). С. 3-8.
2. *Anistratov K., Donchenko T., Shibanov D.* 2018 Digging up potential *World Coal* 27(7) 45-47.
3. *Иванов И.Ю.* Интенсификация процессов экскавации горных пород / И.Ю. Иванов, А.П. Комиссаров, Ю.А. Лагунова, В.С. Шестаков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2015. № 3. С. 94-100.
4. *Курганова Н.В.* Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства / Н.В. Курганова, М.А. Филин, Д.С. Черняев, А.Г. Шаклеин, Д.Е. Намиот // International Journal of Open Information Technologies, 2019. 7(5). 104-109.

5. Как цифровые двойники помогают российской промышленности. – Rusbase, 2019. URL: https://rb.ru/longread/digital-twin.
6. *Емельянов А.А.* Тренажерный комплекс карьерного экскаватора, как инструмент оценки величины его остаточного ресурса / А.А. Емельянов, С.Л. Иванов, Д.А. Шибанов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XVI международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады 12-13 апреля 2018 г. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2018. С. 378-383.
7. *Ганин А.Р.* Современные инженерные решения и практический опыт эксплуатации карьерных экскаваторов ЭКГ-18Р/20К производства «ИЗ-КАРТЭКС» / А.Р. Ганин, Т.В. Донченко, Д.А. Шибанов // Горное дело, 2014. №1(2). С. 40-47.
8. *Великанов В.С.* Развитие научно-методологических основ совершенствования карьерных экскаваторов на базе нечетко-множественного подхода: монография / В.С. Великанов, М.Ю. Гуров. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – 217 с.
9. *Velikanov V.S., Dyorina N.V., Panfilova O.R., Zalavina T.Yu.* 2020 Determination of the possible causes factors of the functionality impairment of the career *excavator IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 709 (2) 022032.
10. *Knyazkina V.I., Safronchuk K.A., Ivanov S.L.* 2019 About possibility of immediate evaluation of technical condition of mining equipment using signal value of acoustic emission friction *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 560 012068.
11. *Safronchuk K.A., Knyazkina V.I. and Ivanov S.L.* 2019 Mobile lubrication and filling units to reduce mining machines and equipment downtime when providing maintenance *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 560 012088.

УДК 622.23.05.51

ШИШКИН Е.В.
Санкт-Петербургский горный университет
КАЗАКОВ С.В.
НПК «Механобр-техника» (ЗАО)

ВЛИЯНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ДИНАМИКУ ВИБРОКОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ

Аннотация. Исследовано влияние обрабатываемого материала на динамику виброконусной дробилки. В частности, разработана методика, позволяющая на основании теоретических и экспериментальных исследований определить в режиме рабочего хода численные значения коэффициента вязкого сопротивления колебаниям рабочих органов и, как следствие, усредненные значения амплитуд колебаний рабочих органов машины с учетом технологической нагрузки. Показано, что общепринятый способ учета влияния обрабатываемого материала на динамику вибрационных машин в виде линейного вязкого демпфера в случае виброударных систем не применим, и требует дальнейшей корректировки.

Ключевые слова: виброконусная дробилка, линейный вязкий демпфер, технологическая нагрузка, дезинтеграция, двухмассная система.

SHISHKIN E.V.
Saint-Petersburg Mining University
KAZAKOV S.V.
REC «Mechanobr-Tekhnika»

INFLUENCE OF THE PROCESSED MATERIAL ON THE DYNAMICS OF THE VIBRATING CONE CRUSHER

Abstract. The influence of the processed material on the dynamics of the vibrating cone crusher is studied. In particular, a method has been developed that allows, on the basis of theoretical and experimental studies, to determine the numerical values of the coefficient of viscous resistance to vibrations of working bodies in the working stroke mode and, as a result, the average values of the amplitudes of vibrations of working bodies of the machine, taking into account the technological load. It is shown that the generally accepted method of accounting for the influence of the processed material on the dynamics of vibration machines in the form of a linear viscous damper in the case of vibration shock systems is not applicable, and requires further adjustment.

Keywords: vibrating cone crusher, linear viscous damper, technological load, disintegration, two-mass system.

Виброконусная дробилка [1] предназначена для дробления различных видов природного и техногенного материала. Для эффективной работы дробилки крайне важным является учет влияния обрабатываемого материала на динамику машины, которая, в свою очередь, влияет на технологические показатели дробилки: производительность, насыпную плотность и степень дробления. Поэтому для исследования этого вопроса была использована модель колебательной системы машины с линейно-вязким демпфером между дробящими телами [5-13]. Такой способ учета влияния обрабатываемого материала, в виде эквивалентного вязкого сопротивления колебаниям рабочих органов, на

динамику вибрационных машин (вибрационных грохотов) впервые был предложен и успешно использован в работе [14], а затем развит в монографии [15].

В результате теоретических исследований разработана методика, позволяющая на основании экспериментальных исследований определить в режиме рабочего хода (дробление) численные значения коэффициента вязкого сопротивления колебаниям рабочих органов. Для вычисления коэффициента вязкого сопротивления для данного режима работы дробилки определялась экспериментально усреднённая мощность, характеризующая полезные энергетические затраты на разрушение материала в рабочей камере машины, а также синхронная угловая скорость дебалансных вибровозбудителей, приводящих дробилку в движение. Далее при совместном использовании математического аппарата и данных, полученных с натурного эксперимента, находилось численное значение коэффициента вязкого сопротивления, а затем определялись амплитуды колебаний рабочих органов машины.

Полученные зависимости амплитуд колебаний корпуса и конуса от частоты вращения вибраторов в режиме рабочего хода приведены в виде графиков на рис. 1. Здесь $A_{корп}$ и $A_{кон}$ – экспериментальные значения амплитуд колебаний корпуса и конуса, зафиксированные при помощи высокоскоростной видеокамеры, а $A^*_{корп}$ и $A^*_{кон}$ – расчетные значения амплитуд, полученные из теоретических формул. Анализ экспериментальных и теоретических значений амплитуд колебаний рабочих органов дробилки показал, что они имеют существенные расхождения. Разброс этих значений объясняется тем, что для двухмассных виброударных систем (виброконусной дробилки) принятый способ учета влияния обрабатываемого материала в виде линейного вязкого демпфера оказался не корректным. Необходимо учитывать упругие силы, возникающие при деформации дробимого материала.

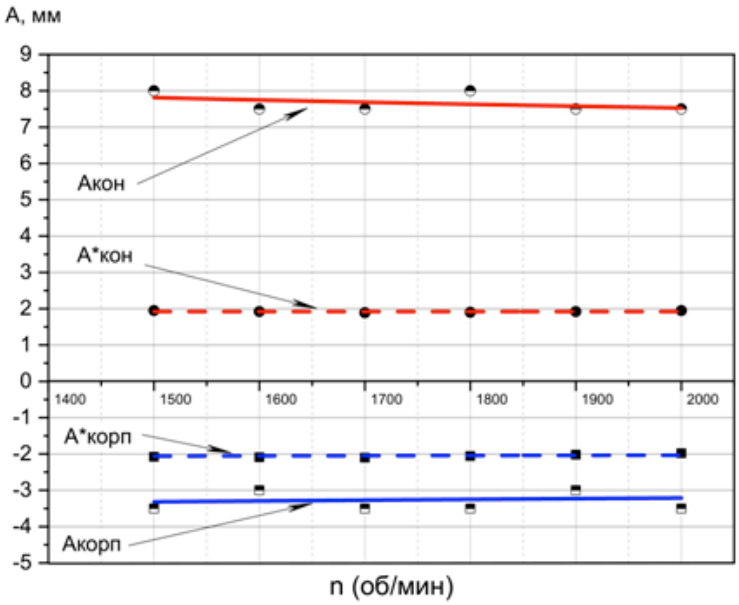


Рисунок 1 – Амплитудно-частотные характеристики корпуса и конуса дробилки в рабочем режиме:
$A_{корп}$ и $A_{кон}$ – экспериментальные значения,
$A^*_{корп}$ и $A^*_{кон}$ – расчетные значения

Таким образом, можно сделать вывод о том, что общепринятый способ учета влияния обрабатываемого материала на динамику вибрационных машин в виде линейного вязкого демпфера в случае виброударных систем не применим, и требует дальнейшей корректировки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №17-79-30056 (проект НПК «Механобр-техника»).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чантурия В.А.* Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья / В.А. Чантурия, Л.А. Вайсберг, А.П. Козлов // Обогащение руд, 2014. №2. С. 3-9.
2. *Ревнивцев В.И.* О рациональной организации процесса раскрытия минералов в соответствии с современными представлениями физики твердого тела / Труды. Совершенствование и развитие процесса подготовки руд к обогащению, 1975. Вып. 140. С. 153-169.
3. *Вайсберг Л.А., Зарогатский Л.П., Туркин В.Я.* Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения. - СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2004. - 306 с.
4. *Вайсберг Л.А.* Новое поколение щековых и конусных дробилок / Л.А. Вайсберг, Л.П. Зарогатский // Строительные и дорожные машины, 2000. № 7. С. 16-21.
5. Вибрации в технике: Справочник: В 6-ти т. Том. 4. Вибрационные процессы и машины. Под ред. Э.Э. Лавендела. - М.: Машиностроение, 1981. - 509 с.
6. *Блехман И.И.* Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. - СПб.: ИД «Руда и Металлы», 2013. - 640 с.
7. *Blekhman I.I.*. Vibrational Mechanics. Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications. Singapore et al: World Scientific Publishing Co. 2000. 509 p.
8. *Dresig H., Fidlin A.* Schwingungen mechanischer Antriebssysteme: Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese. Berlin, Heidelberg: Springer. 2014. 651 s.
9. *Блехман И.И.* Синхронизация динамических систем. - М.: Наука, 1971. - 896 с.
10. *Блехман И.И.* Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения). - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. - 752 с.
11. *Шишкин Е.В.* Вынужденные колебания вибрационной дробилки в резонансной области частот / Е.В. Шишкин, С.В. Казаков // Обогащение руд, 2015. № 5. С. 42-46.
12. *Shishkin E.V.*, *Shishkin P.V.* 2017 Process duty effect on the vibration gyratory-cone crusher dynamics *Journal of Industrial Pollution Control* 33(1) 909-913.
13. *Fidlin A., Drozdetskaya O.* 2015 On the averaging in strongly damped systems: The general approach and its application to asymptotic analysis of the Sommerfeld's effect *Book of Abstracts of IUTAM Symposium on Analytical Methods in Nonlinear Dynamics (Frankfurt, Germany, July 6-9, 2015). Germany: Technische Universität Darmstadt* 19-21.
14. *Барзуков О.П.* Влияние технологической нагрузки на самосинхронизацию вибровозбудителей / О.П. Барзуков, Л.А. Вайсберг, Л.К. Балабатько, А.Д. Учитель // Обогащение руд, 1978. № 2. С. 31-33.
15. *Вайсберг Л.А.* Проектирование и расчет вибрационных грохотов. - М.: Недра. 1986. – 144 с.

УДК 622.271.5

ЮНГМЕЙСТЕР Д.А.,
КОРОЛЕВ Р.И.,
БОРОДКИН Э.О.
Санкт-Петербургский горный университет
ИВАНОВСКИЙ С.Л.
ООО «Научно-проектный центр «ЭВЕРС»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДОБЫЧИ КОБАЛЬТО-МАРГАНЦЕВЫХ КОРОК

Аннотация. Рассмотрены основные виды глубоководных полезных ископаемых, содержащих востребованные на сегодняшний день компоненты: марганец, никель, медь, кобальт, молибден, цинк.Проведен анализ существующих конструкций устройств для сбора глубоководных полезных ископаемых. Обоснована компоновочная схема комплекса для добычи железомарганцевых конкреций и кобальто-марганцевых корок состоящая из кораблей обеспечения, канатной подъемной системы и сборщиками. Описан сборщик для глубоководной добычи ЖМК и КМК с исполнительными органами в виде камер разряжения или устройства грейферного типа соответственно для каждого вида полезного ископаемого (ПИ).

Ключевые слова: сборщик; кобальтомарганцевые корки; железомарганцевые конкреции; глубоководная добыча; камеры разряжения; грейфер.

IUNGMETER D.A.,
KOROLEV R.I.,
BORODKIN E.O.
Saint-Petersburg Mining University
IVANOVSKY S.L.
Research and design center LLC “EVERS”

JUSTIFICATION OF THE DESIGN FOR DENICE FOR DEEP-SEA MINING

Abstract: The main types of deep-sea minerals containing the components demanded today are considered: manganese, nickel, copper, cobalt, molybdenum, zinc. The analysis of existing designs of devices for collecting deep-sea minerals is carried out. The layout scheme of the complex for the extraction of manganese nodules (MN) and cobalt-rich manganese crusts (CMC) consisting of support ships, a rope hoisting system and mining collectors is justified. The collector for deep-water mining of the MN and CMC with executive bodies in the form of pressure drop chambers or clamshell type devices, respectively, for each type of mineral is described.

Key words: mining collector;cobalt-rich manganese crusts; manganese noduls; deep-sea mining; pressure drop chambers, clamshell type device.

Введение

На протяжении нескольких десятков лет ведутся интенсивные поисковые и разведочные работы в Тихом океане. В процессе этих исследований определилось три типа твердых полезных ископаемых.

Железомарганцевые конкреции (ЖМК) рассыпчато залегающие на дне Тихого океана на глубинах 4000-6000 м. Глубоководные месторождения сульфидов (ГПС) – горы,

образованные в результате гидротермальных процессов, а именно тектонических сдвигов плит на глубинах воды около 1200-3500 м. Кобальтомарганцевые корки (КМК) распространены на склонах подводных гор и гайотах на глубине 800-2500 м. Обычно встречаются в виде корок, толщиной до 20 см, покрывающих склоны и горы, но также могут быть и рассыпчатыми конкрециями [1-6].

Для Российской Федерации возможность добычи ЖМК и КМК представляет особый интерес, поскольку растет промышленная потребность в минералах, содержащихся в ЖМК и КМК. Это связано, также, с практически полным отсутствием марганцевых месторождений и заканчивающимися запасами никеля на территории нашей страны. Ввиду этого, существует необходимость по закупке этого сырья за границей.

Актуальной проблемой является отсутствие проверенного оборудования и устройств для извлечения ЖМК, КМК и ГПС [7]. В виду схожих условий залегания и распределения КМК и ЖМК по дну, предлагается комплекс, который может быть использован в качестве добывающего обоих видов полезных ископаемых. Подбор рациональных параметров оборудования и материалов из которых будут изготовлены узлы данного комплекса – важная задача.

1. Анализ выбора конструкции сборщика глубоководных полезных ископаемых

В табл. 1 представлены экспертные оценки 10 важнейших параметров,разработанных в Мире, устройств для сбора глубоководных полезных ископаемых. Также, втаблице, представлены коэффициенты значимости каждого из параметров, сгруппированные в два набора:

- 1-й набор, обозначен *, соответствует максимальному приоритету параметра «экология»;
- 2-й набор, обозначен **, соответствует максимальному приоритету параметра «технико-экономические показатели».

Метод анализа с использованием морфологической таблицы наглядно показывает, что наиболее предпочтительными среди всех, будут являться сборщики, с механизмами шагания на лапах (манипуляторах), а также с устройствами в виде камер разряжения и грейферов, использованных в качестве исполнительного органа для сбора и погрузки полезного ископаемого. Остальные компоновочные схемы, проигрывают тем, что имеют механизмы передвижения, основанные на гусеничном ходу, но данные механизмы значительно сказываются на экологии дна, поэтому имеют уменьшенные оценки по экологическому приоритету.

Учитывая все существующие наработки и требования, предлгаемая нами компоновочная схема сборщика может быть применена в добывающем комплексе, основанном на применении судна (кораблей) обеспечения, имеющего систему канатного подъема заполненных сосудов с рудной массой и систему опуска самоходных сборщиков (горных машин) (2-6 единиц) с исполнительными органами для сбора полезного ископаемого (ПИ), предварительно, в бункер, находящийся на сборщике, а затем перегрузкой в сосуд для подъема на поверхность.

Управление и согласование всех устройств необходимо осуществлять с помощью системы телеметрии, которая основана на акустическом принципе передачи сигналов управления и навигации.

Непосредственно, компоновочная схема будущего сборщика, включает: блок управления; 4-ре манипулятора, на концах которых закреплены устройства для опирания сборщика, выполняющие одновременно и функции исполнительного органа (сбора и погрузки); бункер (емкость) для промежуточного накопления собранной горной массы. Принцип совмещения функций перемещения и добычи в одном узле сборщика является по всем основным показателям выигрышным.

Таблица 1.

Анализ конструкции сборщиков глубоководных ПИ

№ п/п	Функции	Коэф. важности	Варианты				
			Устройства с манипуляторами и захватами в виде камер разрежения	Устройства шагающего типа и захватами грейферного типа и ударниками	Устройства с резцовыми корончатыми исполнительными органами и нагребающими лапами	Альтернативные устройства: шнеки, отбойные штанги, диски, барабаны	Ковши на канатах/ цепях
1	Высокая производительность	1**; 0,5*	0,6	0,7	1	0,8	0,5
2	Возможность и простота селективного отбора	0,2**; 0,6*	1	0,8	0,5	0,7	0,6
3	Минимальное влияние на окружающую среду	0,3**; 1*	0,9	0,6	0,6	0,7	0,5
4	Низкие удельные энергозатраты	0,8**; 0,4*	0,8	0,7	0,9	0,7	0,6
5	Простота конструкции	0,6**; 0,2*	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9
6	Возможность изготовления на отечественных мощностях	0,1**; 0,1*	1	0,8	0,8	0,8	1
7	Минимальная стоимость изготовления	0,7**;0,8	0,7	0,7	0,9	0,8	0,9
8	Возможность захвата и транспортирования в габаритах придонного аппарата	0,3**; 0,7*	0,9	0,9	0,6	0,8	0,9
9	Способность разрушать монолитные залежи мощностью до 1 м и крепостью f < 4	0,4**;0,30,6*	0,3	0,8	0,9	0,8	0,3
10	Способность работать на весьма неравномерных поверхностях со впадинами и буграми	0,5**; 0,9*	0,9	0,9	0,5	0,5	0,8
	Суммарная оценка		8,2	7,6	7,5	7,4	7

2. Обоснование конструкции механизма шагания сборщика

Кафедрой машиностроения Санкт-Петербургского горного университета разработан и запатентован сборщик с захватом конкреций с помощью пластин (камер) разряжения, способный передвигаться по дну шаганием, опираясь также на пластины (камеры) разряжения. Захват конкреций в таком случае происходит за счет разности давлений между внутренним (в камере) и внешним (на дне океана) [8-10].

Производя расчеты нагрузок и кинематики манипулятора с исполнительным органом в виде камеры разряжения на запатентованном образце, были выявлены основные недостатки, заключающиеся в сложности конструкции, использовании множества звеньев и сложной гидросистемы.

В результате, была предложена другая конструкция механизма шагания (рис. 1-3). Она состоит из двух частей: стрелы и рукояти. Для их движения требуется задействовать всего два гидроцилиндра. Благодаря простоте конструкции, есть возможность обеспечить вылет механизма на значительно большее расстояние и собрать вокруг установки больше ЖМК.

Расчет усилий (рис. 4), оказываемых на гидроцилиндры, показал максимальные

нагрузки на штоки, позволил определить диаметры поршней и длины штоков, и необходимый объем гидрожидкости для осуществления движения. Также расчет показал слабые места конструкции для осуществления шагания.

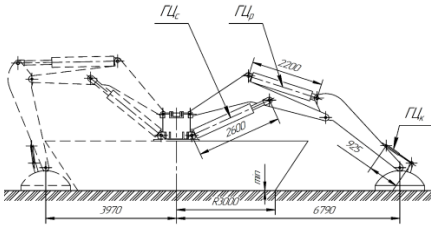


Рисунок 1 – Положение стрелы и рукояти в момент начала шагания

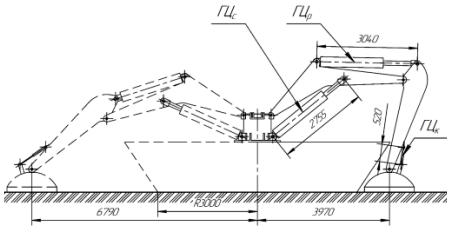


Рисунок 2 – Положение стрелы и рукояти в конце шагания

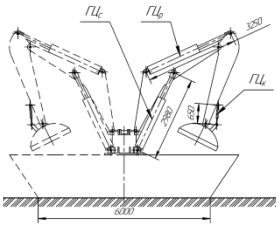


Рисунок 3 – Положение стрелы и рукояти в момент разгрузки

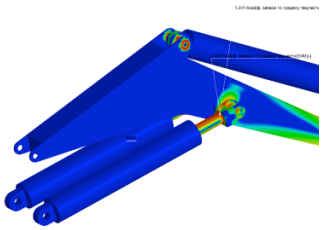


Рисунок 4 – Расчет штоков на прочность

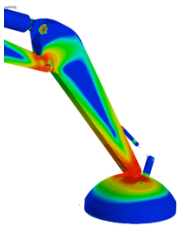


Рисунок 5 - Прочностной анализ рукояти

Согласно расчетным данным весь исполнительный орган был проработан в CAD-программе (рис. 5), что дало возможность проанализировать работоспособность данного механизма, исключив слабые места в конструкции. Учитывая все полученные данные, можно снизить объем металла, что облегчит и удешевит данный агрегат.

3. Обоснование компоновочной схемы и конструкции устройств для добычи КМК

Так как кобальт-марганцевые корки отличаются своей твердостью и условиями залегания в виде однородного массива, то они требуют предварительного разрыхления. Таким образом данная задача может быть решена заменой камер разряжения на устройство грейферного типа (рис 6). Один или два из манипуляторов может быть оснащен грейфером с ударником.В качестве грейфера можно использовать гидравлический грейфер с ковшом закрытого типа для жидко-сыпучих материалов.

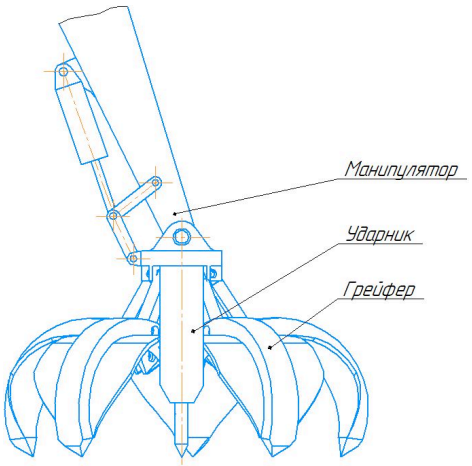


Рисунок 6 - Исполнительный орган сборщика глубоководных КМК

Заключение

Разработанная конструкция прототипа сборщика, представленная выше, обоснована и может быть использована для основных видов подводных месторождений, таких как КМК и ЖМК. Данная конструкция сборщика может быть адаптирована для любого вида транспортирования руды со дна на поверхность, в том числе и для канатного подъемного транспорта. Использование универсальных взаимозаменяемых узлов и агрегатов, которые в процессе изучения вопроса могут заменяться, позволит повышатьпроизводительность и рентабельность добычи глубоководных полезных ископаемых.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tetsuo Y.* Fundamental geotechnical consideration for design of deep-sea mining systems 2017 *Springer International Publishing* 259-295.
2. Bilenker L.D., Romano G.Y., McKibben M.A. 2016 Kinetics of sulfide mineral oxidation in seawater: Implications for acid generation during in situ mining of seafloor hydrothermal vent deposits *Applied Geochemistry* 75 20-31.
3. *Atmanand M.A., Ramadass* G.A. 2017 Concepts of deep-sea mining technologies *Springer International Publishing* 295-341.
4. *Guo Q., Chen Q., Miao S., Xi X., Zhang Z.* 2015 Fluid-mechanical interaction simulation and coupling analysis for deep mining of subsea resources *Metallurgical and Mining Industry* 7(6) 281-288.
5. *Jia Y., Nason P., Maurice C., Alakangas L., Ohlander B.* 2015 Investigation of biosolids degradation under flooded environments for use in underwater cover designs for mine tailing remediation *Environmental Science and Pollution Research* 22 (13) 10047-10057.
6. *Kowalczuk P.B., Snook B., Kleiv R.A., Aasly K.* 2018 Efficient extraction of copper and zinc from seafloor massive sulphide rock samples from the Loki's Castle area at the Arctic Mid-Ocean Ridge *Minerals Engineering* 115 106-116.
7. *Голева Р.В.* К проблеме изучения и освоения минерально-сырьевых ресурсов Мирового океана / Рациональное освоение недр, 2010. №1. с.53-42.
8. *Юнгмейстер Д.А., Смирнов Д.В.* Привод транспортного органа агрегата для добычи железомарганцевых конкреций / Записки горного института, 2005, Т.167(2). С. 99-101.
9. *Юнгмейстер Д.А.* Машины и оборудование для добычи железомарганцевых конкреций / Д.А. Юнгмейстер, Д.В. Смирнов, А.П. Вержанский, И.А. Исаев. - СПб.: Политехника-сервис, 2015. — 135 с.
10. *Юнгмейстер Д.А. и др.* Пат. №178978 Российская федерация, E21C 50/02, Придонное добычное устройство для сбора железомарганцевых конкреций с морского дна/опубл. 24.04.2018 – 8 с.

УДК 621.285.4:624.191.6

ЮНГМЕЙСТЕР Д.А.,
УРАЗБАХТИН Р.Ю.,
ЯЧЕЙКИН А.И.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра машиностроения

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РОТОРНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКИХ ЩИТОВ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАЗРУШЕНИЯ СЛОЖНОСРУКТУРИРОВАННОГО ЗАБОЙНОГО МАССИВА

Аннотация. В статье рассмотрены особенности строительства тоннелей метро в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга с применением тоннелепроходческих щитов фирмы Herrenknecht. Проанализирована работа роторных исполнительных органов гибридного типа, выявлены недостатки, а также предложено техническое решение – установка виброактивных породоразрушающих инструментов. Для изучения работы виброактивных породоразрушающих инструментов были произведены экспериментальные исследования виброактивных шарошек. Предложенное техническое решение для модернизации роторных исполнительных органов тоннелепроходческих щитов позволит существенно повысить эффективность разрушения сложноструктурированного забойного массива.

Ключевые слова: тоннелепроходческий щит; роторный исполнительный орган; виброактивные шарошки; комбинированный забой; скорость проходки.

YUNGMEYSTER D.A.,
URAZBAKHTIN R.YU.,
IACHEIKIN A.I.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of mechanical engineering

IMPROVEMENT OF ROTARY EXECUTIVE BODIES OF TUNNELING BOARDS FOR INTENSIFICATION OF DESTRUCTION OF COMPLEX- STRUCTURED BOTTOM-HOLE ARRAY

Abstract. The article discusses the features of construction of metro tunnels in the mining and geological conditions of the Metrostroy mines of St. Petersburg using tunnel shields of the company Herrenknecht. The work of hybrid-type rotary actuators is analyzed, shortcomings are identified, and a technical solution is proposed – the installation of vibro-active rock-breaking tools. To study the operation of vibro-active rock-breaking tools, bench studies of vibro-active balls were performed. The proposed technical solution for the modernization of the rotary Executive bodies of tunnel passage boards will significantly increase the efficiency of destruction of a complex-structured bottom-hole array.

Keywords: tunnel shield; rotary executive body; vibroaction cutter; combination mine; the rate of penetration.

В городе Санкт-Петербурге, как и во всем мире наиболее востребованным транспортом является метрополитен. Такая популярность обусловлена простотой и скоростью передвижения из одной точки города в другую. Однако, несмотря на высокую востребованность метро, темпы его строительства в Санкт-Петербурге весьма низкие.

Это вызвано сложными горно-геологическими условиями в которых осуществляется проходка выработок. В зависимости от глубины строительства тоннелей забойный массив представлен глиной с разнообразием твердых включений гранитных валунов, гальки, а также прослоек известняка и песчаника [1].

Проходка тоннелей в таких горно-геологических условиях очень трудоемкая и медлительная, несмотря на то, что осуществляется современными тоннелепроходческими щитами компании Herrenknecht [2] (рис. 1), роторные исполнительные органы которых гибридного типа. Это означает, что для более эффективного разрушения комбинированного забойного массива они оснащены не только резцами, но и дисковыми шарошками [3]. Однако практика использования тоннелепроходческих щитов показала низкую скорость проходки, обусловленную малой подачей исполнительного органа тоннелепроходческого щита на забой и частые выходы из строя породоразрушающего инструмента.

Рисунок1 – Тоннелепроходческие щиты Herrenknecht S-441 и Herrenknecht S-782

В настоящее время задача повышения эффективности разрушения комбинированного забойного массива и как следствие повышение производительности тоннелепроходческих щитов является актуальной. Для выполнения поставленной задачи возможно применение виброактивных породоразрушающих инструментов – шарошек, конструкция которых запатентована [4]. Принцип их действия основан на дробяще-скалывающем способе разрушения забоя [5].

Для проверки работоспособности виброактивных шарошек изготовлен экспериментальный стенд (рис. 2, а) на котором проводятся исследования функции h – глубины внедрения шарошек в породу от таких параметров как осевое усилие P_{oc} и энергия удара $A_{уд}$.

Работа экспериментального стенда осуществлялась следующим образом. Подвижная рама 2, с жестко закрепленным на ней перфоратором 3 и шарошечной моделью 4 (рис. 2, б) устанавливается в основную раму 1 до соприкосновения шарошечной модели с образцом породы 5. Далее в режиме «сверление» производится запуск перфоратора и за определенное время производится разрушение образца породы с последующим фиксированием глубины внедрения шарошек. Аналогично проводится исследование с наложением ударной нагрузки. При этом перфоратор переключается в режим «сверление с ударом».

При проведении экспериментальных исследований помимо наложения ударной нагрузки $A_{уд}$ производилось изменение осевого усилия P_{oc} путем нагружения верхней части подвижной рамы сменными грузами. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3.

Рисунок 2 – Экспериментальный стенд и шарошечная модель
а - экспериментальный стенд; б – шарошечная модель

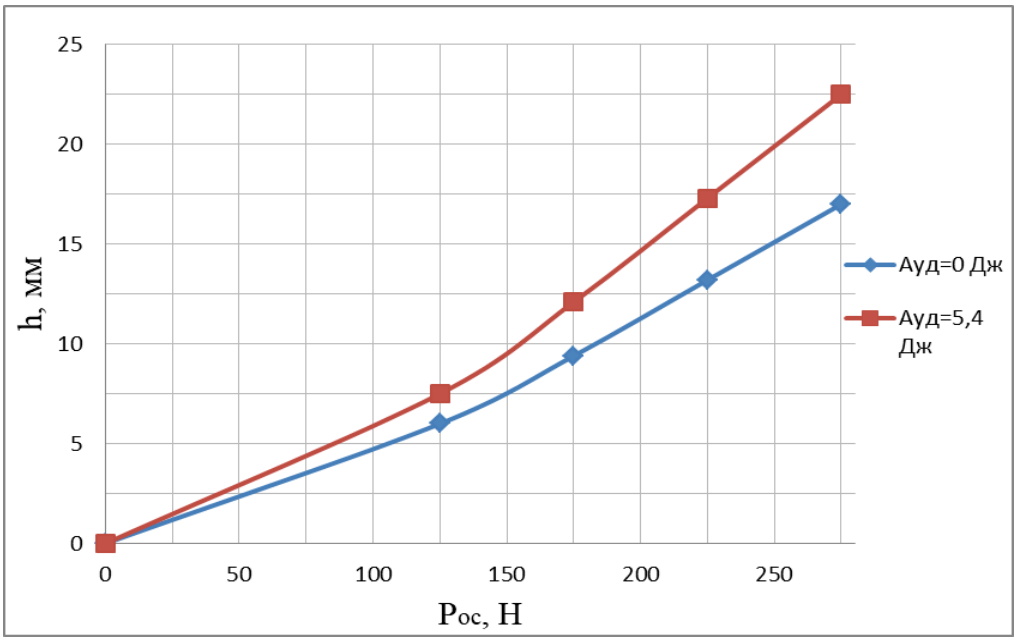


Рисунок 3 – Зависимость глубины внедрения шарошечной модели в глину от осевого усилия и энергии удара

Проанализировав график можно сделать вывод о том, что при увеличении осевого усилия совместно с наложением ударной нагрузки происходит увеличение значения величины внедрения шарошечной модели в породу. Помимо этого существенно меняется характер разрушения, появляются крупные сколы породы.

Установка виброактивных породоразрушающих инструментов, а именно виброактивных шарошек на роторный исполнительный орган современных тоннелепроходческих щитов позволит повысить эффективность разрушения сложноструктурированного забойного массива, увеличить производительность и расширить область его применения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дашко Р. Э.* Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / Р.Э. Дашко, О.Ю. Александрова, П.В. Котюков, А. В. Шидловская // Развитие городов и геотехническое строительство, 2011. №1. С. 1-47.
2. Проходческая техника, открывающая новую эру для подземных транспортных систем: Проспект «Херренкнехттоннельсервис», 2007. – 20 с.
3. *Бреннер В.А.*. Щитовые проходческие комплексы / В.А.Бреннер, А.Б. Жабин, М.М. Щеголевский и др. – М.: Горная книг,а 2009. – 360 с.
4. Патент РФ 2701764.
5. *Юнгмейстер Д.А.*. Использование сменных исполнительных органов комплекса для проведения специальных выработок в шахтах «Метрострой» СПб / Д.А. Юнгмейстер, С.А. Лавренко, А.И. Исаев // Труды 9-ой Международной Конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Минск, 2013, Т.1. С. 454-457.

УДК621: 677

ЯКОНОВСКАЯ Т.Б.,
ЖИГУЛЬСКАЯ А.И.
Тверской государственный технический университет

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОРФОДОБЫВАЮЩИХ МАШИН

Аннотация. В статье проводится анализ актуальных проблем системы технической эксплуатации технологических машин торфодобывающих предприятий России. Приводятся результаты исследования работы торфодобывающей машины БФТ–9 и тенденции развития стратегий сервисного обслуживания.

Ключевые слова: стратегия ремонта, торфодобывающие машины, техническая эксплуатация.

ZHIGULSKAYA A.I.,
YAKONOVSKAYA T.B.
Tver State Technical University

MODERN PROBLEMS AND TRENDS OF DEVELOPMENT OF SYSTEM OF TECHNICAL OPERATION OF PEAT-MINING MACHINES

Abstract. The article analyzes the urgent problems of the system of technical operation of technological machines of peat-mining enterprises in Russia. The results of a study of the operation of the BFT-9 peat extraction machine and trends in the development of service strategies are presented.

Keywords: repair strategy, peat extraction machines, technical operation.

Современные экономические условия, в которых работают торфодобывающие предприятия России негативно сказываются на их экономической безопасности. Для стабильной, эффективной и целесообразной, с точки зрения экономики, работы предприятий торфяной отрасли необходимо особое внимание уделять техническому состоянию парка технологических машин [1, 2, 3].

В условиях ремонтной базы торфодобывающих предприятий используются три стратегии проведения работ по технической эксплуатации торфодобывающей техники, которые предполагают систему инженерно-эксплуатационных правил, однозначно определяющих выбор решения о содержании, месте и времени выполнения ремонтных операций [4, 5, 6]:

1. Стратегия планово-предупредительного ремонта (ППР) (стратегия по наработке).Эта стратегия предполагает перечень (объем) и периодичность выполнения операций определяющихся значением наработки (календарного времени, ресурса) с начала эксплуатации или после капитального (среднего) ремонта.

2. Стратегия ремонта по состояниюопределяется перечнем и периодичностью выполнения операций определяющихся фактическим состоянием объекта в момент начала технического обслуживания.

3. Стратегия ремонта по потребности (стратегия по отказу).Торфодобывающие машины ремонтируется (или заменяется) по причине отказа (аварийного) и невозможности дальнейшего использования.

В настоящее время основной стратегией ремонта парка технологических машин в

условиях торфодобывающих предприятий является планово-предупредительный ремонт. В структуре технологического парка торфодобывающих предприятий до 90% приходится на долю машин иностранного производства, а это в свою очередь сказывается на процессе их сервисного обслуживания [7-14]. Так как торфодобывающие машины относятся к классу горной и специализированной техники, то планово-предупредительный ремонт таких машин сложный и трудоемкий процесс. Использование стратегии ППР не достаточно эффективно, так как ее основные проблемы заключаются в:

– усложненном планировании техническихвоздействий;

– устаревшейсистеме организации технического сервиса и ремонта;

– большой трудоемкости расчета ремонтных процессов;

– отсутствии возможности корректировки выполняемых по плану работ.

Стратегия по состоянию предусматривает высокий уровеньработ по диагностике узлов, агрегатов, систем и конструкций торфодобывающих машин, что возможно только при условии наличия достаточно эффективной ремонтно-технической базы торфодобывающих предприятий. По такой стратегии объем ремонтов и время между ними заранее не фиксированы, но определяются по результатам регулярной диагностикиторфяных машин и их агрегатных частей, а также мониторинга состояния машин с помощью автоматизированных средств контроля. Эта стратегия позволяет существенно экономить ресурсы, поэтому она считается наиболее прогрессивной для сложных и дорогих торфодобывающих машин (табл. 1).

Стратегия по аварийному отказу считается самой непредсказуемой и крайне не надежной, стоимость ремонтных работ варьируется по этой технологии в зависимости от тяжести ремонтных работ и значимости аварийного выхода из строя агрегата или узла торфодобывающей техники. В случае аварийного отказа ремонтные работы выполняются в полевых условиях непосредственно на участке где проводятся добычные работы.

Таблица 1.

Стоимость ремонтных работ фрезерной машины по добыче торфа БФТ – 9

Показатель	Стратегии ремонта		
	ППР	По состоянию	По отказу
Цена БФТ – 9, евро.	90000		
Стоимость ремонтных работ, евро.	6000	4700	4000-9000
Качество ремонта (эффективность), %	77	94	61

Самой главной проблемой ремонта торфодобывающих машин вне зависимости от принятых стратегий технического обслуживания является высокая стоимость и длительное время ожидания запасных частей, деталей и блоков машин. Поэтому, в настоящее время, многие сервисные предприятия, например, ООО ГринМаш г. Тверь, изготавливают необходимые запасные части на собственном производстве используя различные технологии восстановления и реставрации [15]. Еще одной современной тенденцией развития системы технической эксплуатации торфодобывающих машин является внедрение автоматизации процесса управления ремонтными работами и применение технологии мобильного экспресс-сервиса торфодобывающих машин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жигульская А.И., Яконовская Т.Б., Жигульский М.А., Яконовский П.А.* Анализ опыта использования различных стратегий ремонта торфяной техники на примере ООО ТЭК «ТВЕРЬРЕГИОНТОРФ» / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции. Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой, 2019. С. 408-412.

2. *Зюзин Б.Ф., Жигульская А.И., Яконовская Т.Б., Жигульский М.А.* Технологический парк

торфоразработок России: проблемы структуры и износа / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017. Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. Научные редакторы В.В. Максаров, В.В. Габов, 2017. С. 42-46.
3. *Жигульская А.И., Яконовская Т.Б., Соболь Ю.В., Давитян С.К., Петрова Е.В.* Анализ эксплуатационных свойств торфяных машин и оборудования с целью выявления перспективных направлений их модернизации / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2015. № 1. С. 66-70.
4. *Зюзин Б.Ф., Жигульская А.И., Яконовская Т.Б., Жигульский М.А.* Методология управления техническим состоянием торфодобывающих машин и оборудования на примере фрезерного барабана БФТ-9 / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018. Сборник тезисов международной научно-практической конференции. Научные редакторы В.В. Максаров, В.В. Габов, 2018. С. 105.
5. *Михайлов А.В., Жигульская А.И., Яконовская Т.Б.* Обоснование структуры парка технологических машин торфодобывающего производства (на примере торфяного фрезерного барабана) / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции в рамках Уральской горонопромышленной декады. Под общ. ред. Ю.А. Лагуновой, 2018. С. 359-361.
6. *Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.U.* 2019 Weather conditions as a factor affecting the performance of modern powerful mining excavators *Journal of Physics: Conference Series* 1399(4) 044070.
7. *Иванова П.В., Иванов С.Л., Кувшинкин С.Ю., Шибанов Д.А.* Выбор рациональной системы организации технического обслуживания и ремонта карьерных экскаваторов для заданных горнотехнических условий / Инновации на транспорте и в машиностроении. Сборник трудов III международной научно-практической конференции: в 5 томах. Под редакцией В.В. Максарова, 2015. С. 94-97.
8. *Пумпур Е.В., Князькина В.И., Сафрончук К.А., Иванов С.Л.* Оценка факторов влияния на выбор стратегии технического обслуживания экскаваторов / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2019. №S41. С. 3-19.
9. *Shishlyannikov D.I., Vasilyeva M.A.* 2017 Operational control and diagnostics of the equipment by the parameters of the electric drive power supply by the example of deep well pump units *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 12-13.
10. *Дрыгин М.Ю., Курышкин Н.П.* Диагностика состояния тяжёлой горной техники при планово-предупредительных ремонтах / Динамика систем, механизмов и машин, 2017. №2. Т.5. С. 115-122.
11. *Озорнин С.Ф., Бердиков И.Е.* Совершенствование организации мониторинга изменений технического состояния машин в эксплуатации / Вестник ЗабГУ, 2014. №08(111). С. 64-69.
12. *Чооду О.А.* Эксплуатация горных транспортно-технологических машин на месторождениях полезных ископаемых на территории РТ / Вестник ТувГУ, 2014. № 3(22). С. 92-102.
13. *Чооду О.А.* Перспективы развития технического обслуживания и ремонта горной техники / ВЕСТНИК Технические и физико-математические науки, 2018. №3. С. 7-15.
14. *Тимошенко Ю.Н., Иванов Г.Н.* Информатизация технического обслуживания горного оборудования / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2017. № 6. С. 164-171.
15. *Жигульская А.И., Яконовская Т.Б., Жигульский М.А., Оганесян А.С.* Особенности организации мобильного экспресс - сервиса торфодобывающей техники / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, 2017. С. 414-417.

УДК621: 677

ЯКОНОВСКАЯ Т.Б.,
ЖИГУЛЬСКАЯ А.И.,
ОГАНЕСЯН А.С.
Тверской государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИИ ТОРФЯНЫХ МАШИН НА КАЧЕСТВО ИХ РАБОТЫ

Аннотация. Статья освещает опыт эксплуатации торфяных фрезерных барабанов на предприятии по добыче торфа. Исследуется уровень качества выполнения технологической операции по фрезерованию торфяной залежи. В качестве главных критериев качества работы фрезерных агрегатов предлагается использовать параметры толщины и равномерности фракционного состава торфяного расстила.

Ключевые слова: фрезерный барабан, торф, расстил, толщина расстила, качество работы.

YAKONOVSKAYA T.B.,
ZHIGULSKAYA A.I.,
OGANESYAN A.S.
Tver State Technical University

INFLUENCE OF QUALITY OF DESIGN OF PEAT MACHINES ON THE QUALITY OF THEIR WORK

Abstract. The article highlights the experience of operating peat milling drums at a peat mining enterprise. The quality level of the technological operation for milling peat deposits is investigated. It is proposed to use the parameters of thickness and uniformity of the fractional composition of peat spread as the main criteria for the quality of work of milling units.

Keywords: fcutting drum, peat, spread, thickness spread, quality of work.

Рынок торфяных машин и оборудования в России представлен многообразием иностранной и отечественной техники. В структуре рынка 80% от общего объема продаж приходится на продукцию зарубежных фирм при этом доля фирм разработчиков российской торфяной техники ежегодно сокращается. Современные предприятия добывающие торф и производящие разнообразную торфяную продукцию, при выборе технологического оборудования, предъявляют суровые требования к качеству торфяной техники, так как уровень качества торфяных машин оказывает влияние на степень экономической безопасности производства.В настоящее время технологический уровен торфяных машин и оборудования существенно повысился, а разнообразие торфодобывающих и торфоперерабатывающих комплексов на практике затрудняет их выбор при комплектовании технологического парка торфяного оборудования [1, 2, 3].

Кроме того, условия российских торфопредприятий в которых эксплуатируется техника иностранного производства весьма различны, так как торф в России добывают не только в центральных регионах, но и на севере, и на юге страны. По этому, грамотная оценка уровня качества торфяной техники различного производства с учетом не только конкурентных преимуществ, но и требований к качеству технологических операций и других условий производства, позволит предприятиям торфяной отрасли оптимизировать структуру парка технологического оборудования. В связи с этим разработка метода оценки качества торфяной техники на основе критерия производственно-конструктивной

сложности с учетом российских особенностей работы торфяных предприятий представляется весьма актуальным [4].

Для исследования уровня качества работы торфяных машин авторы использовали смешанный метод оценки качества. На опытной технологической площадке качество выполнения операций оценивалось следующим способом:

1. Определили назначение готовой продукции из торфа.
2. Определили оптимальную технологию производства.
3. Сформировали перечень технологических требований к качеству проведения операции фрезерования цикла добычи торфа на топливо, таким образом, получили единичные показатели качества.
4. Выделили две группы единичных показателей качества: главную и второстепенную.
5. Определили технологические требования к качеству проведения операции фрезерования цикла добычи торфа на топливо.
6. Фиксировали результаты работы торфяных машин путем замеров единичных показателей качества (толщина расстила, площадь загрузки поля, объем фрезерования, размер фракций и структура фракционного состава расстила и т.д.) табл. 1, 2.

Таблица 1.

Результат оценки технологического уровня качества выполнения операции по фрезерованию в технологии добычи торфа на топливо

Толщина расстила торфяной крошки, см	Марка оборудования	Качество работы на операции, %
До 3	БФТ-9.5	64
	РМ-6.0	51
От 3 до 10	РМ-8.4	68
	ФР-310ST	72

Таблица 2.

Результат оценки технологического уровня качества выполнения операции по фрезерованию в технологии добычи торфа на топливо

Средний размер фракций торфяной крошки, мм	Марка оборудования	Качество работы на операции, %
До 10	БФТ-9.5	85
До 30	РМ-6.0	76
До 60	РМ-8.4	70
Свыше 60	ФР-310ST	40

В результате проведенных авторами исследований качества работы торфяной техники, к примеру, фрезерного барабана БФТ-9,5 уровень качества его работы (в технологии тонкого расстила и по размеру фракций), а значит соответствия технологическим требованиям выше среднего и составляет 64-85 % (среднее 74.5%), однако, следует учитывать что, рабочие органы фрезерных барабанов (ножи) различны и дают возможность получать различные характеристики расстила торфяной крошки. Эту особенность конструкций ножей фрезерного барабана используют в различных модификациях технологий добычи торфа (тонкий и толстый аэрированный расстил). Поэтому по нашему мнению при оценке качества торфяной техники нужно учитывать не только ее единичные параметры качества, но и вид используемой технологии, которая накладывает свои технологические требования к качеству работы машины, то есть применять критерий производственно-конструктивной сложности. Исследования авторов

[4] показали что, в процессе эксплуатации торфяной техники особое внимание уделяется качеству проведения технологических операций, то есть качеству работы торфяной машины. По этому, как дополнение к эксплуатационным показателям качества машин авторы предлагают учитывать показатель «качество работы машины на технологической операции». Безусловно, многие специалисты могут сказать что, качество работы техники зависит не только от удобства, маневренности и качества самой машины, но и от опыта оператора-машиниста. Для топливного торфа, чем меньше размер фракций торфяной крошки, тем лучше его качество, при этом на ТЭЦ не требуется цех с оборудованием по дополнительной подготовке торфа к использованию. К тому же, в тонком расстиле торф быстрее высыхает в полевых условиях и тем самым лучше и эффективнее используются погодные условия сезона добычи [5]. В этой связи фрезерный барабан БФТ-9.5 является лучшим по критерию «качества работы» и конструктивной сложности в сегменте «фрезерных технологических комплексов» для послойного фрезерования (технологии тонкого расстила).Проведенные исследования авторами в области эксплуатации торфяной техники и оценки качества самих торфяных машин и качества их работы позволили определить новый эксплуатационный показатель, который авторы называют «качество работы машины». Этот показатель авторы предлагают учитывать в оценке технологического качества торфяных машин и оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зюзин Б.Ф., Жигульская А.И., Яконовский П.А., Яконовская Т.Б.* Машины и оборудование торфяных производств: Учебное пособие. – Тверь: ТвГТУ, 2015. - 160 с.
2. *Mikhailov A.V., Zhigulskaya A.I., Yakonovskaya T.B.* 2017 Excavating and loading equipment for peat mining *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 022014.
3. *Mikhailov A., Zhigulskaya A., Yakonovskaya T.* 2017 Strip mining of peat deposit *Mine Planning and Equipment Selection: MPES 2017 Proceeding of the 26th International Symposium. Edited by Behzad Ghodrati, Uday Kumar, Håkan Schunnesson* 497-501.
4. *Жигульская А.И., Яконовская Т.Б., Яконовский П.А., Оганесян А.С.* Коэффициент конструктивной сложности как способ оценки уровня инновационности конструкций горной техники / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции. Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой, 2019. С. 49-52.
5. *Жигульская А.И., Яконовская Т.Б., Соболь Ю.В., Давитян С.К., Петрова Е.В.* Анализ эксплуатационных свойств торфяных машин и оборудования с целью выявления перспективных направлений их модернизации / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2015. № 1. С. 66-70.

УДК 622.331

ЯКУПОВ Д.Р.,
ИВАНОВ С.Л.,
ИВАНОВА П.В.,
ПЕРМЯКОВА Е.К.
Санкт-Петербургский горный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСОВ ДОБЫЧИ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ

Аннотация. В данной работе описаны комплексы горных машин для добычи торфа, в частности комплексы, работающие в рамках климатосберегающих технологий. Представлено моделирование энергомеханических систем и комплексов на уровне их структурных схем. На базе проведенного анализа продемонстрирован алгоритм оценки энергетических параметров комплекса в целом по их структурным формулам для описанных на примере четырех вариантов комплекса. Предложен алгоритм моделирования структуры комплексов по критерию энергоэффективности с использованием составленных раннее структурных формул. Предложено численную оценку эффективности оценивать коэффициентом энергоэффективности. Проведенный анализ и результаты моделирования показали перспективность добычи торфа комплексом включающем модули добычи, переработки, трансферта и прочих, сформированных по результатам моделирования структуры по критерию энергоэффективности.

Ключевые слова: добыча торфа, структурные формулы, моделирование энергомеханических систем, коэффициент энергоэффективности, комплексы для добычи торфа, структурный анализ, горные машины.

IAKUPOV D.R.,
IVANOV S.L.,
IVANOVA P.V.,
PERMIAKOVA E.K.
Saint Petersburg Mining University

STRUCTURE MODELING OF MINING MACHINERY SYSTEMS FOR PRODUCTION OF RAW PEAT MATERIALS

Abstract. This work describes systems of mining machines for peat extraction, particularly, the systems that exploit environment-friendly technologies. An algorithm for schematic structure modelling of modular mining machinery systems was introduced and analyzed. Based on the analysis, an algorithm for assessing energy consumption of an entire machinery system on the basis of its structure was described. As an example, structural schemes of four modular mining machinery systems were assessed. These structural formulae were also used for structuring mining machinery systems by the energy efficiency criterion. Effectiveness value of mining machinery system is suggested to be assessed by energy efficiency coefficient. The results of the analysis and assessed models proved the viability of mining machinery systems for open-cast peat winning that combine the modules of extraction, processing, transfer, and others organized by applying devised structural formulae and energy efficiency criterion.

Keywords: peat extraction, structural formulae, energy-mechanical systems modeling, energy efficiency coefficient, systems of peat extraction machinery, structural analysis, mining machines.

Введение.

Торф – возобновляемый биоресурс природного происхождения, при его сжигании не выделяется сера, что делает использование торфа более экологичным, чем применение углеводородного сырья [1].

Горная промышленность развивается и на сегодняшний день существуют три основных направления добычи торфяного сырья: поверхностно-послойный и два карьерных. Добычу торфа реализуется различными методами: экскавации, механического рыхления, гидромеханизации. Все три метода применяются в торфяной промышленности в зависимости от конкретных условий месторождения и прочих факторов [2].

Традиционная добыча по поверхностно-послойной стратегии механическим рыхлением включает в себя водопонижение, после которого торф добывается тонкими слоями и короткими циклами. Можно выделить следующие операции: фрезерование верхнего слоя торфяной залежи, ворошение верхней части фрезерованного слоя торфа, валкование высушенного слоя, уборка торфа из валков, штабелирование, изоляция торфа в штабелях. Такая технология, в первую очередь из-за необходимости значительного водопонижения, наносит вред всему ареалу в области ведения торфоразработок, угнетая флору и фауну, что делает необходим рекультивацию. Более того, при фрезерной добыче требуются серьезные трудозатраты и предварительные экономические расходы [3], связанные с арендой значительных площадей. Примерно два года уходит на подготовку месторождения к добыче. Сушка торфа проводится на полях, что делает добычу сезонной и требует больших площадей, а также возрастает риск возникновения пожаров [4].

Приведенные выше недостатки традиционной технологии дали толчок к созданию новых технологий добычи торфяного сырья, а все усложняющаяся экологическая обстановка требует проведение работ в рамках климатически нейтральных подходов и климатосберегающих технологий, что в свою очередь требует создания новых инновационных комплексов по добыче и переработки торфяного сырья [5].

Комплексы добычи торфяного сырья в рамках климатосберегающих технологий.

Эффективность работы комплекса по добыче торфяного сырья во многом зависит от того, какие элементы в него входят и какие установлены связи между ними. В условиях современных рыночных отношений для добычи торфяного сырья поставлены более жесткие требования, необходимо уделять внимание к выбору технологических схем и комбинации комплексов для их реализации. Например, перспективными являются технологические решения, которые при добыче не требуют задействования больших площадей, что существенно сокращает затраты на аренду земельных участков [6]. По этой причине актуальны разработки по карьерной стратегии добычи, которая отличается от поверхностно-послойной в первую очередь тем, что месторождение отрабатывается на полную мощность залежи, что позволяет существенно сократить требуемые для добычи площади. Стоит отметить, что типичная технология добычи по карьерной стратегии представляет собой экскавацию из подготовленного месторождения после водопонижения, что не избавляет от множества недостатков поверхностно-послойной стратегии. В последнее время стали появляться разработки, позволяющие осуществлять добычу без водопонижения за счет использования шагающего моста или платформы для размещения и работы горных машин на естественной залежи [7].

Например, в патенте РФ 2614337 предложено использование плотины вокруг горнодобывающего оборудования для возможности работы без водопонижения при отсутствии твердого грунта, а также размещение ангара на плотине для осуществления круглогодичной добычи. Однако данный метод добычи требует длительной предварительной подготовки, включает подготовительные добычные работы, обогащение, отвалообразование, а сам комплекс получается достаточно громоздким и металлоёмким [8].

Существуют технологии, которые задействуют плавучие основания для работы на акватории торфяного месторождения, без проведения водопонижения. Например, в патенте РФ 2599117 добыча торфа осуществляется комплексом оборудования, размещаемым на плавучей платформе, а добычные работы производятся путем экскавации на всю мощность залежи с помощью двухчелюстного копающего грейфера, размещенного на плавучем основании. Однако стоит отметить, что данные плавучие основания имеют высокую металлоёмкость, требуют подготовки акватории для начала работы [9].

Еще одним интересным способом является добыча торфа с помощью комплекса горных машин, размещенных на передвигаемых платформах с помощью специального тягового оборудования. Например, в Патенте РФ 2304721 добыча торфа осуществляется комплексом, размещенным на платформе в виде понтона. Горные машины платформы осуществляют добычу без водопонижения территории. Платформа в комплексе связана жесткой сцепкой с тягачом-вездеходом, который передвигает ее по подготовленной залежи. Добыча торфа осуществляется размывом залежи гидромониторами и транспортировкой пульпы по пульпопроводу под давлением [10].

Перспективным является использование шагающего мостового комплекса с размещением комплекса для добычи торфа с помощью экскавации, предложенное в Патенте РФ 2684269. Данный комплекс может быть применен без предварительного водопонижения. Добыча осуществляется проведением как минимум трех параллельных траншей с последующей отработкой межтраншейного пространства поперечными проходками передвижным мостовым комплексом. Экскавация осуществляется по поверхности натуральной залежи, которая ограничена радиальной траншеей. Механизм движения представляет собой мост и две каретки с тяговыми устройствами, что дает возможность совершать вращательное движение относительно одной из кареток. Транспортный путепровод включает в себя размещенный на сваях настил с установленным на нем тягового монорельса. Добываемое сырье транспортируется на берег для дальнейшей переработки. Для проведения траншей предусмотрены два одноковшовых манипулятора в виде обратной лопаты, а добыча осуществляется центральным рабочим органом, например, в виде шнека или еще одной стрелы с обратной лопатой. Затем сырье транспортируется баржами на берег, где оно подвергается дальнейшей переработке [11].

Структурные формулы комплексов.

Таким образом комплексы для добычи торфа и подготовки торфяной продукции могут включать в себя объединенные или раздельные комплексы добычи и переработки, комплексы осушения, подготовки залежи, рекультивации и другие. Сами комплексы, в свою очередь, состоят из модулей, таких как модули сушки, выемки, сепарации и другие.
Для представления комплексов с помощью структурных формул, были выделены следующие модули: добычи (ДБ), переработки (ПР), механического обезвоживания (МО), сепарации (СП), сушки (С), производства товарной продукции (ПТП), производства электроэнергии (ЭГ), трансфера (ТФ).

Можно выделить три типа связей единиц оборудования в комплексе: согласование, соединение, совмещение. Эти типы связи также справедливы для связей между модулями комплексов.

(-) – «согласование», связь при которой каждая из составляющих имеет собственные параметры, ограничения и конструктивное исполнение, параметры составляющей согласованы для достижения общей цели;

(+) – «соединение», это связь которая накладывает общие ограничения на составляющие и их параметры, каждая из составляющих имеет собственное конструктивное исполнение и при соединении для достижения поставленной цели образуется новая структурная единица, с собственными функциями и ограничениями;

(•) – «совмещение», связь, при применении которой, ограничения, параметры и конструктивное исполнение для составляющих являются общими, составляющие входят в единое устройство и неразрывно связаны для достижения поставленной цели.

Таким образом путем комбинирования комплексов, модулей с разными типами связей, можно получать технические решения, подходящие под конкретным условиям эксплуатации [12].

Примеры составления формул представлены ниже.

Первой будет рассмотрена структурная схема оборудования, реализуемая фрезерным способом, который была принята в качестве базовой. Между первыми тремя моделями (добычи, трансферта оборудования и трансферта ресурсов) установлена связь типа «соединение», так как модули хотя физически не связаны, но объединены единством материальных потоков, разрыв которых недопустим для достижения общей цели. Между остальными модулями установлена связь «согласование», поскольку каждый модуль выполнен в виде отдельной конструкции с собственными параметрами и связан с другими только достижением общей цели [13].

Традиционный фрезерный способ (типичная технология по поверхностно-послойной стратегии):

$$\Ф_{фр} = ДБ_{фр} + ТФ_{о} + ТФ_{р} - ТФ_{дм} - МО - СП - С - ПТП =$$
$$=(M_{фр}+Fd_{фр})+(M_{о}+Fd_{о})+(M_{р}+Fd_{р})-(M_{дм}+Fd_{дм})-(M_{мо}+Fe_{мо})-(M_{сп}+Fe_{сп})-(M_{с}+Fe_{с})-(M_{тпт}+Fe_{тпт}),$$

где $ДБ_{фр}$ – модуль добычи с использованием фрезеров;

$ТФ_{о}$ – трансферт оборудования;

$ТФ_{р}$ – трансферт ресурсов;

$ТФ_{дм}$ – трансферт добытого материала;

Mi – механическая составляющая, обеспечивающая движение объекта и (или) составляющих его частей (элементов);

F(e)g,d – силовая составляющая, где осуществляется преобразование различных видов энергии один в другой, например электрической «*e*», гидравлической «*g*» или от двигателя внутреннего сгорания «*d*».

Индексы механической и силовой составляющих в формулах соответствуют индексам модулей.

Следующим будет рассмотрен способ добычи, в котором задействована платформа в качестве основания для размещения горных машин, а именно Патент РФ 2304721, который был описан выше. В отличии от фрезерной технологии, между модулями установлены разные связи. Так как модуль добычи и трансферта оборудования соединены (тягач-вездеход соединен жесткой сцепкой с платформой, где размещено оборудование), между ними установлена связь соединение. Модуль трансферта ресурсов представляет собой пульпопровод, который соединен с оборудованием для добычи, поэтому между данными модулями установлена связь соединение. Модуль транспортировки готовой продукции имеет собственные параметры и конструктивное исполнение и связан с системой для достижения общей цели, поэтому с ним установлена связь согласование.

Платформа с тягачом-вездеходом и гидромониторами (Патент РФ 2304721):

$$\Ф_{пл}=ДБ_{гр}+ТФ_{о}+ТФ_{р}-ТФ_{дм}=(M_{гр}+Fg_{гр})+(M_{о}+Fd_{о})+(M_{р}+Fd_{р})-(M_{дм}+Fg_{дм}),$$

где $ДБ_{гр}$ – модуль добычи с применением гидромониторов.

Также будет рассмотрена технология добычи экскавацией из подготовленной залежи. Добыча может быть осуществлена экскаваторами, а сырье затем транспортируют автотранспортом. Так как модули добычи, трансферта оборудования и трансферта ресурсов соединены в экскаваторе, то между ними установлена связь «совмещение». Автотранспорт для транспортировки готовой продукции представляют собой отдельные устройства, поэтому с ними установлена связь «согласование» [14].

Экскавация экскаваторами из подготовленной залежи (типичная карьерная технология):

$$\Ф_{пз}=ДБ_{мх}•ТФ_{о}•ТФ_{р}-ТФ_{дм}=(M_{мх}+Fd_{мх})•(M_{о}+Fg_{о})•(M_{р}+Fg_{р})-(M_{дм}+Fd_{дм}),$$

где $ДБ_{мх}$ – модуль добычи с использованием механизации.

Последним рассмотренным способом будет использование шагающего мостового комплекса с двумя экскаваторами, осуществляющими проходку траншей (ПР1 и ПР2), установку настила и ходовых путей ($ТФ1_о$ и $ТФ2_о$), транспортировку экскаваторного торфа ($ТФ1_р$ и $ТФ2_р$) и собственно мост ($ДБ_{мх}$) с механизмами передвижения ($ТФмх_о$) и шнек-фрезой ($ТФмх_р$), а также трансфером добытого сырья ($ТФмх_{дм}$) (Патент РФ 2684269):

$$Ф_{мк}=ПР1+ТФ1_о-ТФ1_р+ПР2+ТФ2_о-ТФ2_р-ДБ_{мх}\bullet ТФмх_о+ТФмх_р-ТФмх_{дм}=$$
$$=(M1+Fe1+(Mтф_о1+Fe_о1)-(Mтф_р1+Fe_р1))+I\bullet E)-(M2+Fe2+(Mтф_о2+Fe_о2)-(Mтф_р2+Fe_р2))+$$
$$+I\bullet E)-((M3м+Fe3м)\bullet(Mф+Fe3ф)+I\bullet E))+(Mтф_рмх+Fe_рмх))+I\bullet E)-(Mтф_{дм}мх+Fe_{дм}мх))+I\bullet E),$$

где ПР1 и ПР2 – экскаваторные модули для проходки траншей;

E – электронная составляющая, формирующая, передающая и осуществляющая обработку электрических сигналов;

I – информационная составляющая, обеспечивающая формирующая, осуществляющая хранение, передачу и обработку информационных сигналов;

тф - трансферт;

мх – механизация;

м – механизмы передвижения;

ф – шнек-фреза;

дм – добытый материал.

Путем выявления закономерностей между параметрами структурных формул можно проанализировать приведенные комплексы по критерию энергоэффективности ($К_{эф}$), который представляет собой структурную формулу, в которой могут быть численно рассчитаны функции модулей за счет подстановки конкретных параметров машины, включая КПД [15]. В общем случае коэффициент эффективности определяется как отношение затраченной работы ($\Sigma P_i t_i$) по добыче определенного количества торфяного сырья к соответствующей работе по базовому варианту ($\Sigma P_Б t_Б$) при добыче аналогичного количества торфяного сырья. В нашем случае за базу выбирается суммарная работа по добыче торфяного сырья фрезерным способом [15]:

$$К_{эфi} = \Sigma P_i t_i / \Sigma P_Б t_Б.$$

Так, для случая применения мостового комплекса по патенту 2684269 в качестве проходческой машины применяется гидравлический экскаватор со сменным навесным оборудованием. Тогда, на основе анализа параметров различных типов гидравлических экскаваторов его производительность при копании и погрузке ($П(P)_{эк}$) в $м^3/ч$ в функции установленной мощности может быть аппроксимирована функцией [16]:

$$П(P)_{эк}=-0{,}015P^2+2{,}16P+12{,}4,$$

здесь *P* – установленная мощность двигателя экскаватора, кВт. В свою очередь выражение для оценки величины потребляемой мощности в функции заданной производительности примет вид [17]:

$$P_{эк}=2{,}16+(198-4{,}44q)^{0{,}5},$$

где *q* – объем ковша, $м^3$

Подобные выражения получены при установке свай экскаватором ($P_{эус}$) и формировании настила и путей ($P_{эн}$) [19]. Аналогичные функции, но полученные расчетным путем имеют место быть для трансфера свайно-настилочного оборудования ($P_{ТФо}$) и торфяного сырья ($P_{ТФр}$) при проходке, мощности приводов передвижения моста ($P_{ДМмх}$), привода фрезы ($P_{ТФмхо}$) и трансфера добытого сырья ($P_{ТФмхр}$). Зная, таким образом продолжительность работы отдельных элементов комплекса коэффициент энергоэффективности возможно оценить по выражению [18]:

$$К_{эфм}=\Sigma[(2P_{эк}t_{эк}+P_{эус}t_{эус}+P_{эн}t_{эн}+P_{ТФо}t_{ТФо}+P_{ТФр}t_{ТФр})+P_{ДМмх}t_{ДМмх}+P_{ТФмхо}t_{ТФмхо}+P_{ТФмхр}t_{ТФмхр}]/\Sigma(P_{фi}t_{фi}).$$

Выводы.

Таким образом, из анализа существующих технологий понятно, что перспективный новый комплекс будет работать по карьерной стратегии на естественной залежи. Затем путем применения структурных формул и комбинирования составных модулей добычи, переработки, трансферта и прочих можно сформировать структуру будущего комплекса. Полученный коэффициент энергоэффективности позволит оценить целесообразность той или иной комбинации и провести теоретическое сравнение с существующими разработками.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Штин С.М.* Использование торфов западной Сибири в энергетических целях на основе применения гидромеханизированных технологий / Экспозиция Нефть Газ, 2013. №6(31). С. 50-54.
2. *Якупов Д.Р.* Классификация технологий для добычи торфяного сырья / Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей XXXIII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2019. С. 97-100.
3. *Белозеров В.В.* Автоматизированный комплекс защиты торфяников / В.В. Белозеров, Д.А. Быков // Фундаментальные исследования, 2018. №7. С. 9-16.
4. *Лиштван И.И.* Исследования по торфу и сапропелю института природопользования нан Беларуси на службе экономики Республики Беларусь / И.И. Лиштван [и др.] // Природопользование, 2018. №1. С. 6-25.
5. *Зюзин Б.Ф.* Комплексы горных машин для добычи биотоплива на торфяных месторождениях / Б.Ф. Зюзин [и др.] // Депонированная рукопись № 1121/04-18 12.02.2018.
6. *Жигульская А.И.* Научные основы комплексной механизации безотходной круглогодичной технологии добычи и переработки ресурсов торфяных месторождений: монография / А.И. Жигульская, Т.Б. Яконовская // Тверской гос. техн. ун-т, Каф. ТМО. - Тверь: ТвГТУ, 2014. - 193 с.
7. *Mikhailov A.V., Zhigulskaya A.I., Yakonovskaya T.B.* 2017 Excavating and loading equipment for peat mining *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 87(2) 022014.
8. Патент РФ № 2614337 Кисляков В.Е., Нафиков Р.З. Способ дражной разработки обводненных россыпных месторождений полезных ископаемых / заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – № 2016106843; заявл. 25.02.2016; опубл. 24.03.2017, Бюл. №9.
9. Патент РФ № 2599117 Иванов С.Л., Михайлов А.В., Звонарев И.Е. Бондарев Ю.Ю., Таранов А.Г. Способ по добыче и переработке торфа и растительно-торфяных сплавин и устройство для реализации этого способа // заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – № 2015108533/03; заявл. 11.02.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. №28.
10. Патент РФ № 2304721 Косов В.И., Беляков А.С. Комплекс для добычи полезных ископаемых, в частности торфа // заявитель и патентообладатель Косов Владимир Иванович – № 2005137965/03; заявл. 06.12.2005; опубл. 20.08.2007, Бюл. №23.
11. Патент РФ № 2684269 Иванов С.Л., Тимофеев И.П., Родионов Е.А., Столярова М.С. Способ добычи торфа и устройство для его реализации // заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – № 2018123253; заявл. 26.06.2018; опубл. 04.04.2019, Бюл. №10.
12. *Худякова И.Н.* Выбор и обоснование параметров технологического оборудования комплекса добычи торфяного сырья из натуральной залежи / И.Н. Худякова, Э.А. Вагапова, С.Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2019. № 3 (специальный выпуск 4). С. 3-15.

13. *Горячев В.И.* Технологический комплекс производства кускового топливного торфа с комбинированной сушкой / В.И. Горячев, Б.Ф. Зюзин, И.И. Михеев, И.Н. Казичев // Труды Инсторфа, 2016. №13(66). С. 28-32.
14. *Кашинская Т.Я.* Влияние технологий подготовки торфяного сырья для производства продукции на основе его углеводного комплекса // В сборнике: Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири. Материалы Третьей международной научно-практической конференции, 2015. С. 133-135.
15. *Васильев А.Н.* Структурные формулы технологических схем добычи торфа / Горный информационно аналитический бюллетень, 2000. №11. С. 140-144.
16. *Корнильев Е.О.* Навесное модульное оборудование для первичной обработки торфяного сырья / Е.О. Корнильев, А.И. Жигульская, А.В. Михайлов // В сборнике: Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики. Материалы конференции. Тульский государственный университет: Под редакцией Р.А. Ковалева, 2017. С. 173-176.
17. *Джафаров З.Р.* Анализ показателей структурной надежности системы электроснабжения подстанции в аварийном режиме работы при внедрении системы АВР по стороне 110 кВ / З.Р. Джафаров, Д.Р. Залялиев, А.Е. Бурмутаев // В сборнике: Электроэнергетика глазами молодежи – 2017. Материалы VIII Международной научно-технической конференции, 2017. С. 92-95.
18. *Грудинин Н.Н.* К вопросу обеспечения технологической надежности внутри массивного транспорта при добыче торфяного сырья / Н.Н. Грудинин, Э.А. Кремчеев, Д.О. Нагорнов // Современные наукоемкие технологии, 2017. №7. С. 27-31.

СЕКЦИЯ 4.
ЭЛЕКТРО- ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

УДК: 620.98

АБДАЛЛА ВАЭЛЬ,
АБРАМОВИЧ Б.Н.,
УСТИНОВ Д.А.
Санкт-Петербургский горный университет

РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ВИДЕ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Аннотация. Работа посвящена увеличению энергоэффективности источников бесперебойного электроснабжения на предприятиях с непрерывным технологическим циклом. Существуют непрерывные технологические процессы, при осуществлении которых нарушение электроснабжения даже на короткий интервал времени приводит к значительным экономическим ущербам. Наиболее современным техническим решением такой проблемы является создание систем гарантированного электроснабжения (СГЭ) с использованием в его составе дизельных электростанций (ДЭС) и источников бесперебойного питания (ИБП), на основе аккумуляторных батареи (АБ) и модулей суперконденсаторов. Предложено использовать суперконденсаторы параллельно АБ, чтобы обеспечивать устойчивую работу ДЭС при пусковых режимах, а также при набросе нагрузки. В этом случае при использовании суперконденсаторов появляется возможность уменьшить мощность ДЭС и источников бесперебойного питания вместе с размером их батарей. Следовательно, уменьшается себестоимость решения и увеличивается его энергоэффективность. Для проверки работоспособности системы была создана компьютерная модель с помощью MATLAB.

Ключевые слова: бесперебойный источник питания; преобразователь SEPIC; суперконденсатор; аккумуляторный модуль; дизельный генератор; выпрямитель коэффициента мощности; ФАПЧ.

ABDALLAH WAEL,
ABRAMOVICH B.N.,
USTINOV D.A.
Saint-Petersburg Mining University

DEVELOPMENT AND DESIGN OF A MOBILE POWER SUPPLY STATION IN THE FORM OF AN AUTONOMOUS POWER SOURCE

Abstract. The work is devoted to increasing the energy efficiency of uninterruptible power supplies in enterprises with a continuous technological cycle. During the operation of continuous technological processes, a power failure even for a short period of time leads to significant economic damage. The most modern technical solution to this problem is the creation of guaranteed power supply systems using diesel power plants (DES) and uninterruptible power supplies (UPS), based on rechargeable batteries and supercapacitor modules. It is proposed to use supercapacitors in parallel with the battery in order to ensure the stable operation of the diesel generators under starting conditions, as well as during load transfer. In this case, when using supercapacitors, it becomes possible to reduce the power capacity of the generators and uninterruptible power supplies along with the size of their batteries. Therefore, the cost of the solution decreases and its energy efficiency increases. To test the efficiency of the system, a computer model was created using MATLAB.

Keywords: Uninterruptible Power Supply; SEPIC Converter; Supercapacitor; Battery Module;

Diesel Generator; UPF Rectifier; PLL.

Передача электроэнергии от районных подстанций и электростанций основной электрической сети потребителям линиям электропередачи связано с кратковременными нарушениями в электроснабжении на уровне потребителей. Эти нарушения могут принимать форму провалов напряжения или полного прекращенияэлектроснабжения объектов. Это может быть вызвано различными факторами, в основном короткими замыканиями или грозовыми повреждениями. Перерыв электроснабжения нефтегазодобывающих предприятий даже в течение короткого периода времени может привести к значительным экономическим потерям.

Для нефтедобывающих предприятий наиболее чувствительными к перебоям в электроснабжении являются узлы добычи нефти. Даже кратковременные сбои питания таких установок могут привести к отключениям и, как следствие, к нарушению технологического процесса. Чтобы восстановить их нормальную работу, может потребоваться время от нескольких десятков минут до нескольких часов. Это может привести к большим потерям в добыче нефти. Электрические центробежные насосы (ЭЦН) входят в число таких установок. Их приводы используют асинхронные двигатели (АД), имеющие диапазон мощности от 12 до 500 кВт для ЭЦН.

Были проведены исследования влияния возмущений входного напряжения на стабильную работу АД ЭЦН, и было обнаружено, что снижение напряжения на его клеммах до значения 0,6 U_H при длительности 0,15 с. может привести к потере устойчивости и последующей остановке. В случае аварийной ситуации на одной из линий длительность включения резервного источника длиться до нескольких секунд. В основном это происходит из-за времени действия устройства автоматического ввода резерва (АВР). Поэтому автономный вариант электроснабжения месторождения, безусловно, экономически оправдан.

Для пользователей 1-й категории необходимо поддерживать резервный источник питания в горячем резерве. Однако это довольно дорого из-за эксплуатационных расходов, связанных с потребленным топливом, а также из-за ухудшения состояния дизельного двигателя. Если резервный источник питания находится в холодном резерве, отключение питания или снижение уровня напряжения в системе электроснабжения (СЭС) во время запуска резервных блоков и его готовность к подаче питания может продолжаться до 30 с.

Учитывая вышеупомянутые причины, становится неизбежным поиск различных технических средств для поддержания требуемого уровня напряжения независимо от того, какой тип отказа может произойти в сети. Основная идея работ начинается с внедрения силового модуля, способного питать нагрузку 110 кВт (включая асинхронные двигатели, питающие погружные насосы) в сельских районах, работающих на электрических предприятиях с непрерывным технологическим циклом добычи нефти и газа. Для этой цели предлагаемое решение состоит в установке вторичного / резервного дизель-генератора параллельно с блоком аккумуляторов и суперконденсаторов. Когда происходит сбой или нестабильность в основной электрической сети, батареи и суперконденсаторная система будут введены в действие, чтобы решить проблему нестабильности, ведущую к поведению, подобному коррекции коэффициента мощности (PFC). Если неисправность выходит за рамки вмешательства накопленной энергии или если состояние батарей и суперконденсатора низкое, генератор принимает нагрузку.

В случае возникновения неисправности в сети, накопленной энергии модулей АБ и суперконденсаторов должно быть достаточно для питания нагрузки пока не запустится дизельный генератор и не будет готов принять нагрузку.

Концепция решения состоит в том, чтобы объединить генератор и систему накопления энергии вместе с элементами преобразователя силовой электроники на одном грузовике, что приведет к созданию мобильной электростанции, которая может

использоваться для питания нагрузки мобильного асинхронного двигателя или любого другого подобного устройства. Эта операция требует понимания того, как объединить все элементы в единую сеть, способную контролировать состояние операции, принимать решения и отдавать распоряжения надлежащему оборудованию для принятия мер.

В этом отношении можно использовать множество схем решения, однако предлагаем следующие компоненты:

- генератор, питающий выпрямитель переменного и постоянного тока, который питает шину постоянного тока;
- комплект батарей, питающий преобразователь SEPIC, установленный параллельно с выпрямителем генератора;
- модуль суперконденсатора, питающий другой преобразователь SEPIC, установленный параллельно блоку аккумуляторных модулей;
- конденсатор в роли звена постоянного тока питает преобразователь, который питает асинхронный двигатель.

Для этого параметры преобразователя SEPIC разрабатываются вместе с его контроллером для обслуживания требуемого приложения. Преобразователь будет испытан с батарейными и суперконденсаторными модулями.

Чтобы оценить взаимосвязь между различными переменными, будут получены три модели преобразователя:

- усредненная модель большого сигнала;
- модель устойчивого состояния;
- модель слабого сигнала.

Это позволит получить передаточную функцию разомкнутого контура преобразователя для изучения его поведения, и чтобы начала анализа реакции системы. Эта система питается в основном от комплекта батарей и / или суперконденсаторов, где каждый комплект будет обеспечивать 500 В постоянного тока. Поскольку батареи или модули суперконденсаторов обеспечивают питание нагрузки, их выходное напряжение начинает изменяться и уменьшаться. Таким образом, роль преобразователя SEPIC заключается в повышении подаваемого напряжения до 800 Вольт и поддержании постоянного напряжения на шине постоянного тока, питающей асинхронный двигатель, мощностью 110 кВт.

В проектных предположениях для преобразователя учтены эти факторы, и с помощью компьютерного моделирования значения параметров преобразователя используются для получения передаточной функции разомкнутого контура выходного напряжения преобразователя «v» относительно его рабочего цикла «d»:

$$\frac{\hat{v}}{\hat{d}}(p) = \frac{-1.352*10^6 p^3+1.825*10^9 p^2-8.436*10^{11} p+1.}{p^4+650 p^3+1.314*10^6 p^2+5.031*10^8 p+3.95} \quad (1)$$

Поскольку производная передаточная функция имеет тип 4-го порядка, эту функцию сложно контролировать, поэтому, используя методы аппроксимации Паде, она уменьшена до 2-го порядка и 1-го порядка, и концепция управления будет основана на этих полученных передаточных функциях:

$$\frac{\hat{v}}{\hat{d}}(p) = \frac{-1.14*10^6 p+1.757*10^9}{p^2+652.2\ p+5.199*10^5};\ \frac{\hat{v}}{\hat{d}}(p) = \frac{1.}{p} \quad (2)$$

Вторая часть работы будет сосредоточена на разработке системы выпрямителя переменного в постоянный ток, питающей звено постоянного тока на 800 В и его соответствующего контроллера. Вход выпрямителя в основном поступают из 2 источников:централизованного источника питания и резервного генератора, работающего в режиме холодного резерва. К моменту запуска генератора модуль накопления энергии будет питать двигатель.

Чтобы успешно выполнять этот сценарий, выпрямитель должен быть в состоянии обеспечения единичного коэффициента мощности (UPF) и, таким образом, компенсировать все помехи, вводимые в основную сеть или на сторону генератора. В этом

отношении выпрямитель будет работать в режиме двунаправленной передачи мощности и единичного коэффициента мощности, используя стратегию векторного управления, в частности метод управления с ориентацией по напряжению (VOC).

В методе управления применена концепция управления внутреннего модуля (IMC) и схема каскадного управления. Основная идея относится к управлению напряжением звена постоянного тока через внешний контур, а токи (i_d и i_q) - через внутренний контур, имеющий эталонный фазовый угол между током и напряжением линии. Для достижения UPF q-составляющая тока предполагается равной нулю.

Каждый из источников батареи и источника питания суперконденсатора состоит из набора элементов батареи и суперконденсатора, соответственно, соединенных параллельно и последовательно. Из-за несовершенства производства произойдет изменение внутренних сопротивлений в каждой ячейке, и реальная емкость каждой ячейки не будет одинаковой, что приведет к появлению тока утечки между ячейкой либо в блоке батареи, либо вблоке суперконденсаторов. Чтобы решить или ослабить эту проблему, необходимо использовать выравнивание или балансировку ячеек. Было предложено много методов для балансировки клеток, они могут различаться по стоимости и скорости. Одним из очень эффективных методов балансировки является использование транзисторов параллельно суперконденсатору, чтобы сделать их напряжения эквивалентными промежуточному уровню.

Наконец, результаты работ будут представлены, обсуждены и будут рекомендованы к рассмотрению заявки на будущую работу.

Выводы.

В работе была создана модельная система элементов накопления энергии (аккумуляторы, суперконденсаторы), основная роль этой системы хранения заключается в замене энергии, необходимой от дизель-генератора во время его запуска, и в уменьшении размеров генератора и аккумуляторный модуль. Если система подключена к основной сети, они помогут обеспечить нагрузку в случае любого сбоя. Система хранения подключена к нагрузке через конденсаторную цепь постоянного тока. Система выпрямителя и резистивная нагрузка 110 кВт были реализованы в MATLAB / Simulink с использованием источника напряжения генератора, универсального моста IGBT и пространственной векторной широтно-импульсной модуляции. Контроллер напряжения постоянного тока связывается с его опорным значением с ответом около 300 мс с незначительной настройки пульсации в напряжении цепи постоянного тока вокруг ΔV_{DC} = 0,125% колебаний. Квадратурный ток «i_q» почти колеблется около «0», ±10 А. Опорный постоянный ток контроллера «$i_{d\text{-reference}}$» удерживает «i_d» в пределах своего диапазона, колеблющегося с пульсацией около Δi_d = 8,9%.

Чтобы поддерживать более или менее постоянное напряжение на звене постоянного тока, преобразователь SEPIC моделируется и устанавливается между системой накопления энергии и конденсатором звена постоянного тока. Преобразователь постоянного тока играет роль в стабилизации выходного напряжения накопительных элементов и их зарядке, когда питание подается от генератора или основной сети. Преобразователь SEPIC был способен поддерживать желаемый уровень напряжения в пределах проектных требований (0,6 U_H в течение менее 0,15 мс). Таким образом, обеспечивается плавная и стабильная работа нагрузки, когда аккумуляторные или суперконденсаторные модули находятся в режиме питания или когда они мешают питанию нагрузки, избегая потери устойчивости. Будучи разработанным как двунаправленный преобразователь, SEPIC гарантирует, что модули остаются заряженными во время нормальной работы сети / генератора.

Результаты моделирования являются удовлетворительными, и система управления достигает своих целей для достижения UPF и поддержания напряжения в звене постоянного тока на уровне 800 В с THD 0,14%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Б.Н.* Электромеханических комплексов с синхронными двигателями / Б.Н. Абрамович, Ю.Л. Жуковский, А.А. Круглый, Д.А. Устинов. – СПб.: Нестор, 2007. – 59 с.
2. *Поляков В.Е.* Система гарантированного электроснабжения электропотребителей предприятий с непрерывным технологическим циклом (на примере ОАО «Севкабель») / В.И. Гусев, В.Е. Поляков // Промышленная энергетика. - 2009. - № 11. - С. 10-12.
3. *Абрамович Б.Н.* Электроснабжение нефтегазовых предприятий / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2008. - С. 12-14.
4. *Поляков В.Е.* Обоснование структуры и параметров источников бесперебойного электроснабжения на предприятиях с непрерывным технологическим циклом / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2010.
5. *Dunia J.*, *Bakari M., Mwinyiwiwa M.* 2013 Performance Comparison between ĆUK and SEPIC Converters for Maximum Power Point Tracking Using Incremental Conductance Technique in Solar Power Applications *Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*.
6. *Raja T.A.S., Kumar R. Senthil, Nandhakumar A., Santhoshkumar K.V.* 2017 Modelling and Analysis of Sepic Converter Based Photovoltaic System *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 04(10).
7. *Rose J.L., Sankaragomathi B.* 2016 Design, Modeling, Analysis and Simulation of a SEPIC Converter *Middle-East Journal of Scientific Research* 24(7) 2302-2308.
8. *Zhang H., Yi C., Wei T.* 2017 Nonlinear Modal Analysis of Transient Interaction Behaviors in SEPIC DC-DC Converters *IET Power Electron.* 10(10) 1190-1199.
9. *Lakshmi S.V. and others* Time Domain Based Digital Controller for Sepic Converter *Applied Mechanics and Materials* 573 130-135.
10. *Kasmierkowski M.P., Blaabjerg F., Krishnan R.* 2002 Control in power electronics, selected problem *Elsevier Science, USA* 518.
11. *Namho H., Jinhwan J., Kwanghee N.* 2001 A fast dynamic DC-link power-balancing scheme for a PWM converter-inverter system *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 48(4) 794-803.
12. *Golestan S., Guerrero J.M. and Vasquez J.C.* 2017 Three-Phase PLLs: A Review of Recent Advances *IEEE Transactions on Power Electronics* 32(3) 1894-1907.
13. *Golestan S., Guerrero J.M., Vasquez J.C., Abusorrah A.M. and Al-Turki Y.* 2019 A Study on Three-Phase FLLs *IEEE Transactions on Power Electronics* 34(1) 213-224.
14. *Abdallah W.J.* 2019 Studies of voltage stabilization and balancing systems in energy storage modules based on supercapacitors *J. Phys.: Conf. Ser.* 1333 062001.

УДК 620.9

АБРАМОВИЧ Б.Н.,
БОГДАНОВ И.А.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедра электроэнергетики и электромеханики
ТОКАРЕВ И.С.
ПАО «Газпром»

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД В ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация. Рассмотрены вопросы повышения надежности и устойчивости работы автономных электроэнергетических систем в газовой промышленности на примере ГКС «Сахалин», обоснована возможность обеспечения статической и динамической устойчивости АЭЭС с соединением генераторов по сети 0.4 кВ.

Ключевые слова: автономная энергосистема, статическая устойчивость, бесперебойное электроснабжение потребителей.

ABRAMOVICH B.N,
BOGDANOV I.A.
Saint-Petersburg Mining University
TOKAREV I.S.
PAO “Gazprom”

IMPROVING THE STABILITY AND RELIABILITY OF POWER PLANTS FOR THEIR OWN NEEDS IN THE GAS INDUSTRY

Abstract. The tasks of reliability and stability increasing of the autonomous electric power systems in the gas industry are considered the example was the GKS Sakhalin, the possibility of providing static and dynamic stability of the nuclear power plant with the connection of generators through a 0.4 kV network is substantiated.

Keywords: stand-alone power system, static stability, uninterrupted power supply to consumers.

Проведён анализ работоспособности действующей схемы электроснабжения, технического состояния электрооборудования, алгоритмов работы устройств противоаварийной автоматики и релейной защиты и выполнены соответствующие теоретические и практические исследования [1, 2]. Представлены результаты разработки и апробации технических решений по обеспечению бесперебойности электроснабжения потребителей электрической энергии ГКС «Сахалин».

Установлено, что согласно проекту, генераторы ЭСН работают на неразделённую по секциям систему шин ЗРУ, образуя один источник электроснабжения (рис. 1).

Одним из возможных вариантов формирования двух независимых источников питания в энергосистеме является перевод ЭСН на раздельную работу секций шин, то есть на работу при выключенном секционном выключателе в ЗРУ – 10 кВ (рис. 2) и включённых СВ – 0.4 кВ на отдельных КТП. В этом случае вся электростанция, вместе с нагрузкой, делится на две части и образует автономную энергосистему, в которой задачи анализа и обеспечения устойчивости параллельной работы генераторов требуют специального рассмотрения.

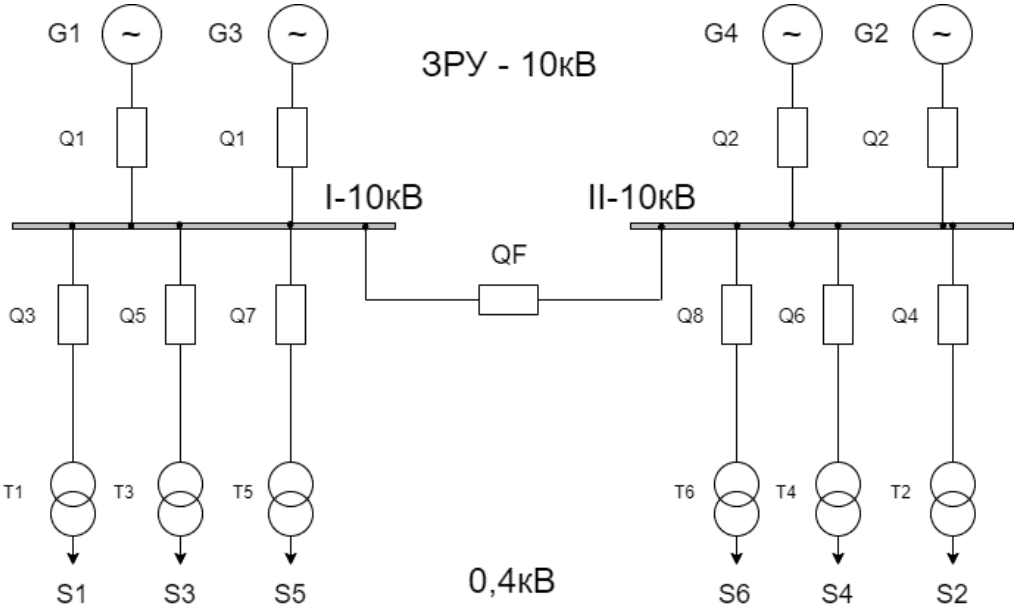


Рисунок 1 – Упрощенная схема электрических соединений ЭСН ГКС «Сахалин»:
S1 – S6 – электрические нагрузки, подключённые к секциям шин 10 кВ

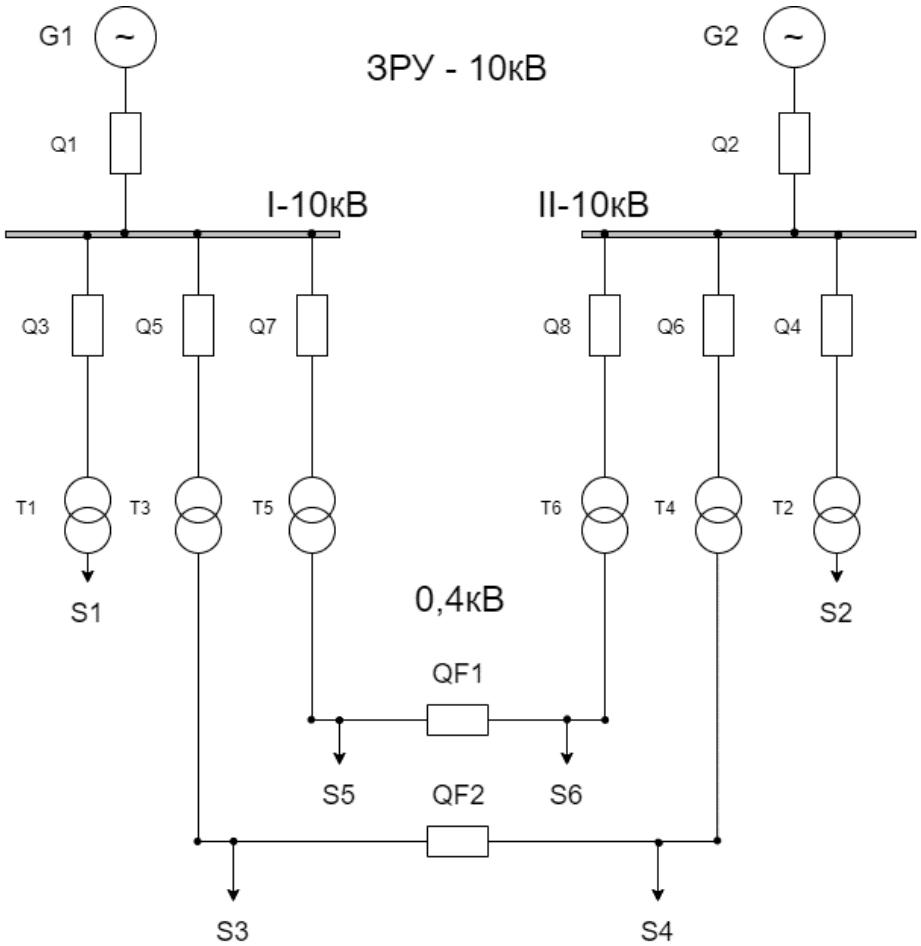


Рисунок 2 – Измененная схема электроснабжения ГКС «Сахалин»:
G1 и G2 - генераторы первой и второй секций шин, Q1-Q8 – высоковольтные выключатели 10 кВ в ЗРУ 10 кВ, T1-T6 – трансформаторы 10/0,4 кВ, QF1 – секционный выключатель КТП собственных нужд, QF2 – секционный выключатель КТП компрессорного цеха

Для проведения анализа устойчивости на первом этапе работы была детально изучена автономная энергосистема и произведен расчет ее статической и динамической устойчивости [3]. Для этого разработана исходная упрощённая схема электрических соединений автономной энергосистемы ГКС «Сахалин» (рис. 1), в которой все нагрузочные элементы на стороне 0.4 кВ объединены в эквиваленты, сформирована двухмашинная модель ЭЭС составлена её схема замещения (рис. 3). В последующих преобразованиях генераторы определены как G-1 и G-2.

В результате преобразований сформирована эквивалентная схема, позволяющая рассмотреть поведение системы при аварийных режимах.

Реально в работе может находиться по одному генератору на каждой секции. Объединение образовавшихся двух подсистем осуществлено включением секционных выключателей на стороне 0,4 кВ комплектных трансформаторных подстанций «Собственных нужд (СН)» и «Компрессорного цеха (КЦ)», от которых запитаны потребители, наиболее чувствительные к кратковременным нарушениям электроснабжения. Предложенная схема исключает потерю питания при останове одного из двух генераторов. Остальные нагрузочные элементы представлены в виде элементов местной нагрузки S1 и S2 генераторов G1 и G2 (рис.3).

К нагрузкам S3–S6 относятся нагрузки потребителей энергосистемы 0,4 кВ, которые не участвуют в синхронной работе генераторов, имеется ввиду потребителей КТП СН и КТП КЦ.

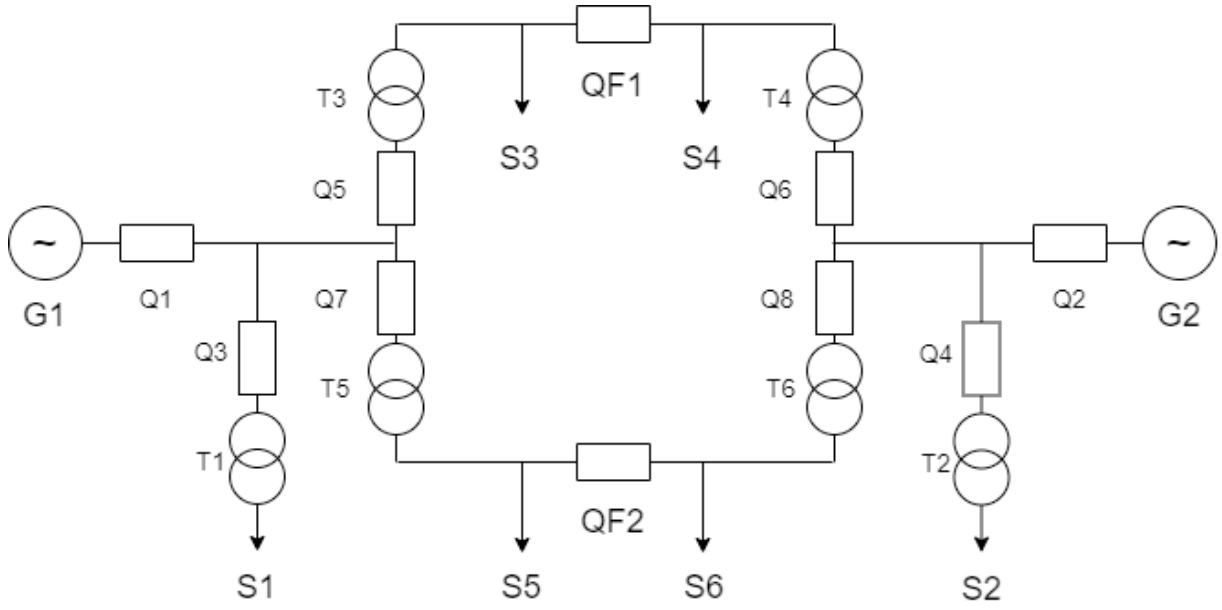


Рисунок 3 – Двухмашинная модель ЭЭС ГКС «Сахалин»:
G1 и G2 – эквиваленты генераторов первой и второй секции шин, S1 и S2 нагрузка 1 и 2 секций шин, S3 и S4 – нагрузка компрессорного цеха, S5 и S6 – нагрузка собственных нужд

При проведении оценочных расчётов апериодической статической устойчивости автономной энергосистемы ГКС по её двухмашинной модели построены угловые характеристики генераторов G1 и G2 (рис. 3). Определены зона устойчивой работы и предельные по устойчивости значения генераторных мощностей [4].

При оценке устойчивости установлено, что коэффициент запаса статической устойчивости имеет значение 85% при нагрузках генераторов в диапазоне 400-500 кВт. В свою очередь значение δ12 (относительный угол ускорения роторов генераторов) составляет 12%, что подтверждает высокий уровень устойчивости энергосистемы при выбранной схеме [5].

После теоретических исследований на программно-аппаратном комплексе реального времени RTDS была построена модель автономной энергосистемы ГКС «Сахалин» и проведены необходимые проверки всех возможным режимов работы на предлагаемой схеме электроснабжения. Оценка устойчивости автономной ЭЭС проводилась по критерию Найквиста и подтвердила положительные результаты теоретических исследований [6].

В результате выполненных исследований получены следующие результаты:

1. Выявлены причины аварийных остановов энергоагрегатов и предложена усовершенствованная оперативная схема ГКС, позволяющая обеспечить устойчивость работы ЭЭС при возникновении аварийных режимов.

2. В результате расчетов статической и динамической устойчивости АЭЭС обоснована принципиальная возможность использования схемы, обеспечивающей двухстороннее электропитание потребителей ГКС «Сахалин». Экспериментальные исследования АЭЭС ГКС «Сахалин» показали эффективность и работоспособность схемы АЭЭС с секционированием сборных шин по сети с напряжением 0.4 кВ.

3. На программно-аппаратном комплексе RTDS создана полная модель АЭЭС ГКС «Сахалин», проведена ее верификация путём сравнения моделируемых и реальных процессов. Выполнено моделирование нормальных и переходных режимов работы автономных ЭЭС с целью перенастройки устройств релейной защиты и автоматики.

4. С использованием модели ПАК RTDS обосновано отсутствие ограничений по обеспечению устойчивости параллельной работы энергоагрегатов ГКС по сети 0.4 кВ.

5. По результатам проведенных экспериментов в условиях ГКС «Сахалин» выполнены изменения в схеме электроснабжения ГКС «Сахалин»: каждый из двух генераторов 10 кВ подключается на раздельные шины, а синхронизация производится на уровне напряжения 0,4 кВ посредством секционных выключателей QF1 и QF2. При выходе из строя одного из генераторов потребителей, подключенных к секции на которой произошло КЗ ступенчато переводят на неповрежденную секцию 0,4 кВ таким образом, чтобы оставшийся в работе генератор не отключился по перегрузке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жданов П.С.* Вопросы устойчивости электрических систем / Под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.

2. Выбор схем электроснабжения автономных объектов от элеткростанций собсвенных нужд. СТО Газпром 2-6.2-208-2008. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2008. – 35 с.

3. *Глухов В.А.* Повышение надежности электроснабжения компрессорных станций с газотурбинным приводом: Автореф. дис. канд. кехн. каук. – СПб., 2007. – 18 с.

4. *Абрамович Б.Н.* Методы и средства обеспечения энергетической безопасности промышленных предприятий с непрерывным технологическим циклом / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев / Промышленная энергетика. -2016. - №9. - С. 18-22.

5. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

6. *Петров С.П.* Повышение надежности и экономичности электроснабжения компрессорных станций газотранспортных систем. дис. канд. тех. наук. 05.09.03 / Санкт-Петербургский горный университет. - 2012. - 183 с.

УДК 621.398

БАБУРИН С.В.,
ТУРЫШЕВА А.В.,
КОВАЛЬЧУК М.С.
Санкт-Петербургский горный университет

ВЫБОР СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Аннотация. В статье приведены основные единичные и комплексные показатели надежности, используемые для оценки надежности систем электроснабжения. Представлены основные цели расчета надежности. Приведена методика обоснования рациональной структуры системы электроснабжения. Описан алгоритм определения рациональной структуры и его основные этапы. Даны рекомендации по определению направлений оптимизации структуры системы электроснабжения.

Ключевые слова: надежность; система электроснабжения; положительный вклад.

BABURIN S.V.,
TURYSHEVA A.V.,
KOVALCHUK M.S.
Saint-Petersburg Mining University

CHOICE OF THE POWER SUPPLY SYSTEM STRUCTURE OF GAS PIPELINES COMPRESSOR STATIONS

Abstract. The article provides main unit and complex reliability indicators used to appreciate reliability of power supply systems. The main goals of reliability calculation are presented. The methodology for determination rational structure of power supply system is given. The algorithm for choice the rational structure and its main stages are described. Recommendations for determination directions of optimization power supply system structure are given.

Keywords: reliability; power supply system; positive contribution.

Современные системы электроснабжения (СЭС) имеют сложную структуру с большим количеством элементов. Надежность таких систем, наряду с экономическими показателями, может являться одним из критериев определения их рациональной структуры [1, 2, 3].

Структурно систему электроснабжения можно разделить на силовую часть, по которой непосредственно передается электрическая энергия, и часть релейной защиты и сетевой автоматики, которая осуществляет защиту элементов СЭС и отвечает за автоматические переключения в СЭС.

В системе электроснабжения присутствует большое количество потребителей электрической энергии, которые относятся к различным категориям по надежности и бесперебойности электроснабжения. К ним предъявляются различные требования по надежности. Расчет надежности электроснабжения должен осуществляться отдельно по каждой группе потребителей. На практике количественное описание, анализ и оценка надежности проводят для наиболее удаленных потребителей, в электроснабжении которых участвует наибольшее количество элементов системы с наиболее низкими показателями надежности. Надежность электроснабжения остальных однотипных потребителей будет не хуже.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

В качестве исходных данных для расчета надежности электроснабжения используются справочные данные о надежности элементов системы, данные о надежности аналогичных элементов или результаты обработки статистической информации о надежности аналогичных элементов, работающих в схожих системах электроснабжения, и другую информацию.

Основными единичными показателями безотказности СЭС являются средняя наработка системы на отказ *T*о при электроснабжении определенной категории потребителей электроэнергии и вероятность безотказной работы *P(t)* СЭС потребителей электроэнергии определенной категории в течение заданного времени.

Основным единичным показателями ремонтопригодности СЭС является среднее время восстановления *T*в электроснабжения потребителей электроэнергии определенной категории.

Комплексным показателем надежности, характеризующим готовность СЭС к выполнению своих функций, является коэффициент готовности системы *K*г.

На всех этапах проектирования СЭС результаты расчета надежности сравниваются с нормативными значениями показателей надежности, установленными в результате задания требований по надежности или нормирования надежности и внесенными в нормативно-техническую документацию – техническое задание или технические требования.

ЦЕЛИ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Основными целями расчета надежности СЭС являются:

- проверка соответствия показателей надежности требованиям нормативных документов;
- сравнительный анализ надежности вариантов схемно-конструктивного построения системы и обоснование выбора рационального варианта;
- обоснование и оценка эффективности мер по улучшению структуры системы электроснабжения, системы технического обслуживания и ремонта, направленных на повышение его надежности;
- решение различных оптимизационных задач, в которых показатели надежности выступают в роли целевых функций.

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методика обоснования рациональной структуры системы электроснабжения включает следующие основные этапы:

1. Обоснование показателей для оценки надежности элементов системы электроснабжения.
2. Обоснование способов получения значений расчетных показателей надежности элементов системы электроснабжения.
3. Исходная формализованная постановка задачи в форме структурного описания исследуемых свойств надежности системы электроснабжения.
4. Построение расчетной математической модели для оценки надежности систем электроснабжения, как структурно-сложных технических систем.
5. Моделирование и расчет надежности структурно сложных систем электроснабжения с использованием специальных программных комплексов.

На первом этапе необходимо обосновать показатели для оценки надежности составляющих систему электроснабжения элементов, а также показатели для оценки

надежности самой системы электроснабжения, как структурно сложной технической системы.

При обосновании показателей необходимо учитывать основные различия оценки надежности для восстанавливаемых и невосстанавливаемых элементов, а также различия анализа надежности отдельных элементов и систем, состоящих из функционально связанных совокупностей различных элементов.

На втором этапе необходимо иметь в виду, что параметры надежности элементов (неделимых частей системы) могут быть определены только на экспериментальной основе, путем проведения специальных испытаний, или сбора и обработки статистических данных их эксплуатации.

На третьем этапе моделирования создаётся первичная формализованная модель знаний об исследуемых свойствах системного объекта. Первичная модель, как правило, не является вычислительной, т.е. на ее основе не предусматриваются непосредственные расчеты числовых значений показателей каких-либо системных свойств исследуемого объекта в целом.

Четвертый этап определяет насколько точно и достоверно разрабатываемая математическая модель описывает поведение системы в плане надежности. От этого зависит ценность и достоверность результатов по обоснованию рациональной структуры системы электроснабжения.

На данном этапе последовательно выполняются следующие мероприятия: на основе разработанной схемы функциональной целостности (СФЦ) и заданных критериев функционирования строятся логическая функция работоспособности (ЛФРС) и на ее основе, с использованием законов теории вероятностей, осуществляется строгий переход к вероятностной функции работоспособности (ВФ), которая по существу и является математической моделью надежности структурно-сложной системы электроснабжения. Построение ЛФРС и ВФ является сложной и трудоемкой задачей, поэтому для ее решения используются специализированные программные комплексы [4].

Пятый этап, является завершающим этапом анализа структурно сложных систем электроснабжения и основывается на использовании расчетных математических моделей для вычисления различных системных характеристик

Определение рациональных структур систем электроснабжения может производиться на основе существующих систем электроснабжения, находящихся в эксплуатации, или на основе перспективных, разрабатываемых (проектируемых) систем. Алгоритм определения рациональной структуры системы электроснабжения, соответствующий описанной методике, представлен на рис. 1.

Критерием оптимизации структурного исполнения систем электроснабжения должна служить минимизация элементов структуры объекта при обеспечении системного показателя надежности не ниже требований нормативно-технических документов.

Реализация указанного критерия обеспечит высокие значения технико-экономических показателей на создание и эксплуатацию систем электроснабжения, суть которых состоит в минимизации затрат (избежать заведомо неоправданных затрат) при сохранении нормативных значений надежности.

Расчет предполагает последовательную реализацию четырех этапов, подробно изложенных выше (блоки 1–4 алгоритма). После чего, если рассматриваемая схема электроснабжения не соответствует требованиям по системному показателю надежности $P_C < P_C^{доп}$, необходимо определить основные направления совершенствования структурной схемы. И затем заново повторить весь итерационный цикл. Повторение расчетов производится до тех пор, пока Системный показатель надежности не будет соответствовать допустимому значению.

Направленность совершенствования исследуемых структур систем электроснабжения определяют показатели положительных и отрицательных вкладов элементов [5].

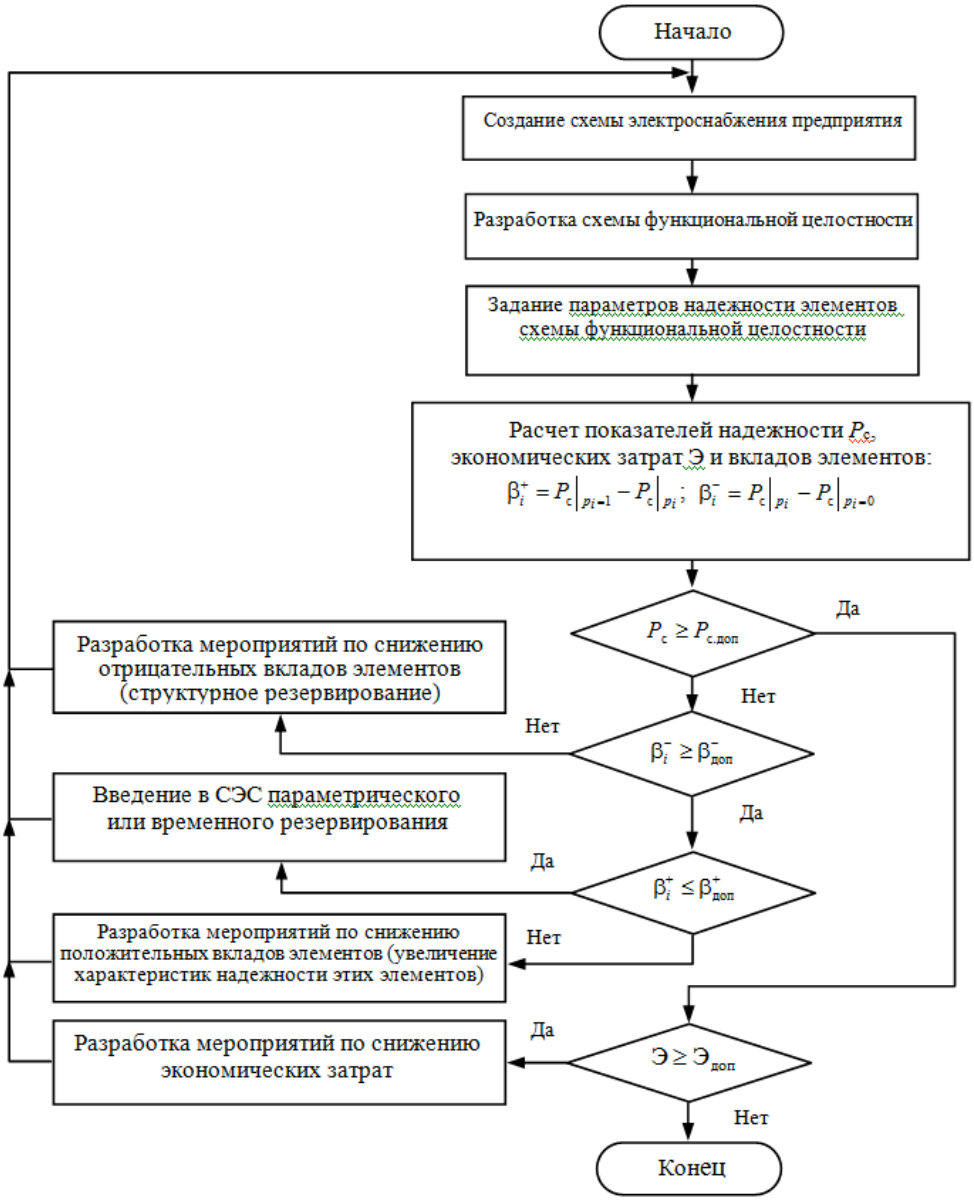


Рисунок 1 – Алгоритм определения рациональной структуры системы электроснабжения предприятий

К изменению системного показателя надежности, значимостей и вкладов элементов могут привести изменения исходных вероятностных характеристик элементов p_i системы (это возможно при замене элементов на более совершенные, с обновленной элементной базой), так и при совершенствовании (оптимизации) структурного построения системы.

В процессе определения направлений совершенствования структур систем электроснабжения (оптимизации структур) следует использовать следующие правила:

- любые структурные изменения системы не должны приводить к снижению системного показателя надежности ниже значений, установленных нормативно-техническими документами $P_C < P_C^{доп}$;

- структурное совершенствование схемы, при минимизации элементов, должно осуществляться также в направлении выравнивания относительных значений их положительных вкладов (снижения положительных вкладов у элементов с высокими их значениями и наоборот);

- при невозможности выровнять положительные вклады отдельных элементов системы, т.е. в схеме остаются элементы с относительно высокими положительными вкладами, необходимо сосредоточить усилия на увеличении характеристик надежности таких элементов, что в совокупности приведет к снижению их положительных вкладов.

После определения направлений структурного совершенствования системы, заново производится разработка функциональной схемы системы и повтор итерационной последовательности выполнения блоков алгоритма.

После очередной итерации производится проверка расчетного значения системного показателя надежности P_C на предмет удовлетворения требованиям нормативно-технических документов. При удовлетворении указанным требованиям - производится проверка системы электроснабжения по экономическому критерию. В качестве экономического критерия может быть принят уровень приведенных затрат или размер чистого дисконтированного дохода.

При несоответствии допустимому значению при необходимости разрабатываются мероприятия по снижению экономических затрат и все этапы алгоритма повторяются снова.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baburin S.V.,* Kovalchuk M.S. Analysis of power supply systems reliability for gas pumping compressor stations *Proc. IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus* 576-579.
2. *Abramovich B.N.*, Sychev Yu.A. The structure selection of hybrid correction device for centralized and distributed electrical networks *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)* 1-6.
3. *Zhukovskiy Y.L.*, Starshaia V.V., Batueva D.E., Buldysko A.D. 2018 Analysis of technological changes in integrated intelligent power supply systems *Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects - 11th conference of the Russian-German Raw Materials* 249-258.
4. *Можаев А.С.* Программное средство «АРБИТР» (ПК АСМ СЗМА) Вопросы атомной науки и техники. «Серия Физика ядерных реакторов». - М: Российский научный центр «Курчатовский институт», 2008, Вып. 2. - С. 105-116.
5. *Петров С.П.* Применение логико-вероятностного метода моделирования для расчета надежности систем электроснабжения / С.П.Петров, С.В.Бабурин, Д.А.Устинов // Наука и техника в газовой промышленности. - 2011. - № 3. - С.47-50.
6. *Frolov, V.Y., Ivanov, D.V., Belsky, R.A.* Increasing of operation security and of breaking capacity of surge arresters. Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017, 7910861, с. 1520-1523.
7. *Frolov, V., Petrov, G., Yushin, B., (...), Churkin, I., Ivanov, D.* Research and development of plasma technologies of spraying of coatings, 18th Symposium on Physics of Switching Arc, FSO 2009, с. 162-165.
8. *Frolov, V., Ivanov, D., Shibaev, M.* Mathematical modeling of plasma technology for TiO2 fine powder production, 2014 Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures 9(3), с. 1233-1240.
9. *Obraztsov, N.V., Frolov, V.Y.* A two-dimensional axisymmetric model of an AC arc // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, с. 430-432.
10. *Frolov, V.Y., Neelov, A.A., Zhiligotov, R.I., Bystrov, A.V.* Identification of the protection parameters of the local electrical network taking into account the detuning of the inrush current Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, с. 626-628.

УДК 639.1

БАКИРОВ Ф.Г.,
ИБРАГИМОВ Е.С.,
КАГАРМАНОВА А.А.
Уфимский Государственный Авиационный
Технический Университет,
кафедра АТиТ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ ПОСЛЕ ЕЁ НАДСТРОЙКИ ГАЗОВЫМИ ТУРБИНАМИ ТИПА АЛ-31 СТЭ И 6FA

Аннотация. Проведён сравнительный анализ эффективности двух вариантов модернизации паротурбинной электростанции путём её надстройки газотурбинными установками(ГТУ), снабжёнными паровыми котлами утилизаторами высокого давления для возможности работы с существующими энергетическими котлами (ГТУ-ТЭЦ). По первому варианту модернизация проводится на основе монтажа четырёх ГТУ типа АЛ-31 СТЭ установленной суммарной электрической мощностью 72 МВт, по второму варианту модернизация проводится на основе монтажа одной ГТУ типа 6FA установленной электрической мощностью 82 МВт. Установлено, что уменьшение удельных затрат условного топлива на отпуск электрической энергии электростанции после проведения модернизации составило: при модернизации с монтажом 4 штук ГТУ АЛ-31 СТЭ – на 104,4 г/кВт ч, а при проведении модернизации с одной ГТУ 6FA – на 102,4 г/кВт ч. При этом, уменьшение удельных затрат топлива в основном связано не с мощностью или типом ГТУ, а величиной использования теплоты топлива (КИТТ) модуля ГТУ-ТЭЦ за счёт уменьшения потерь тепловой энергии от котла-утилизатора.

Ключевые слова: модернизация теплоэлектроцентрали; газотурбинная установка; котёл-утилизатор.

BAKIROV F.G.,
IBRAGIMOV E.S.,
KAGARMANOVA A.A.
Ufa State Aviation Technical University,
ATIT Department

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE THERMAL POWER PLANT AFTER ITS SUPERSTRUCTURE WITH AL-31 STE AND 6FA GAS TURBINES

Abstract. A comparative analysis of the effectiveness of two options for upgrading a steam turbine power plant by adding gas turbine units (GTU) equipped with high-pressure heat recovery boilers to work with existing power boilers (GTU-HPP) is carried out. According to the first option, the modernization is carried out on the basis of installation of four AL-31 STE GTU with an installed total electric capacity of 72 MW, while the second option is carried out on the basis of installation of one 6FA GTU with an installed electric capacity of 82 MW. It was found that the reduction in the specific costs of conventional fuel for the release of electric energy of the power plant after the modernization was: when upgrading with the installation of 4 pieces of GTU AL-31 STE – by 104.4 g/kWh, and when upgrading with one GTU 6FA – by 102.4 g/kWh. at the same time, the reduction in specific fuel costs is mainly due not to the power or type of

GTU, but to the value of the use of fuel heat (KITT) of the GTU-HPP module by reducing the loss of heat energy from the heat recovery boiler.

Keywords: modernization of the heat and power plant; gas turbine installation; heat recovery boiler.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 28.03.2019 г. №335 одной из целей государственной программы РФ «Развитие энергетики» является достижение в результате проведённой модернизации удельного расхода условного топлива на отпуск электрической энергии на источниках комбинированного производства равного 285,4 г/кВт ч [1].

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОРОВ

Из всех известных технических решений, применяемых для проведения модернизации оборудования электростанций только внедрение парогазовых технологий позволяет обеспечить такое значительное уменьшение удельного расхода топлива на отпуск электроэнергии до запланированного Правительством РФ уровня [2-11]. Для модернизации электростанций применяются газотурбинные установки (ГТУ) различного типа, обладающие различной электрической мощностью, в том числе изготавливаемая по лицензии на заводе «ЛМЗ» газовая турбина типа 6FA электрической мощностью 82 МВт. Но модернизация электростанций на базе ГТУ со значительной электрической мощностью выполняется, как правило, через механизм финансирования договора о предоставлении мощности (ДПМ) [12]. Такая организация финансирования приводит к дополнительным затратам на электрическую энергию у промышленных потребителей и поэтому носит ограниченный характер. Вместе с тем, проекты строительства генерирующих мощностей с ГТУ меньшей мощностью (например, 18–25 МВт, выпускаемых авиационными предприятиями РФ), окупаются и без механизма финансирования по ДПМ.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления влияния величины электрической мощности ГТУ, применяемой для модернизации на технические показатели электростанции был проведён их сравнительный анализ для паротурбинной электростанции при двух вариантах модернизации: при надстройке электростанции модулем ГТУ-ТЭЦ на базе одной штуки ГТУ 6FA с номинальной мощностью 82 МВт и модулем ГТУ-ТЭЦ на базе четырёх штук ГТУ АЛ 31СТЭ суммарной электрической мощностью 72 МВт. В обоих вариантах ГТУ снабжены выпускаемыми в РФ котлами-утилизаторами высокого давления без дожига для возможности включения котлов в параллельную работу с существующими энергетическими котлами электростанции.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

После ввода в работу ГТУ произойдёт увеличение как выработки электроэнергии электростанцией, так и потребление на собственные нуждымодернизируемой электростанции. Так как котлы-утилизаторы снабжены газовыми подогревателями воды (ВВТО), которая после нагрева направляется в деаэраторы станции с давлением 6 атм, то произойдёт уменьшение отпуска тепловой энергии из производственных отборов существующих турбин электростанции, ранее направляемых в деаэраторы. Поэтому, увеличение генерирующей мощности модернизируемой электростанции произойдёт на величину разности между мощностью вновь монтируемых газовых турбин и разгрузкой существующих паровых турбин электростанции. Увеличение собственных нужд в основном произойдёт на величину мощности, потребляемой газодожимным компрессором. Увеличение нагрузки существующих насосов станции будет

незначительно, так как пар, генерируемый котлом-утилизатором и направляемый в общий паропровод высокого давления электростанции уменьшает на эту же величину паропроизводительность существующих котлов электростанции и, соответственно, расход питательной воды.

Установлено, что независимо от электрической мощности газовых турбин, применяемых для модернизации, при обоих вариантах её проведения, обеспечивается значительное уменьшение удельных затрат топлива на отпуск электрической энергии. Уменьшение удельных затрат условного топлива на отпуск тепловой энергии электростанции после проведения модернизации составило: при модернизации с монтажом 4 штук ГТУ АЛ-31 СТЭ – на 104,4 г/кВт ч, а при проведении модернизации с одной ГТУ 6FA – на 102,4 г/кВт ч.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При расчёте показателей ГТУ с утилизацией тепловой энергии в соответствии с нормативной документацией, принятой в энергетике [13] распределение топлива в реальной схеме ГТУ-ТЭЦ производится пропорционально расходам топлива на их производство в альтернативной схеме (раздельное производство электрической и тепловой энергии) при условии равенства в обоих схемах выработки электроэнергии и отпуска тепловой энергии. В результате проведённого расчёта было выявлено, что при обоих вариантах модернизации происходит существенное уменьшение удельных затрат условного топлива на отпуск электрической энергии и сравнительно незначительное увеличение удельных затрат топлива на отпуск тепловой энергии. При модернизации с монтажом 4 штук ГТУ АЛ-31 СТЭ – на 11,6 кг/Гкал, а при модернизации с монтажом одной ГТУ 6FA – на 12,9 кг/Гкал. В рассмотренных вариантах ГТУ-ТЭЦ удельные затраты топлива на отпуск электрической (УРУТ э/э) и тепловой энергии (УРУТ т/э) паротурбинной электростанции после её надстройки составили: для ГТУ-ТЭЦ на базе 4 штук ГТУ АЛ-31 СТЭ - 243,5 г/кВт ч и 156,1 кг/Гкал, для ГТУ-ТЭЦ на базе ГТУ 6FA – 248,5 г/кВт ч и 157,4 кг/Гкал.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Основные технические характеристики электростанции до и после модернизации при работе 8000 часов за год приведены в табл. 1.

ВЫВОДЫ

1. Удельные затраты топлива на отпуск электрической и тепловой энергии в первую очередь определяются не мощностью применяемой для модернизации электростанции ГТУ, а величиной коэффициента использования тепла топлива (КИТТ) вновь монтируемой ГТУ-ТЭЦ. Чем меньше потери тепловой энергии от котла-утилизатора, тем выше КИТТ ГТУ-ТЭЦ и меньшее значение удельных затрат топлива. В рассмотренных вариантах модернизации КИТТ ГТУ-ТЭЦ на базе АЛ-31 СТЭ при номинальной нагрузке был равен 0,86, а КИТТ ГТУ на базе 6FA был равен 0,79. Поэтому, удельные затраты условного топлива при проведении модернизации электростанции на базе 4 штук ГТУ АЛ-31 СТЭ оказались несколько ниже, чем при проведении модернизации на базе одной ГТУ 6FA.

2. Выбор наиболее оптимального варианта модернизации электростанции путём её надстройки модулем ГТУ-ТЭЦ недостаточно связывать только с мощностью применяемых для модернизации газовых турбин, необходимо проведение расчёта инвестиционных показателей проекта модернизации для различной мощности газовых турбин и конструкции их котлов-утилизаторов, обеспечивающих максимально возможную величину использования теплоты топлива.

Таблица 1.

Основные технические характеристики электростанции до и после проведения модернизации

Параметр	Значение до модернизации	Значение после модернизации на базе 4 штук АЛ-31 СТЭ	Значение после модернизации на базе ГТУ 6FA
Величина отпущенной электроэнергии от электростанции, тыс. кВт·ч	599049	1134730	1213386
Величина отпущенной тепловой энергии от электростанции, Гкал	1595709	1595709	1595709
Паропроизводительность котлов-утилизаторов вновь монтируемых ГТУ, т/ч	Отс.	124	110
Тепловая мощность вновь монтируемых ВВТО котлов-утилизаторов ГТУ, Гкал/ч	Отс.	6,37	9,89
УРУТ э/э , г/кВт ч	347,8	243,5	248,4
УРУТ т/э , кг/Гкал	144,5	156,1	157,4
КИТТ вновь монтируемой ГТУ-ТЭЦ	Отс.	0,86	0,79

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства РФ от 28.03.2019 г. №335 «О внесении изменений в постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 года №321 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики».
2. *Ибрагимов Е.С.* Повышение эффективности топливоиспользования тепловых электрических станций за счет модернизации турбинного и котельного оборудования / Научные горизонты, 2017. №3. С 71–83.
3. *Storm S., DeCaprio M.* 2011 Recent Regenerative Airheater Improvements at HECO Kahe Point, Oahu *Electric Power Conference, Rosemont, USA. May 10-12, 2011*.
4. *Storm S.*, *Guffre J.* 2010 Experiences with Regenerative Air Heater Performance Evaluations &Optimizatio *POWER-GEN Europe, Amsterdam, Holland, June 8- 10, 2010*.
5. *Ibragimov E.*, *Cherkasov S.* 2018 Improving the efficiency of power boilers by cooling the flue gases to the lowest possible temperature under the conditions of safe operation of reinforced concrete and brick chimneys of power plants *MATEC Web of Conferences*, *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018), Saint-Petersburg, Russia, November 19–20, 2018* 245.
6. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И.З. Аронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1974. – 280 с.
7. Высокоэффективные газовые контактные водонагреватели / Ю.П. Соснин, Е.Н. Бухаркин. - 4-е изд., испр. и доп. - М.: Стройиздат, 1988. - 375 с.
8. Энергосбережение в теплогенерирующих установках / А.А. Кудинов. - Ульяновск: УлГТУ, 2000. - 33 с.
9. *Штеренберг В.Я.* Усовершенствованная газотурбинная установка, использующая технологию частичного окисления для экологически чистой выработки электроэнергии / В.Я. Штеренберг, В.М. Масленников // Международный журнал низкоуглеродных

технологий, 2011. Вып. 6. С. 9.
10. *Долотовский И*. Стабилизация мощности газотурбинной установки / И. Долотовский, Е. Ларин // Физический журнал. Серия конференций, 2017. - С. 5.
11. *Гордеев С.И*. Термодинамический анализ технических решений, направленных на повышение эффективности комплексной газификации комбинированного цикла / С.И. Гордеев, Т.Ф. Богатова, А.Ф. Рыжков // Физический журнал. Серия конференций, 2017. - С. 7.
12. *Бакиров Ф.Г.* Эффективность модернизации теплоэлектроцентрали путём надстройки модулем ГТУ-ТЭЦ с газовой турбиной АЛ-31 СТЭ / Ф.Г. Бакиров, Е.С. Ибрагимов // Инновации и инвестиции, 2019. - №8. - С. 78—86.
13. Приказ Минэнерго России от 30.12.2008 г. «Об утверждении Порядка определения нормативов удельного расхода топлива при производстве электрической и тепловой энергии» (редакция от 30.11.2015 г.).

УДК 621.316

БАРДАНОВ А.И.,
ПУДКОВА Т.В.,
ВАСИЛЬКОВ О.С.
Санкт-Петербургский горный Университет

АНАЛИЗ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. В работе представлены основные характеристики графиков нагрузки, которые важно учитывать при их регулировании. Обозначеныограничивающие факторы при формировании графиков нагрузок для потребителей-регуляторов мощности. Рассмотрена возможность выравнивания графиков нагрузки с использованием накопителей электроэнергии. Выявлена конфигурация накопителя, позволяющая расширить его функциональные возможности.

Ключевые слова: показатели графиков нагрузки, потребитель-регулятор мощности, накопитель электроэнергии.

BARDANOV A.I.,
PUDKOVA T.V.,
VASILKOV O.S.
Saint-Petersburg Mining University

ANALYSIS AND REGULATION OF LOAD SCHEDULES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Abstract. The paper presents the main characteristics of load curves, which are important to consider when regulating them. The limiting factors in the formation of load schedules for consumers-power regulators are indicated. The possibility of balancing load graphs using energy storage devices is considered. The drive configuration has been revealed, allowing to expand its functionality.

Key words: indicators of load schedules, consumer-power regulator, energy storage.

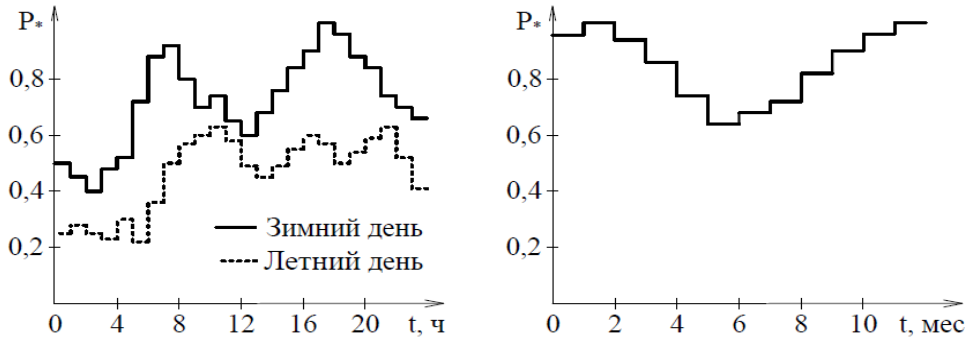
Введение.

Одним из основных показателей энергоэффективности использования поступающей на предприятие энергии является график электрической нагрузки.неравномерность которых приводит к изменению относительного прироста расхода топлива. В часы максимальных нагрузок энергосистемы топлива тратится значительно больше, чем на выработку того же количества электроэнергии в периоды «провалов», а каждый останов и пуск энергоблоков связан с большими непроизводительными затратами топлива. Исходя из этого, выравнивание графика нагрузки дает наиважнейший с точки зрения энергосистемы эффект и экономически стимулируется, он позволяет увеличить коэффициент использования установленной мощности электростанций и снизить потери электроэнергии в электрических сетях [1, 2].

Анализ графиков нагрузки.

Следует различать индивидуальные и групповые графики нагрузки – соответственно для отдельных электроприемников и для фидеров, питающих группы электроприемников [3]. При решении вопросов, связанных с регулированием графиков

нагрузки будем рассматривать в основном групповые. Индивидуальные графики нагрузки важны для понимания физической картины формирования групповых графиков.



а) б)

Рисунок 1 – Типовой график активной нагрузки:
а) – суточный, б) – годовой

Графики нагрузки характеризуются большим числом показателей, однако, нас интересуют следующие:

- коэффициент максимума:

$$\beta = \frac{P_{min}}{P_{max}},$$

где P_{min} - ночной минимум потребления; P_{max} - дневной максимум потребления. Очевидно, что чем меньше величина β, тем более неравномерен график нагрузки;

- коэффициент заполнения или плотность нагрузки:

$$\gamma = \frac{\int_0^{24} P(t)d(t)}{24 P_{max}},$$

который представляет собой отношение суточного потребления электроэнергии к максимально возможному;

- число часов использования максимума нагрузки:

$$T_{им} = \int_0^{24} P(t)\,d(t)\,/P_{max} = 24\gamma;$$

- регулируемый диапазон мощности:

$$\Delta P_{рег} = P_{max} - P_{min}.$$

Динамической характеристикой графиков является скорость роста нагрузки – производная мощности электропотребления по времени:

$$P_{\upsilon} = \frac{dP}{dt}.$$

Учитывая представленные выше показатели, график нагрузки можно разбить на четыре зоны, различающиеся плотностью: базисную – ниже ночного минимума, полубазисную и полупиковую – между дневным и ночным минимумом и пиковую – выше дневного минимума. Стоит отметить, что,проанализировав графики нагрузки предприятий различных отраслей, равномерность потребления в них отличается существенным образом и зоны, указанные выше можно выделить в каждом из них.

Регулирование графиков нагрузки.

Переходя к вопросу регулирования графика нагрузки, одним из путей является использование на промышленных предприятиях потребителей-регуляторов. Согласно классику Г.С. Хронусову – комплекс потребителей – регуляторов мощности предприятия

есть совокупность электроприемников, управляемых по единой программе в режиме регулирования нагрузки с целью формирования оптимизированных графиков электрических нагрузок предприятиях [4]. В качестве потребителей-регуляторов используется мощное и высокоавтоматизированное оборудование, обеспечивающее существенное снижение пиков нагрузки. Однако, использование регуляторов-нагрузки осложняется тем, что суточные графики электропотребления основных энергосистем промышленных предприятий различных отраслей стали характеризоваться наличием двух, практически одинаковых максимумов, как представлено на рис. 1. В связи с этим реальный эффект снижения потребности в мощности возможен только при сбалансированном снижении как утреннего, так и вечернего максимумов [5-8]. Более эффективное использование потребителей-регуляторов возможно при применении двуставочных и дифференцированных по зонам суток тарифы, но при регулировании потребления крупных узлов нагрузки зоны суточного максимума будут сдвигаться. Применяемые тарифы оправданы и совою задачу выполняют, однако при регулировании потребления крупных узлов нагрузки зоны суточного максимума будут сдвигаться. Такое регулирование приводит только к образованию новых максимумов.

Альтернативой применению потребителей-регуляторов мощности является использование накопителей электроэнергии. Стоит отметить, что интерес к накопителям электроэнергии значительно возрос в последнее время в связи с активизацией работ по созданию интеллектуальных электроэнергетических систем, в которых эти устройства играют роль одного из ключевых элементов. На данный момент создан широкий спектр накопителей, построенных на различных принципах, отличающиеся как технико-экономическими показателями, так и функциональным назначением, среди которых следует, прежде всего, выделить аккумуляторные батареи и суперконденсаторы.

Существуют следующие режимы работы накопителей электроэнергии: накопление электроэнергии (заряд), хранение (буферный), выдачи электроэнергии (разряд), аварийные (резкие сбросы и набросы нагрузки). В режиме накопления энергии накопитель заряжается избыточной электроэнергией в основном во время прохождения «провала» нагрузки, что позволяет избежать остановку генерирующего оборудования. При эксплуатации в буферном («плавающем») режиме накопитель работает параллельно с другим (основным) источником электроэнергии. В режиме разряда накопитель отдает запасенную энергию потребителю. При возникновении аварийных режимов накопитель позволяет демпфировать колебания мощности, так как современные накопители электроэнергии обладают высокой скоростью выдачи энергии в сеть, а также высокой маневренностью, которая характеризуется временем реверса мощности $t_{рев}$, необходимым для перевода его из режима накопления в режим выдачи, и наоборот [9].

Во всех вышеуказанных режимах должен соблюдаться баланс мощности в узле подключения накопителя:

$$\begin{cases} P_{нагр} \pm P_{нэ} + P_{г} = 0; \\ Q_{нагр} + Q_{фку} + Q_{нэ} + Q_{г} = 0. \end{cases}$$

где $P_{нагр}, P_{г}, Q_{нагр}, Q_{г}$ - соответственно активная и реактивная мощность, «втекающие» (нагрузка) и «вытекающие» (генерация), $P_{нэ}, Q_{нэ}$ - активная и реактивная мощности потребляемые накопителем электроэнергии, $Q_{фку}$ - реактивная мощность фильтрокомпенсирующих устройств.

Поскольку накопитель должен работать в течение времени, определяемого из графика нагрузки, его рабочая энергоемкость определяется по формуле:

$$Э_{н.раб} = \int_{0}^{t_{раб}} P_{н}(t)\,dt,$$

где $t_{раб}$ - время работы накопителя, которое зависит от скорости заряда/разряда накопителя.

Полная энергоемкость накопителя с учетом аварийных составляющих

$$Э_{нэ} = Э_0 + Э_{н.раб} + Э_{ав},$$

где $Э_0$ - минимальный уровень накопленной энергии «мертвый объем», $Э_{ав}$ - аварийная энергоемкость накопителя для демпфирования колебаний, возникающих в любом из режимов функционирования.

Таким образом, выделим четыре параметра накопителя электроэнергии, определяющие его функциональные возможности:

- максимальная мощность накопителя $P_н$;
- полная энергоемкость $Э_{нэ}$;
- время работы $t_{раб}$;
- время реверса мощности $t_{рев}$.

Безусловно, данные параметры зависят от системы, в которую внедряется накопитель электроэнергии и, зачастую, выполнение всех требований невозможно с технической точкой зрения, либо установка накопителя становится экономически нецелесообразной [10-13]. Однако, расширить данные функциональные возможности позволяет совместное использование накопителей различного типа – аккумуляторных батарей и суперконденсаторов. Принципы создания и функционирования подобных систем подробно описаны в работах [14, 15]. Отметим следующее, гибридные накопители в отличии от накопителей, состоящих только из АКБ, обладают следующими преимуществами:

- увеличение максимальной мощности накопителя электроэнергии;
- увеличение времени работы накопителя электроэнергии, за счет уменьшения влияния пиковой нагрузки на аккумуляторные батареи;
- сокращение времени реверса мощности, так как суперконденсаторы обладают высоким быстродействием.

Таким образом функциональные возможности гибридных накопителей гораздо шире, чем у обычных накопителей, что позволит интегрировать их в любую систему электроснабжения, при этом эксплуатационные расходы снижаются за счет увеличения срока эксплуатации аккумуляторных батарей.

Заключение.

Для обеспечения высокого коэффициента использования установленной мощности электростанций и уменьшения потерь мощности в электрических сетях необходиморациональное и эффективное регулирование графиков нагрузки, что, в свою очередь, возможно только при полном анализе исходных данных, с выявлением всех вышеперечисленных показателей и факторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шклярский Я.Э., Пирог С.* Влияние графика нагрузки на потери в электрической сети предприятия / Записки Горного института, 2016. Т.222. С. 859-863.
2. *Шклярский Я.Э., Брагин А.А.* Снижение потерь энергии в электрических сетях предприятий / «Известия ВУЗов. Горный журнал», 2013. № 1. - С. 99-103.
3. *Волобринский С.Д.* Электрические нагрузки и балансы промышленных предприятий. - Л.: Энергия, 1976. - 128 с.
4. *Хронусов Г.С.* Формирование эффективных режимов электропотребления промышленных предприятий. - Екатеринбург, 1998.
5. *Shklyarskiy Y.E., Dobush V.S., Bardanov A.I.* 2018 An algorithm for prediction of the dc link voltage of the vfd during voltage sags *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian*

Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018 763-767.
6. *Белицкий А.А., Шклярский Я.Э.* Оценка добавочных потерь мощности в электрических сетях с нелинейной и несимметричной нагрузкой / Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. № 7. С. 86-93.
7. *Скамьин А.Н.* Способы выявления источников высших гармоник в связанных системах электроснабжения промышленных предприятий / А.Н. Скамьин, Ю.В. Растворова // Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», 2018. С. 262-1-262-3.
8. *Шклярский Я.Э., Барданов А.И.* Определение напряжения звена постоянного тока частотного электропривода при провалах напряжения / Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2017. № 12-2. С. 447-456.
9. *Астахов Ю.Н.* Накопители энергии в электрических системах: Учеб. пособие для электроэнергет. спец. вузов / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, А.Г. Тер-Газарян. – М.: Высш. шк., 1989. – 159 с.
10. *Solovev S.V., Kryltcov S.B., Voytyuk I.N.* 2018 Static load characteristics consideration for determination of transmission line power capacity *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018* 803-806.
12. *Яковлева Э.В., Сизякова Е.В., Иванов П.В., Жуковский Ю.Л., Пудкова Т.В.* Анализ перспектив регионального развития интеллектуальных энергетических систем / Российский экономический интернет-журнал, 2018. № 2. С. 107.
13. *Savard C., Яковлева Э.В.* Развитие технологий накопления электрической энергии / Молодой ученый, 2017. № 50(184). С. 76-82.
14. *Добуш В.С., Бельский А.А.* Анализ влияния источников бесперебойного питания на качество электроэнергии в точке общего подключения потребителей / Промышленная энергетика, 2018. №6. С. 29-34.
15. *Марьенков С.А.* Гибридный накопитель электрической энергии для сетей с распределенной генерацией на основе возобновляемых источников электрической энергии / Международный научно-исследовательский журнал, 2017. № 02(56). Ч.3. С. 120-123.
16. *Бердников Р.Н.* Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / Р.Н. Бердников, В.Е. Фортов, Э.Е. Сон, К.К. Деньщиков, А.З. Жук, Ю.Г. Шакарян // Энергия единой сети, 2013. №1.
17. *Frolov, V.Ya., Ivanov, D.V.* Calculation of a plasma composition and its thermophysical properties in cases of maintaining or quenching of electric arcs // 2018 Journal of Physics: Conference Series, 1058(1), 012040.
18. *Frolov, V., Petrov, G., Yushin, B., (...), Churkin, I., Ivanov, D.* Research and development of plasma technologies of spraying of coatings, 18th Symposium on Physics of Switching Arc, FSO 2009, с. 162-165.
19. *Obraztsov, N.V., Frolov, V.Y.* A two-dimensional axisymmetric model of an AC arc // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, с. 430-432.
20. *Frolov, V.Y., Neelov, A.A., Zhiligotov, R.I., Bystrov, A.V.* Identification of the protection parameters of the local electrical network taking into account the detuning of the inrush current Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, с. 626-628.

УДК 621.362

БЕЛЬСКИЙ А.А.,
ГЛУХАНИЧ Д.Ю.,
ДОБУШ В.С.
Санкт-Петербургский горный университет

АВТОНОМНОЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК НЕФТИ

Аннотация. Предложено решение проблемы гарантированного автономного электроснабжения систем обнаружения утечек нефти в трубопроводах путем разработки электрогенерирующего комплекса на базе термоэлектрогенераторных элементов, отличающихся автономностью, энергонезависимостью, высоким сроком службы и отсутствием необходимости в частом обслуживании. В работе применены методы теории электрических цепей, систем электроснабжения электротехнических комплексов, математическое и имитационное моделирование, теория планирования эксперимента. Обоснован состав и параметрическая достаточность автономного комплекса на базе термоэлектрогенераторных элементов для электроснабжения систем обнаружения утечек нефти в трубопроводах.

Ключевые слова: автономный энергетический комплекс, термоэлектрический генератор, эффект Зеебека, система обнаружения утечек, трубопровод, нефтепровод, нефть.

BELSKIY A.A.,
GLUKHANICH D.YU.,
DOBUSH V.S.
Saint-Petersburg Mining University

AUTONOMOUS POWER SUPPLY TO REMOTE CONSUMERS OF OIL LEAK DETECTION SYSTEMS

Abstract. The proposed solution to the problem of guaranteed autonomous power supply of leak detection systems of oil by developing generating complex based on thermoelectric generator elements characterized by autonomy, energy independence and long service life. The work applied the methods of the theory of electrical circuits, mathematical and simulation modeling, the theory of experiment planning. The work substantiates the composition and parametric sufficiency of an autonomous complex based on thermoelectric generator elements for power supply of systems for detecting leakage of oil in pipelines.

Keywords. Autonomous power complex, thermoelectric generator, Seebeck effect, leak detection system, pipeline, oil pipeline, oil.

ВВЕДЕНИЕ

Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов, имеющие место на объектах нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, при транспорте этих продуктов наносят ощутимый вред экосистемам, приводят к негативным экономическим и социальным последствиям.

В связи с увеличением количества чрезвычайных ситуаций, которое обусловлено ростом добычи нефти, износом основных производственных фондов (в частности, трубопроводного транспорта), а также диверсионными актами на объектах нефтяной отрасли, участившимися в последнее время, негативное воздействие разливов нефти на

окружающую среду становится все более существенным. Экологические последствия при этом носят трудно учитываемый характер, поскольку нефтяное загрязнение нарушает многие естественные процессы и взаимосвязи, существенно изменяет условия обитания всех видов живых организмов и накапливается в биомассе.

В настоящее время общая протяженность магистральных нефтепроводов на территории России составляет более 55 тыс. км, а промысловых свыше 400 тыс. км, и эти цифры продолжают расти, так как наблюдается рост добычи нефти и нефтегазотранспортная система продолжает интенсивно развиваться [5]. Поэтому обеспечение безопасной и надежной эксплуатации нефтепроводов, в том числе и в арктическом регионе, представляет собой первостепенную задачу, для решения которой используются различные системы обнаружения утечек (СОУ) нефти, в том числе, основанные на методах постоянного контроля.

Одной из проблем СОУ нефти является то, что зачастую нефтепроводы находятся в труднодоступных местах, а рекомендуемая частота установки пунктов сбора данных — 1 датчик давления на 10-20 км трубопровода, поэтому возникают затруднения или вовсе становится невозможным обеспечить электрической энергией шкафы СОУ, датчики давления, расходомеры и другое оборудование, необходимое для стабильной работы систем.

Для решения проблемы электроснабжения систем обнаружения утечек нефти необходимо применять систему, которая будет отличаться своей автономностью, взрыво- и пожаробезопасностью, энергонезависимостью, высоким сроком службы и отсутствием необходимости в обслуживании.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК НЕФТИ

Одной из проблем систем обнаружения утечек нефти является то, что зачастую нефтепроводы находятся в удаленных и труднодоступных местах (арктическая зона, водная среда и т.д.), поэтому возникают затруднения или вовсе становится невозможным обеспечить электрической энергией шкафы СОУ, датчики давления, расходомеры и другое оборудование, необходимое для стабильной работы систем (рис. 1) [7, 8].

Рисунок 1 - Схема внешнего электроснабжения оборудования АСУ ТП

Сравнивая существующие способы электроснабжения СОУ: с помощью дизель-генераторных установок, от комплексов с возобновляемыми источниками энергии, от ЛЭП, можно сделать вывод, что всеми необходимыми качествами, не считая ЛЭП, обладает только разрабатываемый автономный комплекс на базе ТЭГ (табл. 1).

Выше сказанное также подтверждается результатами опроса, проведенного среди таких компаний, как ПАО «Газпром Нефть», ООО «РН-Юганскнефтегаз» и компаний, занимающихся разработкой систем обнаружения утечек нефти: ООО «Аргоси Аналитика», ООО «Электронные технологии и метрологические системы», ООО НПФ «ТОРИ», ООО «Комбит Инжиниринг», которые подтвердили наличие данной проблемы, а также проявили интерес к разрабатываемому электротехническому комплексу для автономного электроснабжения СОУ нефти.

Таблица 1.

Способы электроснабжения СОУ нефти

	Достоинства	Недостатки	Примечание
ТЭГ	Полная энерго-независимость	Снижение мощности до минимальной в летний период	Ограничение по мощности из-за роста площади конструкции. Срок службы 10 лет.
ЛЭП	Самая высокая надежность электроснабжения потребителей. Срок службы 30–50 лет.	Высокие капитальные затраты. Потери энергии.	Ограниченная протяженность линии для выбранного класса напряжения.
Дизельные генераторы	Автономное электро-снабжение	Трудность эксплуатации в холодных условиях. Требуется регулярное ТО. Срок службы от 4 до 20 тыс. моточасов.	Использование ДЭС только для питания СОУ не осуществляется, только параллельно с иным технологическим оборудованием.
Комплексы с испнием ВИЭ	Частичная энерго-независимость	Зависимость от погодных условий. Необходимость резерва в виде аккумуляторов.	Срок службы энерго-генерирующего комплекс 20 лет. Срок службы аккумуляторов 5–7 лет.

ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР (ТЭГ)

В качестве основного генерирующего элемента рассматривается ТЭГ, источником тепловой энергии для которого служит сама транспортируемая жидкость.

Установка термоэлектрогенераторных модулей на нефтепровод, температура которого свыше 40°С, позволяет достигнуть необходимой разности температур между горячей и холодной сторонами модулей для генерации электроэнергии. На рис. 2 представлен принцип выработки электроэнергии для питания систем обнаружения нефти. Термоэлектрогенератор наиболее эффективен в зимнее время года, когда средняя температура окружающей среды –20°С, а температура нефтепровода может достигать 60°С.

До настоящего времени существенным ограничением преимуществ термоэлектрического преобразования остается относительно низкий коэффициент эффективности преобразования теплового потока в электрическую энергию — от 3 до 8%. Однако в ситуации, когда для относительно небольших нагрузок невозможно или экономически нецелесообразно подвести централизованные линии электропередачи, ТЭГ становится незаменимым [10].

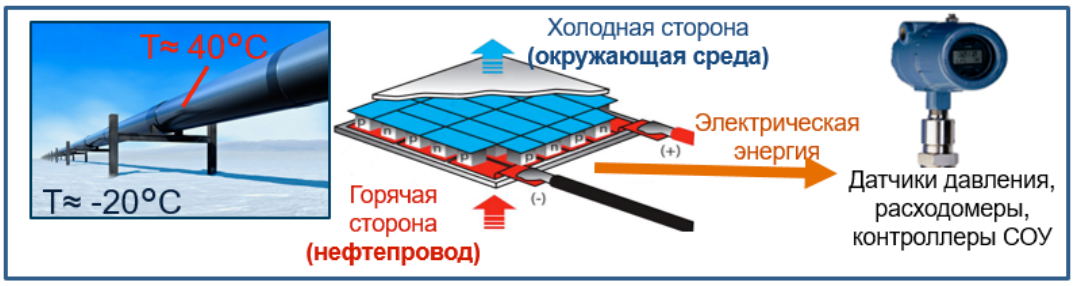


Рисунок 2 - Использование ТЭГ на трубопроводе

Зависимость вырабатываемой мощности одного модуля ТЭГ на примере ТГМ-199-1.4-0.8 от разности температур представлена на рис. 3.

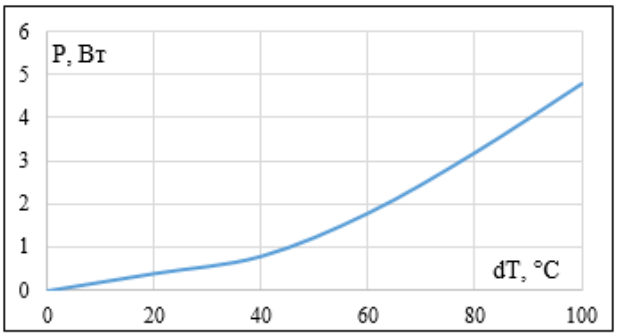


Рисунок 3 - Рабочая характеристика ТЭГ

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В результате проведённых экспериментов на разработанном имитационном стенде была получена ВАХ ТЭГ (рис. 4).

Полученная зависимость (ВАХ ТЭГ) говорит о линейности внутреннего сопротивления в широком диапазоне рабочих температур. Среднее значение $R_{вн} \approx 12$ Ом. Максимальная мощность на сопротивлении нагрузки, вырабатывается при равенстве сопротивлений (внутреннего и нагрузки).

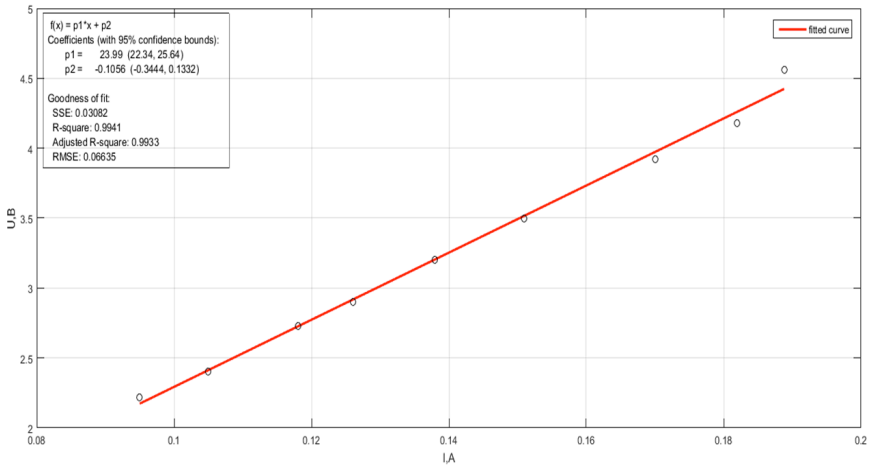


Рисунок 4 - ВАХ ТЭГ

Анализ зависимостей, полученных в ходе исследования работы модулей и отраженных на рис. 5, показывает, что термоэлектрогенераторный модуль работает во всех диапазонах температур с одинаковой эффективностью.

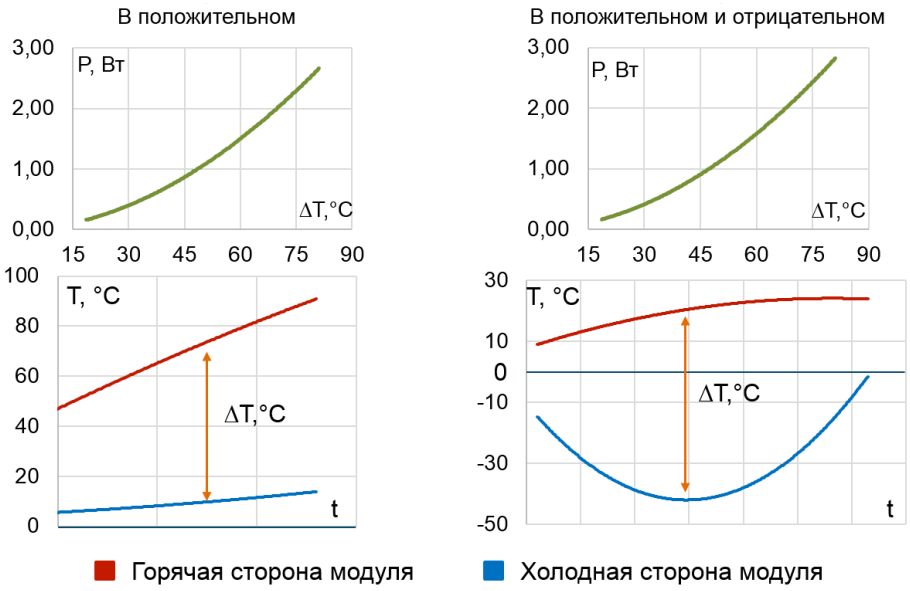


Рисунок 5 – Результаты обработки данных, полученных в ходе лабораторного опыта

Полученные результаты позволяет говорить о возможности применения данных модулей для автономного электроснабжения СОУ нефти в трубопроводе в различных климатических условиях.

В рамках данной работы был получен патент на изобретение №2682767 «Автономный пункт сбора данных для системы обнаружения утечек жидких углеводородов», приоритет изобретения от 05.06.2018 г.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 году». - М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2016. - 639 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». - М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2017. - 760 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». - М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2018. - 888 с.
4. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году». - М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2019. - 844 с.
5. *Владимиров В.А.* Разливы нефти: причины, масштабы, последствия. Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования, 2014. №1. С. 217–229.
6. *Хасенова Д.Ф.* Анализ методов обнаружения утечек, применяемых в параметрических СОУ. Молодежь и наука: сб. мат. науч.-технич. конф. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012.
7. Система обнаружения утечек и ударов для трубопроводов L.D.S. Техническая презентация.
URL: proco-france.com.
8. ЭТМС.СТО 7.2.1-030-2015. Общие технические требования. Система обнаружения утечек. - М., 2016. - 40 с.
9. *Булатов А.Ф.* Повышение эффективности автоматизированной системы обнаружения утечек из нефтепродуктопроводов на основе интеллектуальной технологий: автореф. дис. канд. тех. наук. Уфим. гос. авиац. тех. ун-т, Уфа, 2015.
10. *Шостаковский П., Городецкий А., Карки Д. и др.* Термоэлектрические источники альтернативного питания. Компоненты и технологии. 2010, №12. С. 131–138.

11. *Frolov, V.Y., Ivanov, D.V., Belsky, R.A.* Increasing of operation security and of breaking capacity of surge arresters. Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017, 7910861, c. 1520-1523.
12. *Frolov, V., Petrov, G., Yushin, B., (...), Churkin, I., Ivanov, D.* Research and development of plasma technologies of spraying of coatings, 18th Symposium on Physics of Switching Arc, FSO 2009, c. 162-165.
13. *Obraztsov, N.V., Frolov, V.Y.* A two-dimensional axisymmetric model of an AC arc // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, c. 430-432.
14. *Vostrov, K., Frolov, V., Safonov, E.* Development of current limiting device for short and autonomous networks // 22nd Symposium on Physics of Switching Arc, 2017-September, c. 182-185.
15. *Murashov, I., Frolov, V., Kadyrov, A.* Development of the arc plasma torch operation mathematical model for spheroidization of fine-dispersed powders // 2018 Journal of Physics: Conference Series, 1058(1), 012024.
16. *Obraztsov, N.V., Subbotin, D.I., Popov, V.E., Frolov, V.Y., Surov, A.V.* Modelling of heat-ing of plasma-chemical reactor in Comsol Multiphysics // 2018 Journal of Physics: Conference Series, 1038(1), 012137.

621.311.001.57

БЕЛЬСКИЙ Р.А.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

РАБОТА ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА, ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ОТКЛЮЧЕНИИ НЕЗАВИСИМЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Аннотация. В работе представлена физическая модель подстанции с параллельным подключением вакуумными выключателями независимых потребителей. Разработана имитационная модель, отражающая особенности работы подстанции. Произведена верификация результатов разработанной методики анализа переходных процессов.

Ключевые слова: перенапряжение; вакуумный выключатель; трансформаторная подстанция; моделирование.

BELSKY R.A.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

VACUUM CONTACTOR OPERATION, WITH PARALLEL CONNECTION OF INDEPENDENT CONSUMERS

Abstract. The paper presents a physical model of the substation with parallel connection of independent consumers with vacuum circuit breakers. A simulation model has been developed that reflects the features of the substation. The verification of the results of the developed methodology for the analysis of transients is carried out.

Keywords: overvoltage; vacuum circuit breaker; transformer substation; modeling.

Введение.

Для правильной постановки задачи был произведён анализ имеющихся источников по темам: вакуумные выключатели, ток среза, моделирование вакуумного выключателя, моделирование цепи и вакуумным выключателем, дуга в вакуумнос выключателе. Большинство статей были взяты из базы IEEE Xplore Digital Library и включены в базы Scopus и Web of Science.

Работы [1] и [2] полностью посвящена моделированию электрической дуги. Авторы [1] среди множества моделей, предлагают модель KEMA в качествен наиболее точной, а авторами [2] была создана модель вакуумного выключателя в виде «черного ящика». Данная модель показала высокую валидность и точность. Модель «черного ящика» показала себя более подходящей для вакуумного выключателя.

Моделированию переходных процессов в среде MATLAB посвящена статья [3]. Указано, что наиболее опасные перенапряжения генерируются в цепях с трансформаторами, электрическими машинами и реакторами. Основным источником перенапряжений рассматривается вакуумный выключатель, который и моделируется в данной статье. Рассматривается восстановление напряжения, повторный пробой, ток среза и вакуумная дуга (моделируемая как нелинейное сопротивление). Разработанная модель проверялась на примере защитного оборудования в шахтах, в частности на мощном конвейерном оборудовании.

Процессам, происходящим около нуля посвящена статья [4]. Поскольку именно срез тока является основной причиной перенапряжения. Авторы выделяют помимо «классического» постдугового состояния «позднее» постдуговое состояние, связанное с

термическими эффектами. Постдуговые токи связаны с повторными пробоями, но недостаточно исследованы причины некоторых режимов повторных пробоев.

Статья [5] посвящена отключению дуговой печи с помощью вакуумного выключателя. Перенапряжение на выключателях может превосходить на три порядка, а на клеммах трансформатора на 2,44 порядка и это может привнести к аварии и поломке вакуумного выключателя и разрушении изоляции трансформатора. Опыт показал, что при малой скорости восстановления диэлектрической прочности возможен повторный пробой.

На основе анализа представленных статей видно, что проблемы, связанные с влиянием параллельной коммутацией вакуумных дугогасительным камер при независимых потребителях, начали рассматриваться только в последние годы, причём наиболее распространённая форма исследований является компьютерное моделирование. Основной упор делается на исследование одиночного вакуумного выключателя, последовательной работе вакуумных камер, а также дуговых процессов в вакууме. Авторы не рассматривают возможность пробоя параллельного вакуумного выключателя при перенапряжении созданным первым выключателем. Поэтому целью данной работы является построение компьютерной модели работы нескольких вакуумных выключателей и их дальнейшая апробация на экспериментальной установке.

Метод.

Для проверки возможности пробоя ячейки вакуумного контактора при параллельной коммутации, был собран испытательный стенд, представленный на рис. 1–3. Оборудование, использованное в данном опыте: Пневмораспределитель РЭПВ-221; Пневмораспределитель РЭПВ-52; Пневмоцилиндр малогабаритный алюминиевый ПНЦ-Р; Контактор вакуумный (ЭТ);КВТ-1,14-2,5/ 63 У3, 220В, 1з+2р, нереверсивный, без реле; Плата Arduino Mega 2560; Твердотельное реле: 5V 2 Channel 240V AC Solid State Relay; Осциллограф OWON SDS6062.

Включение и отключение полюсов вакуумного контактора осуществляется с помощью пневматического привода, представленного на рис. 1 и рис. 3. Давление в двух цилиндрах регулируется с помощью трёх пневмораспределителей, которые получают воздух от компрессора. Пневмораспределители управляются твердотельным реле с помощью платы Arduino Mega 2560 (рис. 4). Опыт предполагает отправлять сигналы в диапазоне от микро- до миллисекунд, которые будут открывать и закрывать вакуумный контактор.

В качестве нагрузки, предполагается использовать термоэлектрический нагреватель на 20 кВт, а также, в качестве индуктивной нагрузки, дроссели, подключенные последовательно. Электрическая схема представлена на рис. 2. Предполагается что cosф будет равен 0.95 – опыт будет проходить на мало-индуктивной нагрузке. В качестве источника питания будет использован щит на 380 В и 100 А. Все полученные результаты будет сниматься на осциллограф OWON SDS6062.

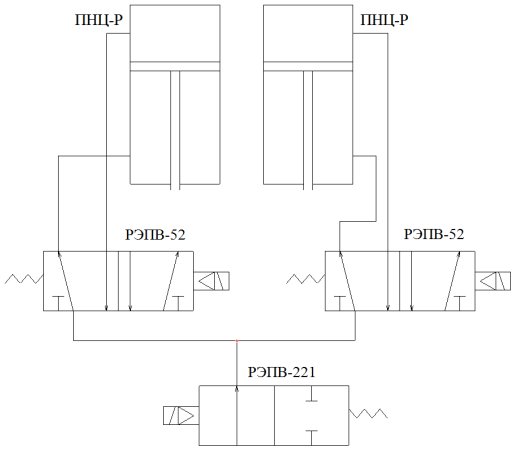


Рисунок 1 – Схема расположения пневмоэлементов

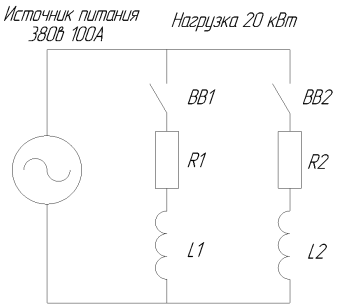


Рисунок 2 – Электрическая схема испытания

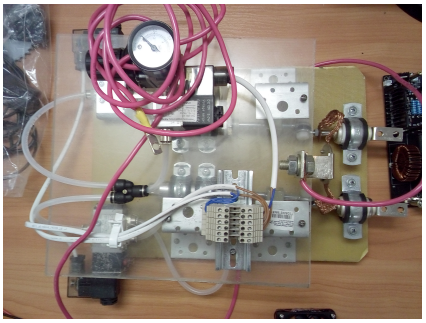


Рисунок 3 – Внешний вид пневматического привода испытательной установки

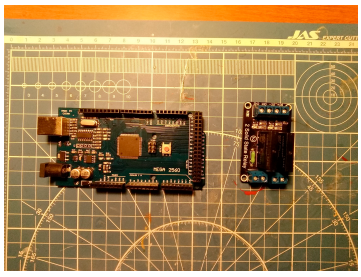


Рисунок 4 – Плата Arduino Mega 2560 и твердотельное реле

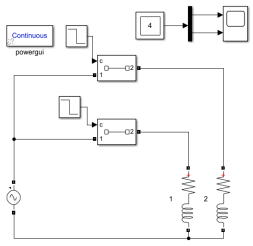


Рисунок 5 – Упрощённая модель отключения нескольких выключателей

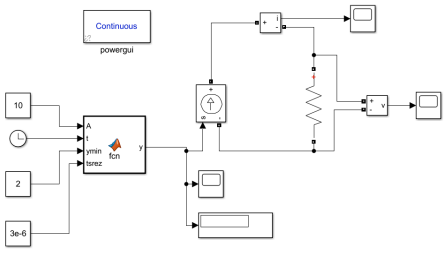


Рисунок 6 – Модель электрической дуги

Компьютерная модель.

Для проверки полученных данных была в среде MATLAB Simulink разработана компьютерная модель (рис. 5). Модель состоит из активно-индуктивной нагрузки, источника питания, нескольких выключателей и модели дуги. Отключение выключателя будет выполнено в виде математической функции (рис. 6). Срез тока будет представлен в виде линейной функции, ток снизится с двух ампер до нуля за 3 мкс.

На данный момент установка находится на стадии доработки. Результаты опытов будут сравнены с результатами, полученными в компьютерной модели. Несмотря на то что модель достаточно точно показывает процесс около нуля тока, модель является упрощённой: в модели не учитывались пост-дуговые процессы, которые могут оказать значительно влияние на возможность повторного пробоя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Parizad A., Baghaee H.R., Tavakoli A. & Jamali S.* 2009 Optimization of arc models parameters using genetic algorithm *International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS*.
2. *Abdulahovic T., Thiringer T., Reza M. & Breder H.* 2017 Vacuum Circuit-Breaker Parameter Calculation and Modelling for Power System Transient Studies *IEEE Transactions on Power Delivery*.
3. *Ivanchenko D.I., & Novozhylov N.G.* 2016 Vacuum breaker simulation for switching overvoltage study *10th International Conference - 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability, PQ 2016, Proceedings*
4. *Smeets R.P.P., & Van Der Linden W.A.* 2003 Current-zero measurements of vacuum circuit breakers interrupting short-line faults *IEEE Transactions on Plasma Science*.
5. *Guan Y., Tang Q., Liu W. & Xu G.* 2012 Overvoltage mechanism of switching off shunt reactors for 40.5 kV vacuum circuit breakers *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao / Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*.
6. *Kovalchuk M.S., Poddubniy D.A.* Ensuring the Reliable Operation of the Pumping Units by

Efficient State Diagnosis // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 224 (1), 012032. DOI: 10.1088/1755-1315/224/1/012032.
7. *Abramovich B.N., Sychev Y.A., Pelenev D.N.* Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 327(5). 052027. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052027.
8. *Bolshunova O.M., Korzhev A.A., Vatlina A.M., Kamyshyan A.M.* Determination of multicomponent media permittivity by high-frequency method // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 194, 062004. DOI: 10.1088/1755-1315/194/6/062004.
9. *Kostin V.N., Minakova T.E.* Protective and control relays as coal-mine power-supply ACS subsystem // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87, 032017. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032017.
10. *Shklyarskiy Y.E., Shklyarskiy A.Y., Zamyatin E.O*. Analysis of distortion-related electric power losses in aluminum industry // Tsvetnye Metally. 2019, vol. 4, pp. 84-91.
11. *Korolev N.A., Solovev S.V., Zhukovskiy Y.L.* Problems of diagnostics of asynchronous motor powered by an autonomous voltage inverter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 643, 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012022.
12. *Rastvorova, I.I., Belitskiy, A.A., Rastvorova, I.V*. Optimization of induction devices for aluminium casting to electromagnetic crystallizer // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018, 2018-January, pp. 758-760
13. *Kozjaruk A.E., Vasilev B.U., Shtop S.A., Serdukov N.A.* Currents in bearings of induction motors of electric drives with semiconductor converter // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives. 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341707.
15. *Lutonin A., Shklyarskiy A., Shklyarskiy Y.* Operation modes and control algorithms of anisotropic permanent magnet synchronous motor (IPMSM) // E3S Web of Conferences, 2019, 140, 10006.

УДК 621.387

БЫСТРОВ А.В.,
ФРОЛОВ В.Я.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНО-КОАКСИАЛЬНОГО ПЛАЗМОТРОНА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ

Аннотация. В работе рассмотрена конструкция принципиально нового плазмотрона с рекуперацией энергии. Представлены различные его конструкции. Данный плазмотрон предназначен для устройств плазменной технологии на основе импульсной энергетики. Проведены исследования влияния рекуперации энергии на производительность и энергоэффективность плазмотрона. Установлено, что перенос энергии в плазмотроне осуществляется двумя способами: первый – посредством распространения электромагнитной волны, энергия которой не принимает участия в получении целевого продукта, и тем самым снижает энергоэффективность плазмотрона; второй способ – посредством токов проводимости через плазменный столб, образующийся при достижении критического напряжения.

Ключевые слова: коаксиальный плазмотрон; импульсная энергетика; рекуперация энергии; неравновесная плазма; энергоэффективность плазмотрона.

BYSTROV A.V.,
FROLOV V.Y.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

DEVELOPMENT AND RESEACH OF A WAVEGUIDE-COAXIAL WITH ENERGY RECOVERY TO OBTAIN A NON-EQUILIBRIUM PLASMA

Abstract. The paper considers the design of a fundamentally new plasmatron with energy recovery. Its various designs are presented. This plasmatron is designed for plasma technology devices based on pulsed energy. Studies of the effect of energy recovery on the performance and energy efficiency of the plasmatron. It was established that energy transfer in the plasmatron is carried out in two ways: the first is through the propagation of an electromagnetic wave, whose energy does not participate in obtaining the target product, and thereby reduces the energy efficiency of the plasmatron; the second method is by means of conduction currents through the plasma column, which is formed when a critical voltage is reached.

Keywords: coaxial plasmatron; pulsed power; energy recovery; non-equilibrium plasma; energy efficiency of the plasmatron.

ВВЕДЕНИЕ

Одно из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ, которое названо в числе первых – энергоэффективность. В перечень критических технологий входит создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии. Устройства, построенные на основе импульсной энергетики, позволяют создавать энергоэффективные технологии. Импульсная энергетика в отличие от обычной энергетики с переменным или постоянным током предназначена для решения

других задач, она работает на принципиально другие нагрузки, о которых изложено ниже. Развитие этой энергетики потребовало создания специальных генераторов импульсов, электронных ключей, линии для передачи энергии, плазмотронов и т.д. Все устройства импульсной энергетики работают на иных физических принципах, чем в обычной энергетике. Отличие в том, что все эти устройства должны работать с однополярными импульсами большой мощности в наносекундном диапазоне времени [1, 2].

Традиционные генераторы используют микросекундые или миллисекундные длительности импульсов высокого напряжения. Для импульсной энергетики такие генераторы не подходят. Эта проблема решена с помощью дрейфового диода с резким восстановлением (ДДРВ) [3, 4], новый тип полупроводниковых размыкателей, которые разработаны в институте Иоффе для целей генерация наносекундных импульсов высокого напряжения. Относительно плазмотронов для устройств импульсной энергетики, никаких новых плазмотронов ни в России, ни за рубежом не разработано и не исследовано. В данной работе представлена первая попытка освещения проблем и решений, связанных с этим вопросом.

Цель данной работы – разработка плазмотрона для устройств импульсной энергетики различной конструкции с рекуперацией энергии. Выяснить, как влияет рекуперация энергии на энергоэффективность, производительность и другие свойства плазмотрона.

О НЕКОТОРЫХ НЕДОСТАТКАХ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ИМПУЛЬСНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Плазмотроны барьерного разряда хорошо зарекомендовали себя в микросекундом и миллисекундном диапазонах длительности импульсов высокого напряжения. Эти плазмотроны имеют достаточно много конструкций для различного применения и широко используются для многих электроразрядных технологий. Успешно применяются в коммерческих приложениях, включая производство озона, очистку воздуха от пыли или воды, накачка газовых лазеров, поверхностная плазменная очистка или активация поверхности и т.д.

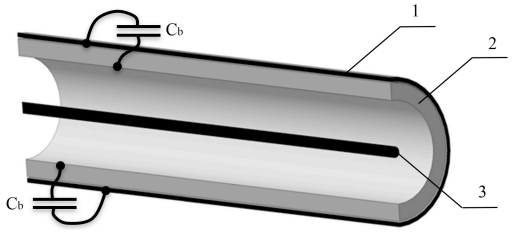


Рисунок 1 – Традиционный плазмотрон барьерного разряда:
1 - внешний электрод, 2 - диэлектрический барьер, 3 - внутренний электрод, C_b - барьерная емкость

В плазмотронах барьерного разряда из-за наличия диэлектрического барьера существует барьерная емкость C_b (рис. 1), между внешним электродом и внешней частью плазмы. Ток смещения в этой емкости является током в плазме. Таким образом, для увеличения плотности тока в плазме важна не общая барьерная емкость, а ее удельная величина. В традиционных плазмотронах удельная емкость барьера не велика, а значит и плотность тока в плазме ограничена. Плотность тока в плазме оказывает существенное влияние на производительность плазмотрона.

Так, как коаксиальный плазмотрон работает с наносекундными импульсами, то в нем возбуждаются электромагнитные волны с гармониками выше 1 Ггц [1]. Таким образом, существует еще один недостаток это СВЧ нагрев диэлектрического барьера. Этот факт приводит к дополнительным потерям и нежелательному нагреву плазмотрона,

снижая его энергоэффективность. Кроме того, в плазмотроне с барьерным разрядом имеется наличие двух диэлектриков (воздуха и диэлектрического барьера) с различными коэффициентами диэлектрической проницаемости. Наличие в плазмотроне двух различных диэлектриков приводит к неоднородному распространению электромагнитной волны [2, 5]. Неоднородности в плазмотроне, также приводят к потерям и снижению энергоэффективности.

ПРЕИМУЩЕСТВА ВОЛНОВОДНО-КОАКСИАЛЬНОГО ПЛАЗМОТРОНА

Распространение плазмы в волноводно-коаксиальном плазмотроне делится на две составляющие: первая составляющая волноводная и за ней сразу следует объемная плазма коаксиального волновода. Название данного плазмотрона (рис. 2) и исходит из описанного в этой работе принципа распространения плазменного столба.

На осциллограмме (рис. 3) представлена форма импульса на выходе генератора, питающего плазмотрон.

Рисунок 2 – Волноводно-коаксиальный плазмотрон для устройств импульсной энергетики:
1 - внешний электрод, 2 - внутренний электрод

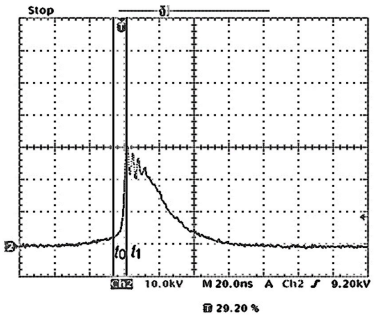


Рисунок 3 – Осциллограмма выходного импульса генератора

В момент t_0 в начале плазмотрона на разрядном промежутке напряжение U_{01} равно 10% от амплитудного значения. Через 5 нсек в момент t_1 напряжение на разрядном промежутке в начале плазмотрона достигнет точки бифуркации, а волновой фронт переместится к открытому концу плазмотрона со скоростью распространения электромагнитной волны в волноводе $V_в$. Это и есть волноводная составляющая, плазмы в волноводе еще не будет. В момент времени t_1 происходит пробой разрядного промежутка и образуется объемный плазменный фронт. Далее волновой и плазменный фронты перемещаются со скоростью $V_в$ в сторону открытого конца плазмотрона.

Длительность существования объемного плазменного столба в коаксиальном плазмотроне составляет всего несколько десятков наносекунд. Разрядный промежуток не перемыкается [1], так как контрагирование плазмы за это время не успевает произойти. В конце импульса плазма прекращает свое существование.

Волноводная составляющая, достигнув открытого конца плазмотрона, частично отражается и частично излучается в окружающее пространство [1, 2]. На этом плазменные процессы в волноводно-коаксиальном плазмотроне завершаются и повторяются с каждым последующим импульсом.

Различные конструкции волноводно-коаксиальных плазмотронов показаны на рис. 4. Различаются они по форме поперечного сечения. Их можно разделить на две группы. Первая группа (рис. 4, а, б, в, г) относиться к закрытым волноводно-коаксиальным плазмотронам, вторая группа рис. 4 д, е относиться к открытым плазмотронам. Причем вторую группу плазмотронов, можно называть волноводно-полосковыми плазмотронами.

Рисунок 4 – Различные конструкции по сечению волноводно-коаксиальных плазмотронов: а, б, в, г – закрытые, д, е - волноводно-полосковые открытые

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

В экспериментальной части данной работы выяснялось влияние рекуперации энергии волноводной составляющей на характеристики плазмотрона. Рекуперация энергии осуществлялась посредством безинерционного диода *D* (рис. 5) и накопительного конденсатора *C* (рис. 5), подключенных к центральному электроду, как показано на этом рисунке. В проводимом эксперименте не ставилась задача получения наилучших характеристик плазмотрона. Поэтому показания датчиков выводились в вольтах, а не в абсолютных значениях заданной величины. Для того, чтобы выяснить влияние рекуперации энергии на характеристики плазмотрона осуществлялось получения озона из воздуха при атмосферном давлении. При этом поддерживалась постоянной 2 м/с скорость потока через плазмотрон и величина энергии в импульсе 30 мДж.

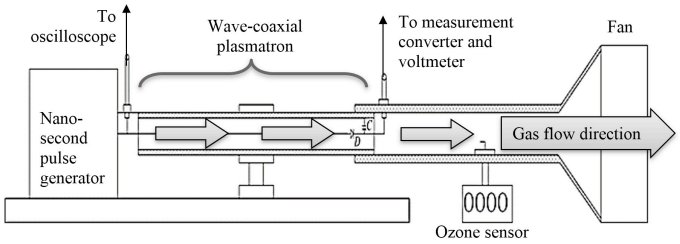


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки

Внешний электрод плазмотрона — это трубка из нержавеющей стали с внутренним диаметром 18 мм и длинной 350 мм. Внутренний электрод из нержавеющей проволоки диаметром 0,5 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе работы по данной тематике, получены экспериментальные данные о влиянии рекуперации энергии в плазмотроне на его характеристики. Все экспериментальные данные сведены в табл. 1. На основе полученных экспериментальных данных невозможно получить количественную связь характеристик плазмотрона, но эта задача в работе и не предусматривалась. Но очень хорошо просматривается качественная связь параметров плазмотрона. Из таблицы видно, что на любых режимах работы генератора рекуперация работает пропорционально. А также уровень электромагнитного излучения резко падает при работе с рекуперацией энергии.

Таблица 1.

Результаты исследования волноводно-коаксиального плазмотрона

Генератор	Частота следования импульсов 1000 Гц				Частота следования импульсов 2000 Гц			
Плазмотрон	Без рекуперации энергии		С рекуперацией энергии		Без рекуперации энергии		С рекуперацией энергии	
Содержание озона, В	2,25	2,24	2,14	2,13	1,81	1,82	1,78	1,77
	2,24	2,24	2,13	2,12	1,83	1,81	1,78	1,77
Потребляемый ток, мА	37,5	37,0	30,0	30,1	73,5	74,0	62,3	61,3
	37,1	37,4	30,2	30,1	73,6	73,8	61,2	62,0
Уровень ЭМ излучения, В/м	152	171	23	25	180	185	24	28
	168	166	27	22	187	188	30	29

В ходе экспериментальных работ установлено, что в исследуемом плазмотроне, несмотря на отсутствие диэлектрического барьера контрагирование разряда не происходило. Свечение плазменного столба в плазмотроне можно было наблюдать только в полной темноте, так как светился он темно-фиолетовым светом. Это означает, что энергия электронов достаточно большая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный волноводно-коаксиальный плазмотрон с рекуперацией энергии имеет простую конструкцию и способен утилизировать энергию волноводной составляющей. Данный плазмотрон способен работать только с устройствами импульсной энергетики и не пригоден для работы в микросекундном и милисекундном диапазонах высоковольтных импульсов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. - М.: Наука, 2004. - С. 704.
2. *Bystrov A. and Lantsev D.* 2019 Pulse generator of a polygonal design with a high rate of voltage *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 643 012073.
3. *Korotkov S.V., Smorodinov V.V., Aristov Yu.V., Bystrov A.V., Zhmodikov A.L., Korotkov D.A.* 2019 Semiconductor generator of high voltage nanosecond pulses for plasma technologies *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 643 012081.
4. *Bystrov A., Vostrov K., Frolov V., and Bistrov A.* 2019 The method of processing the droplet-air flow by non-equilibrium plasma *E3S Web Conf.* 140 10004
5. *Bystrov A., Neelov A.* 2019 The method of calculating the setpoint of the overcurrent protection with the function of the detuning from inrush currents for a circuit breaker on the basis of the electronic trip unit *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 643 012079.
6. *Kovalchuk M.S., Poddubniy D.A.* Ensuring the Reliable Operation of the Pumping Units by Efficient State Diagnosis // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 224 (1), 012032. DOI: 10.1088/1755-1315/224/1/012032.
7. *Abramovich B.N., Sychev Y.A., Pelenev D.N.* Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 327(5). 052027. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052027.
8. *Bolshunova O.M., Korzhev A.A., Vatlina A.M., Kamyshyan A.M.* Determination of multicomponent media permittivity by high-frequency method // IOP Conference Series: Earth

and Environmental Science. 2018, vol. 194, 062004. DOI: 10.1088/1755-1315/194/6/062004.
9. *Kostin V.N., Minakova T.E.* Protective and control relays as coal-mine power-supply ACS subsystem // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87, 032017. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032017.
10. *Shklyarskiy Y.E., Shklyarskiy A.Y., Zamyatin E.O.* Analysis of distortion-related electric power losses in aluminum industry // Tsvetnye Metally. 2019, vol. 4, pp. 84-91.
11. *Veprikov A., Abramovich B.* Prospects for IGBT application in electrical power converters for industrial high-current DC loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 560, 012131. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012131.
12. *Korolev N.A., Solovev S.V., Zhukovskiy Y.L.* Problems of diagnostics of asynchronous motor powered by an autonomous voltage inverter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 643, 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012022.
13. *Rastvorova, I.I., Belitskiy, A.A., Rastvorova, I.V.* Optimization of induction devices for aluminium casting to electromagnetic crystallizer // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018, 2018-January, pp. 758-760

УДК 62.8

ВОЛКОВ А.Н.,
ИЛЬИНЫХ И.В.,
КОРНИЛОВА А.А.,
МАЦКО О.Н.,
СЕРИКОВА Е.А.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ РОБОТА

Аннотация. В работе приводятся результаты оптимизации закона движения позиционных приводов промышленных роботов и другого технологического оборудования с целью энергосбережения и снижения мгновенной мощности. Положительный эффект достигается за счёт выбора рациональных параметров законов движения приводов. Анализ эффективности такой оптимизации произведен для трапецеидальных законов движения обеих координат.В качестве критерия оптимизации выбраны суммарная пиковая мощностьобоих приводов и общее энергопотребление за один цикл работы.Предложенные математические модели и алгоритмы управления приводами позволяют оценить эффективность оптимизации при различных нагрузках и могут быть использованы при проектировании нового оборудования и модернизации существующих машин.

Ключевые слова: позиционные приводы, оптимизация законов движения, энергосбережение, мгновенная мощность, математические модели, алгоритмы управления приводами.

VOLKOV A.N.,
ILINYKH I.V.,
KORNILOVA A.A.,
MATSKO O.N.,
SERIKOVA E.A.
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

OPTIMIZATION OF ALGORITHMS OF POSITIONAL CONTROL BYDRIVES ROBOT

Abstract. The paper presents the results of optimization of the law of motion of positional drives of industrial robots and other technological equipment with the aim of energy saving and reducing instantaneous power. The positive effect is achieved by choosing the rational parameters of the laws of motion of the drives. An analysis of the effectiveness of such optimization is performed for the trapezoidal laws of motion of both coordinates. The total peak power of both drives and the total power consumption for one operation cycle are selected as the optimization criterion. The proposed mathematical models and the drive control algorithms allow us to evaluate the efficiency of the optimization at various loads and can be used in the design of new equipment and the modernization of existing machines.

Keywords: positional drives, optimization of the laws of motion, energy saving, instantaneous power, mathematical models, drive control algorithms.

В настоящее время в промышленности применяется большое количество систем, в которых рабочий орган перемещается в декартовых координатах. Это могут бытьпортальные промышленные роботы, штабелеры, мостовые краны и прочее оборудование, используемое в машиностроении, горнодобывающей и других отраслях народного хозяйства.

Целью работы является энергосбережениеи снижение мгновенной мощности. Последнее обстоятельство во многих случаях позволяет уменьшить типоразмеры мотора и преобразователя, а, следовательно, и массогабаритные характеристики оборудования. Известно исследование, где перегрузки сети снижаются путем выравнивания токовдвигателей [1]. Другим способом снижения расхода энергии является оптимизация траектории движения [2], которая позволяет снизить энергопотребление на 13%. В [3] обобщается опыт использования частотных преобразователей в грузоподъёмных кранах. Все эти подходы позволяют лишь улучшить показатели существующих систем. Первичным фактором, определяющим энергопотребление и мгновенную мощность является закон движения. Достижения мехатроники позволяют реализовать практически любые законы движения, достаточно только их синтезировать таким образом, чтобы обеспечить минимальные энергопотребление и мгновенную мощность. В представленной работе выбран наиболее распространенный закон движения, при котором график скорости имеет форму равнобедренной трапеции, а искомыми параметрами являются времена разгона и торможения для каждого привода.

На рис. 1 показана схема исследуемого устройства.

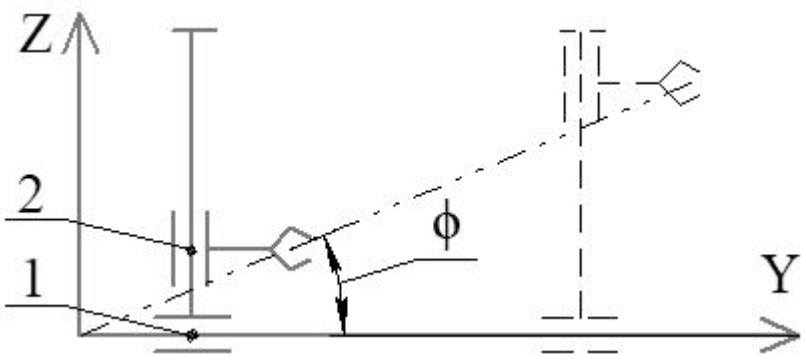


Рисунок 1 – Схема устройства

Степень подвижности 1 осуществляет перемещение в горизонтальном направлении, 2 обеспечивает движение в вертикальном направлении, угол φ показывает направление перемещения рабочего органа.

Уменьшение максимального значения мгновенной мощности происходит за счет смещения во времени окончания этапов разгоны на двух приводах. Скорость $\dot{\rho}(\alpha,\zeta)$ и ускорение $\ddot{\rho}(\alpha,\zeta)$ при выбранном законе движения имеют вид:

$$\ddot{\rho}(\alpha,\zeta)=\begin{cases}\dfrac{1}{\zeta(1-\zeta)}, & 0\le\alpha\le\zeta\\ 0, & \zeta<\alpha\le 1-\zeta\\ \dfrac{1}{\zeta(1-\zeta)}, & 1-\zeta<\alpha\le 1\end{cases},\qquad \dot{\rho}(\alpha,\zeta)=\begin{cases}\dfrac{\alpha}{\zeta(1-\zeta)}, & 0\le\alpha\le\zeta\\ \dfrac{1}{1-\zeta}, & \zeta<\alpha\le 1-\zeta\\ \dfrac{1-\alpha}{\zeta(1-\zeta)}, & 1-\zeta<\alpha\le 1\end{cases},$$

где $\rho(\alpha,\zeta) = s/s_0$, s – перемещение, s_0 – величина хода, $\alpha = t/T$, t – текущее время, $= \tau/T$ – относительное время разгона, τ – время разгона, $\dot{\rho}(\alpha,\zeta) = vT/s_0$, v – скорость, $\ddot{\rho}(\alpha,\zeta) = aT^2/s_0$, a - ускорение.

В [4] показано, что что при ζ = 1/3 имеет место минимальное значение максимальной мгновенной мощности, однако при одновременной работе двух приводов в конце разгона мгновенная мощность будет максимальна. Для случая, когда масса перемещающихся частей по степени подвижности 2 составляет 60% от общей массы подвижных частей машины и угол φ = π/4, зависимости мгновенной мощности от времени и максимальной мгновенной мощности от времени разгона торможения по степени подвижности 2 представлены на рис. 2 и 3. Время разгона по степени подвижности 1 принято равным 0,48. Нагрузка в данном примере принята инерционной (портальный робот или кран перемещающие груз в горизонтальной плоскости). Последний параметр определен по специальной методике и обеспечивает достижения абсолютного минимума мгновенной мощности.

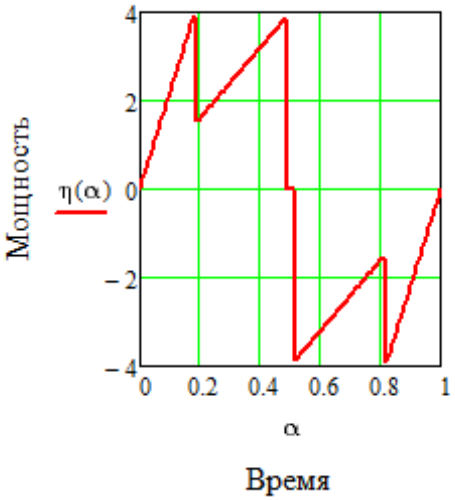


Рисунок 2 - Зависимость мгновенной мощности от времени

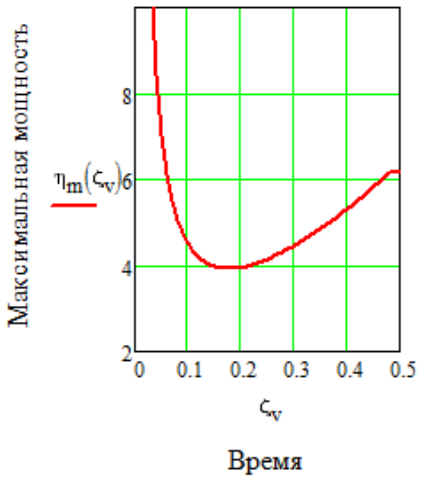


Рисунок 3 - Зависимость максимальной мгновенной мощности от времени

Первый пик мощности на рис. 1 соответствует моменту завершения разгона второго привода α = ζ_v = 0.18, а второй пик – завершению разгона первого двигателя α = ζ = 0.48 (на рис. 4 представлена зависимость энергопотребления от времени разгона (торможения), а на рис. 5 – зависимость максимальной мгновенной мощности от энергозатрат.

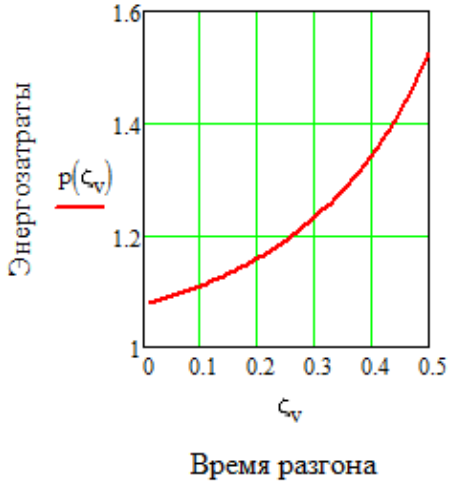


Рисунок 4 - Зависимость энергопотребления от времени разгона (торможения)

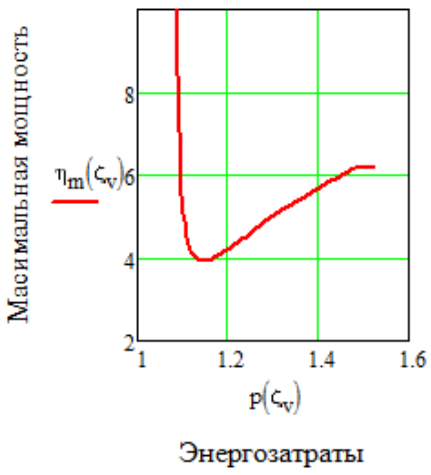


Рисунок 5 - Зависимость максимальной мгновенной мощности от энергозатрат

Анализ графика на рис. 4 показывает, что при увеличении времени разгона второго привода относительно оптимального $\zeta_v = 0.18$ происходит одновременное увеличение энергозатрат и мгновенной мощности. Эффективность оптимизации на этом участке (относительное максимальное увеличение мощностии энергозатрат при переходе от оптимальных значений времен разгона к максимальным) для мгновенной мощности составляет 63%, а для энергопотребления 39%. При уменьшении времен разгона по сравнению с оптимальными увеличение мощности может быть бесконечно большим, аэнергозатраты уменьшаются всего на 6%.

Таким образом оптимизация законов движения позиционного привода является эффективным средством энергосбережения, снижения фактической потребляемой мощности, уменьшения массогабаритных характеристик оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Егоров В.Ф., Егоров С.В.* Динамические режимы многодвигательных электрических систем / Омский научный вестник. – Омск: ИздательствоОмГТУ, 2010. № 1. С. 80–84.
2. *Ying He, Iangping Mei, Zhiwei Fang, Fan Zhang, Yanqin Zhao* 2018 Minimum Energy Trajectory Optimization for Driving Systems of Palletizing Robot Joints *Hindawi Mathematical Problems in Engineering* Volume, Article ID 7247093, 26 p.
3. *Попов Е.В., Онищенко Г.Б.* Частотно-регулируемый электропривод механизмов грузоподъёмных кранов / Известия ТулГУ. Технические науки в 5 ч., 2010. Вып. 3. Ч. 2. С. 179-184.
4. *Волков А.Н., Андреев И.Д., Мацко О.Н., Мосалова А.В.* Пути понижения установленной мощности мехатронных модулей с цикловым приводом / Неделя науки СПбПУ. – СПб.: издательство СПбПУ, 2017. - С. 30–32.

УДК 621.3

ВОСТРОВ К.И.,
МУРАШОВ Ю.В.
Санкт-Петербургский Политехнический
Университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ ШИМ-СИГНАЛА

Аннотация. В статье рассматривается принципиальная схема, а также лабораторная установка, предназначенная для тестирования различных методов формирования ШИМ-сигнала, предназначенного для управления электроприводом. Установка построена на базе микроконтроллера Arduino, с возможностью генерирования ШИМ-сигналов на выходе. Помимо того, что регулирование основных параметров выходного сигнала возможно программными средствами, выходной сигнал также преобразуется аналоговыми схемами, выполненными, в частности, на операционных усилителях. Таким образом, возможно тестирование различных модификаций классического метода генерации ШИМ, а также генерация сигналов с использованием вновь созданных алгоритмов. В качестве примера приводится сборка, позволяющая протестировать бессинфазную схему управления, представленную авторами ранее.

Ключевые слова: контроль; управление; ШИМ-модуляция.

VOSTROV K.,
MURASHOV Y.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

DEVELOPMENT OF THE SETUP FOR TESTING VARIOUS PRINCIPLES OF PWM SIGNAL FORMATION

Abstract. The work provides a circuit diagram diagram, as well as a laboratory setup, designed to test various methods for generating a PWM signal for an electric drive control. The setup is based on the Arduino microcontroller, with has the possibility of generating PWM signals at the output. Further, the output signals can be processed, in particular, by analogue circuits based on operational amplifiers. Thus, it is possible to test various modifications of the algorithms.

Keywords: control, PWM-modulation.

Разработка различных алгоритмов управления для систем электропривода ведётся непрерывно. Различные алгоритмы управления позволяют оптимизировать систему электропривода под различные задачи, увеличить эффективность и надёжность. В частности, внедрение нестандартных алгоритмов управления полупроводниковыми ключами ШИМ-инвертора является одним из вариантов в борьбе с паразитными токами в электрических машинах [1, 2].

Очевидно, что пред внедрением в производство, предлагаемые алгоритмы управления должны быть протестированы как в компьютерным моделях, так и на физических прототипах. Прототипирование с использованием промышленных частотных преобразователей может быть затруднительно в связи с их высокой стоимостью, сложностью конструкции и зачастую невозможности модификации пользователем [3].

В данной статье рассматривается альтернативный вариант создания установки, способной генерировать различные сигналы, основанные на принципе ШИМ и

представляющие различные комбинации сигналов. В качестве примера будет рассмотрена сборка схемы для тестирования бессинфазного алгоритма управления двухуровневым инвертором, представленного авторами ранее.

В предлагаемой схеме управления, ШИМ-сигналы, формирующие синусоидальное напряжение, попарно вычитаются и результирующий сигнал должен быть подан на затворы ключей.

В качестве основы тестовой установки, предполагаемой к использованию для создания такого сигнала, предлагается использовать микроконтроллер на базе Arduino. Такие микроконтроллеры имеют достаточное количество выводов как постоянного напряжения, так и выводов, способных генерировать ШИМ-сигнал частотой 488 Гц [5]. Таких параметров вполне достаточно для тестирования большинства алгоритмов.

Преобразование сигналов возможно производить в коде микроконтроллера (то есть программными средствами), либо посредством внешних аналоговых и цифровых устройств. В рассматриваемом примере сигналы от соседних фаз предполагается вычитать друг из друга. Таким образом, тестовая сборка будет включать в себя вычитатели сигналов, построенные на операционных усилителях. Принципиальная электрическая схема вычитателя сигналов представлена на рис. 1 [6], а схема всей установки представлена на рис. 2.

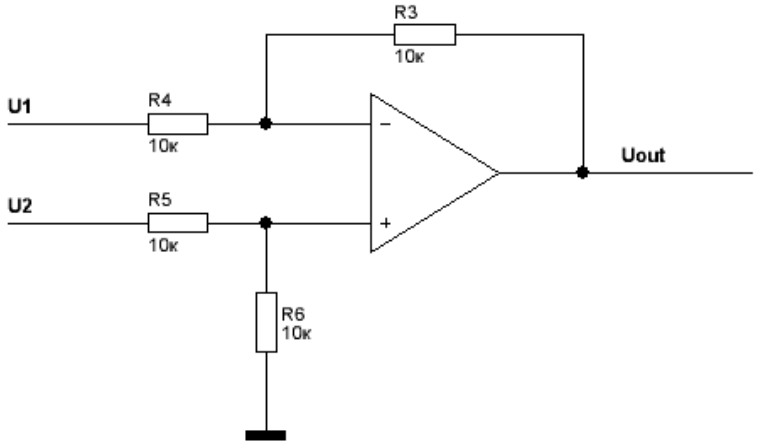


Рисунок 1 – Схема вычитателя сигналов на операционном усилителе

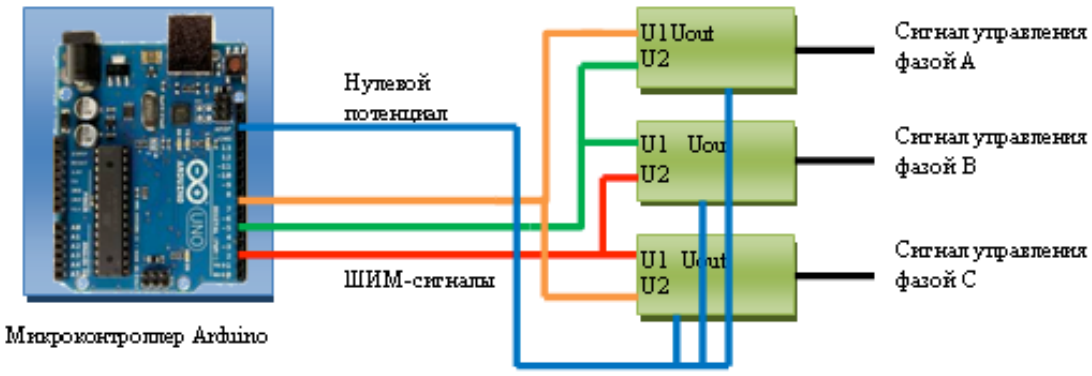


Рисунок 2 – Блок-схема тестовой установки

Представленная схема позволит протестировать предлагаемый алгоритм управления, проанализировав полученный модифицированный сигнал управления на осциллографе. Помимо этого, при подключении силовых полупроводниковых ключей данная схема может быть использована для управления тестовым электроприводом, заменяя собой промышленный частотный преобразователь.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tallam R.M., Kerkman R.J., Leggate D.and Lukaszewski R.A.* 2009 Common-mode voltage reduction PWM algorithm for AC drives *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA* 3660-3667.
2. *Srinivasan P., Venugopal Reddy B.and Somasekhar V.T.* 2010 PWM switching strategy for the elimination of common mode voltage of a two-level inverter drive with an open-end winding induction motor configuration *Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India, New Delhi* 1-6.
3. Ремонт и продажа частотных преобразователей, сварочных инверторов, полуавтоматов, плазморезов, УПП, усилителей, частотников, ЧПУ, стабилизаторов, блоков управления и шкафов автоматики.:
https://krsk.au.ru/4935474/
4. Адаптивная прошивка частотных преобразователей ABB ACS880 – СЗЭМО Инвертор:
https://szemo-in.ru/referens/adaptivnaya-proshivka-chastotnykh-preobrazovateley-abb-acs880/
5. Урок 37. Широтно-импульсная модуляция в Ардуино. – ОБОРУДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ:
http://mypractic.ru/urok-37-shirotno-impulsnaya-modulyaciya-v-arduino.html
6. Операционный усилитель – Электроника для всех:
7. *Abramovich B.N., Bogdanov I.A., Kopteva A.V., Malarev V.I.* The system of trigeneration with binary cycle for use as an energy source for gas fuel. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 643. 012092. doi: 10.1088/1757-899X/643/1/012092.
8. *Skamyin A.N., Dobush V.S.* Analysis of nonlinear load influence on operation of compensating devices // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol.
9. *Voytyuk I.N., Zamyatina E.N., Zamyatin E.O.* Increasing the energy efficiency of an enterprise by point compensating of power quality distortions. Proceedings of the International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019).
10. *Ustinov D.A.* increase of dynamic stability of alternating current electric drives at short-term violations of oilfield power supply // 12th International Scientific and Technical Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2019, 8601457. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601457.
11. *Turysheva A.V., Baburin S.V.* Justification of power supply system's structure of oil and gas facilities using backup energy sources with associated petroleum gas as the energy carrier // International Journal of Applied Engineering Research. 2016, vol. 11(1), pp. 749-755.
12. *Gerra, D.D., Iakovleva, E.V.* Sun tracking system for photovoltaic batteries in climatic conditions of the Republic of Cuba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 643(1), 012155. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914004007.
13. *Chmilenko, F.V., Rastvorova, I.I.* Improvement of quality of aluminum ingots at electromagnetic processing // Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1118(1), 012030.
14. *Lutonin, A., Shklyarskiy, A., Shklyarskiy, Y.* Operation modes and control algorithms of anisotropic permanent magnet synchronous motor (IPMSM) // E3S Web of Conferences, 2019, 140, 10006.

УДК 621.3

ВОСТРОВ К.И.
Санкт-Петербургский Политехнический
Университет Петра Великого

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА СЕРДЕЧНИКА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТОКООГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОКООГРАНИЧЕНИЯ

Аннотация.Данная работа направлена на оптимизацию параметров трансформаторно-резонансных токоограничивающих устройств. Такие устройства предназначены для значительного снижения тока короткого замыкания в сетях критически малым общим импедансом. Эффективность токоограгичения таких устройств зависит от многих факторов, и выбор материала сердечника играет одну из основных ролей в работоспособности всей системы. В данной работе поднимается вопрос о выборе материала сердечника токоограничивающего устройства. На основе схемотехнической модели, проведена оценка эффективности токоограничения при использовании различных материалов и сделаны выводы о применимости предложенных материалов при изготовлении сердечника токоограничивающего устройства.

Ключевые слова: токоограничение; короткое замыкание; магнитная проницаемость.

VOSTROV K.I.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE TRANSFORMER-BASED CURRENT-LIMITING DEVICE'S CORE MATERIAL ON THE CURRENT LIMITING EFFICIENCY

Abstract. This work is aimed to optimize the parameters of transformer-resonant-based current-limiting devices. Such devices are designed to significantly reduce the short circuit current in networks with a critically low total impedance. The current efficiency of such devices depends on many factors, and the proper choice of magnetic core material plays important role in the operability of the entire system. This paper raises the question of choosing the core material of a current-limiting device. Based on the circuit model, the current limiting efficiency is evaluated using various materials, and conclusions are drawn on the applicability of the proposed materials.

Keywords: current limitation; short circuit; magnetic permeability.

Введение.

В целях обеспечения безопасности и сохранности оборудования, при построении любых электрических сетей и систем распределения электроэнергии в обязательном порядке используются устройства и подсистемы, предназначенные для автоматичекого отключения потребителя и линии передачи при превышении максимального допустимого тока. Однако, когда речь идёт защите коротких линий передачи, малых сетей и автономных систем, требуется учитывать специфику работы таких сетей. Основной особенностью таких сетей является крайне малое расстояние между источником электроэнергии и потребителем. Малая длина линии передачи имеет, как следствие, крайне малое сопротивление. Таким образом, в случае короткого замыкания в такой линии передачи значение тока короткого замыкания может достигать нетипично высоких

значений. Задача аварийного отключения значительно осложняется тем фактом, что токи короткого замыкания в упомянутых сетях могут превышать отключающую способность автоматических выключателей, производимых в настоящее время.

Таким образом, отключение сверхвысоких значений токов корокого замыкания, имеющих место при наступлении аварийных событий в непосредственной близости от источника, либо в коротких и автономных электрических сетях, представляет непростую задачу и требует нетривиальных решений. Применение окоограничивающих устройств последовательно с автоматическим выключателем может решить данную задачу. Если при наступлении короткого замыкания токоограничивающее устройство предотвратит рост тока выше отключающей спопобности выключателя, то короткое замыкание может быть успешно отключено. В противном случае, невозможность отключения короткого замыкания создаёт опасность выходя из строя всех электрических устройств в этой системе, а так же опасность для людей и всех близлежащих объектов. Таким образом, наличие эффективного токоограничивающего устройства является критически важным условием для работы коротких и автономных электрических сетей большой мощности.

Описание устройства и модели.

Конструкция токоограничивающего устройства, представленного в [1], является перспективной и рациональной. Однако, для достижения необходимых параметров токоограничения, требуется верный выбор материалов и применение оптимальных параметров конструкции. В качестве референтных параметров примем следующте величины. Максимальный ток, который соответствует отключающей предельной способности современных автоматических выключателей в исключительных случаях может достигать 63 кА [2]. Однако, для многократного и гарантированного отключения, а так же с целью использования по возможности более конструктивно простогои доступного оборудования, максимальный ток короткого замыкания в цепи следует снизить хотя бы в несколько раз. В данной работе будем оценивать эффективность токоограничения по достижению током короткого замыкания значения 1000 А. Время, в течении которого необходимо не превышать максимальный ток, соответствующее времени отключения короткого замыкания выключателем – не менее 30 мс [3, 4].

Для оценки влияния конструктивных параметров на эффективность токоограничения была разработана эквивалениная схема токооораничивающего устройства. Если рассмотреть токоограничивающее устройство, описанное в [1], в простейшем исполнении, то есть как двухобмоточный трансформатор с равным числом обмоток на первичной и вторичной стороне, то схема замещения в этом частном случае, представляет собой многовитковый индуктор, подключённый к источнику питания (рис.1). В данной работе моделируется автономная система с источником переменного напряжения 30 кВ. Последовательно включённый резистор моделирует незначительное сопротивление источника питания,линии передачи, и собственно токоограничивающего устройства.Эта схема была реализована в среде Simulink, где токоограничивающее устройство было смоделировано как многовитковый трансформатор. Путём изменения параметров данного трансформатора, была сделана оценка возможностей токоограничивающего устройства при использовании различных материалов сердечника, а так же с различным числом витков на вторичной обмотке.

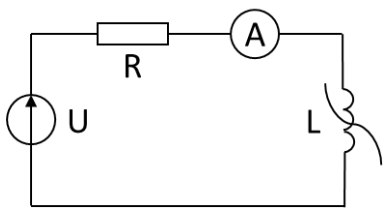


Рисунок 1 – Упрощённая эквивалентная схема токоограничивающего устройства

Проведение расчёта и результаты.

При проведении моделирования предполагается, что токоограничивающее устройство уже перешло из рабочего режима в аварийный и находится в режиме ограничения тока. Таким образом, на ввод схемы, изображённой на рис. 1., сразу подаётся полное напряжени сети и оценивается скорость нарастания тока в зависимости от применяемых параметров.

В ходе работы было исследовано влияние применения различных материалов сердечника индуктора, а так жевлияние числа обмоток индуктора.

В качестве материалов сердечника были рассмотрены: электротехническая сталь 3114, сплав Fe-Co 84КХСР а так женанокристаллический сплав с высокой магнитной проницаемостью. Кривые намагничивния рассмотренных материалов представлены на рис. 2.

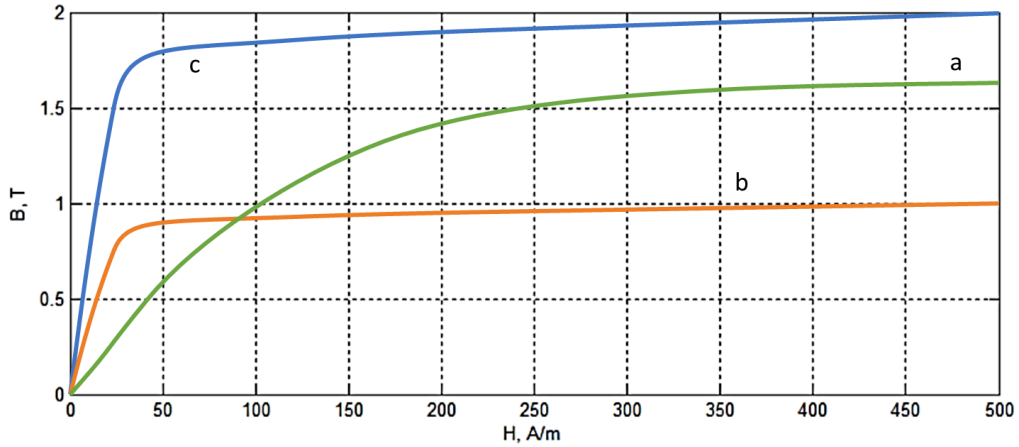


Рисунок 2 – Кривые намагничивания расссатривемых магнитных материалов:
a - электротехническая сталь 3114, b - сплав Fe-Co 84КХСР, c -нанокристаллический сплав с высокой магнитной проницаемостью

Эффеткивностьтокоограничения была оценена по времени, закоторое мгновенное значение тока достигает 1000 А. Рис. 3 показывает время, необходимое для нарастания тока для индукторов, выполненных из различных материалов, и имеющих обмотки, состоящие из 1, 10 и 100 витков.

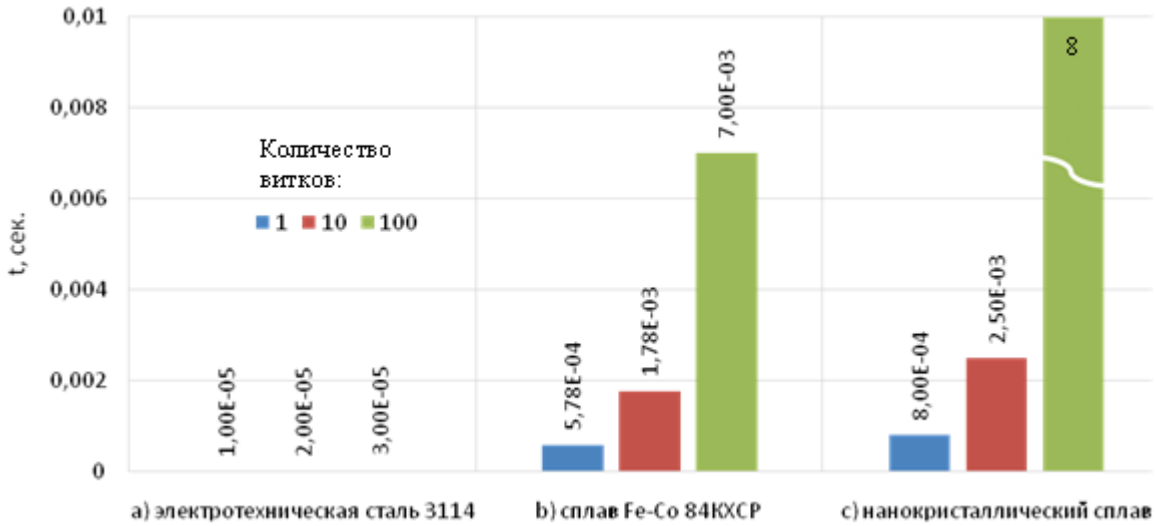


Рисунок 3 – Время нарастания тока в цепи до 1 кА при использовании токоограничивающего индуктора с сердечником, выполненном из различных материалов и с различным числом витков

Вывод.

На основе полученных данных, можно сделать вывод, что для использования в токоограничивающих устройствах, принцип действия которых основан на введении в цепь дополнительноо реактивного индуктивного сопротивления, наиболее оптимальными решениями будут конструкции, имеющие сердечник из наиболее магнитомягкого материала с высоким коэффициентом магнитной проницаемости, а так же большое число витков индуктора.

Анализируя количественно полученный результат, следует заключить, что использование электротехнической стали типа 3114 в принципе не целесообразно в токоограничивающих индукторах. Использование железно-кобальтового сплава возможно, особенно в системах с более низким напряжением, однако его возможности сильно ограничены, и дополнительная оптимизация геометрии сердечника индуктора должна быть проведена в каждом конкретном случае. В рассмотреном случае, когда напряжение источника питания составляло 30 кВ, железно-кобальтовый сплав может быть использован лишь в крайнем случае, и в составе индуктора с 100 витками и более, и при последовательно включённом выключателе с отключающей способностью более 1000 А. Использование нанокристаллического сплава при малом числе витков даёт практически такое же время нарастания тока, как и железно-кобальтовый сплав. Однако, в индукторе, имеющим 100 витков, нанокристаллического сплав показывает наилучшие результаты и способен ограничивать ток до величины 1000 А практически неограниченно долго. Таким образом, в системах с высоким напряжением и малым полным сопротивлением, использование нанокристаллического сплава в качестве материала сердечника вместе с большим числом витков индуктора позволяет успешно использовать сравнительно простые и доступные выключатели с отключащей способностью 1 кА для отключения неудалённых коротких замыканий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vostrov K., Frolov V., Safonov E. 2017 Development Of Current Limiting Device For Short And Autonomous Networks *Plasma Physics and Technology* 4(2) 182–185.
2. ABB. Dead tank circuit breaker 245 kv.:
http://new.250 abb.com/high-voltage/AIS/selector/DTB_245.
3. Контактор - Электрон Э06в Про, Электрон Э16в Про, Электрон Э25в Про, Руководство по эксплуатации:
https://www.kontaktor.ru/upload/manual_electron_pro.pdf
4. ABB - VD4/R Вакуумные выключатели СН для вторичного распределения:
https://library.e.abb.com/public/db6579f045a244f99732817e2d969a46/CA_VD4-R(RU)K_1VCP000263.pdf

УДК 621.313.333

ГАРИПОВ Б.И.,
УСТИНОВ Д.А.
Санкт-Петербургский горный университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДА

Аннотация. В работе обосновывается необходимость разработки математических моделей асинхронных двигателей с учетом явления магнитного насыщения. Приводится математическое описание и построены структурные схемы асинхронного двигателя, без учета насыщения и с учетом насыщения. Приведенные модели необходимы при имитационном моделировании систем управления асинхронными приводами с целью повышения их эффективности.

Ключевые слова: магнитное насыщение; математическое моделирование; асинхронные двигатели.

GARIPOV B.I.,
USTINOV D.A.
Saint-Petersburg Mining University

MODELLING OF INDUCTION MOTOR INCORPORATING MAGNETIC SATURATION

Abstract. This paper argues the case for developing mathematical models of induction motors taking into account the magnetic saturation. Models are developed for induction motor that account and not consider for the saturation feature of the machine magnetic circuit. The models are necessary for the simulation of control systems for induction-motor drives in order to increase their efficiency.

Keywords: magnetic saturation; mathematical modeling; induction motors.

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронные машины в настоящее время широко применяются во всех отраслях промышленности [1]. По сравнению с другими типами электрических машин, они обладают оптимальными массогабаритными параметрами, просты в эксплуатации, имеют высокую надежность и дешевизну [2]. Главным недостатком асинхронных машин является сложность в управлении, что обусловлено их нелинейным и многопараметрическим характером. Кроме того, некоторые из параметров состояния асинхронной машины недоступны для непосредственного измерения [3].

Проблема управления асинхронными двигателями горных машин и установок представляет большой интерес, тем не менее, большинство научных работ основаны на упрощенной модели, где магнитная характеристика машины описывается линейной зависимостью [4–6]. В реальных электроприводах эта характеристика нелинейна, что обусловлено явлениями насыщения и гистерезиса. Данный факт необходимо учитывать при эксплуатации электроприводов горных машин, так как насыщение магнитопроводов может вызвать резкое ухудшение свойств системы управления [7]. Существует два основных метода построения систем управления электродвигателем, позволяющие нивелировать влияние насыщения. Первый метод заключается в ограничении потока

ротора, чтобы машина работала в линейной зоне своей магнитной характеристики (что соответствует стандартному математическому описанию). Недостаток такого метода в том, что он не обеспечивает эффективную работу машины, особенно в условиях высоких нагрузок, так как ток статора в таком случае излишне велик [8]. Второй метод заключается в установлении величины потока ротора в области его номинального значения (которое обычно находится в нелинейной части магнитной характеристики) [9]. Тогда параметры общепринятой модели асинхронной машины должны соответствовать рабочей точке потока ротора. Эффективность машины будет максимальна в том случае, когда момент на ее валу будет близок к номинальному. Однако при эксплуатации горных машин нагрузка подвержена значительным изменениям как в большую, так и в меньшую сторону [10]. При значениях нагрузки ниже номинальной в обмотках статора двигателя накапливается излишняя энергия, снижающая его эффективность.

Для достижения высокой производительности при управлении асинхронными электроприводами горных машин необходима разработка систем управления, учитывающих нелинейный характер магнитной системы двигателя.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕНАСЫЩЕННОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Мгновенные значения фазных напряжений статора трехфазной машины определяются из уравнений равновесия напряжений [11]:

$$\begin{aligned} u_{sa} &= i_{sa}R_s + \frac{d\psi_{sa}}{dt}, \\ u_{sb} &= i_{sb}R_s + \frac{d\psi_{sb}}{dt}, \\ u_{sc} &= i_{sc}R_s + \frac{d\psi_{sc}}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $i_{sa}, i_{sb,}\ i_{sc}$ – мгновенные значения фазных токов статора; R_s – активное сопротивление фазы обмотки статора; $\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$ – мгновенные значения фазных потокосцеплений статора.

Из трех мгновенных значений напряжений, токов или магнитных потоков, сцепленных с обмотками, можно образовать один единственный пространственный вектор напряжения, тока или потокосцепления. Этот вектор однозначно определяется тремя мгновенными значениями данной физической величины и, наоборот, по известному пространственному вектору однозначно определяются мгновенные значения фазных напряжений, токов или потокосцеплений [12]. Пространственные векторы в тексте выделены жирным шрифтом. Таким образом, пространственные векторы напряжения, тока и потокосцепления статора обозначены как $\boldsymbol{u_s}, \boldsymbol{i_s}, \boldsymbol{\psi_s}$.

Учитывая вышеизложенное, уравнение равновесия напряжений статора (1) в векторной форме можно записать как:

$$\boldsymbol{u_s} = \boldsymbol{i_s}R_s + \frac{d\boldsymbol{\psi_s}}{dt}. \quad (2)$$

Аналогично определяется пространственный вектор напряжения ротора:

$$\boldsymbol{u_r} = \boldsymbol{i_r}R_r + \frac{d\boldsymbol{\psi_r}}{dt}. \quad (3)$$

При исследовании различных процессов во вращающихся машинах целесообразным представляется переход к системе координат, жестко связанной с ротором, и проецирование на её оси результирующих пространственных векторов $\boldsymbol{u_s}$, $\boldsymbol{i_s}$, $\boldsymbol{\psi_s}$, $\boldsymbol{u_r}$, $\boldsymbol{i_r}$, $\boldsymbol{\psi_r}$.

Система координат *dq* представляет собой ортогональную систему координат, связанную с ротором и вращающуюся с угловой частотой ротора. Выразим векторы (2) и (3) через их составляющие по осям *d* и *q* [9]:

$$\left.\begin{aligned} u_{sd} &= i_{sd}R_s + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega\psi_{sq}, \\ u_{sq} &= i_{sq}R_s + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega\psi_{sd}, \end{aligned}\right\}, \quad (4)$$

$$\left.\begin{aligned} u_{rd} &= i_{rd}R_r + \frac{d\psi_{rd}}{dt}, \\ u_{rq} &= i_{rq}R_s + \frac{d\psi_{rq}}{dt}. \end{aligned}\right\}, \quad (5)$$

где ω – угловая частота вращения системы координат. Добавим к полученным уравнениям уравнение момента двигателя в осях координат dq и уравнение механического равновесия:

$$M = \frac{3}{2}p\left(\psi_{sd}i_{sq} - \psi_{sq}i_{sd}\right), \quad (6)$$

$$J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (7)$$

где p – число пар полюсов; M_c – момент сопротивления; J_{Σ} – суммарный момент инерции.

Для расчета модели асинхронного двигателя, переменные состояния которой вычисляются в системе координат dq, необходимо делать пересчет переменных из одной системы координат в другую. Для этого используются координатные и фазные преобразования. Структурная схема асинхронного двигателя, построенная на основе уравнений (4) - (7), приведена на рис. 1.

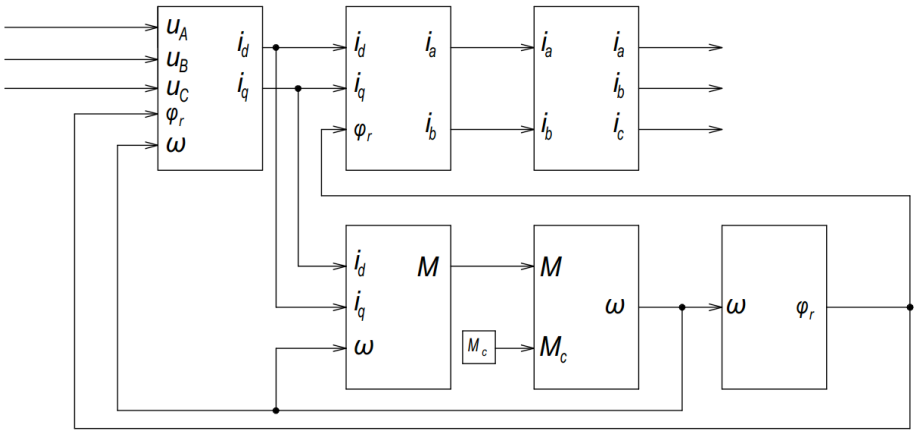


Рисунок 1 – Структурная схема асинхронного двигателя с ненасыщенной магнитной системой

УЧЕТ НАСЫЩЕНИЯ В УРАВНЕНИЯХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для достаточно точного расчета характеристик асинхронного двигателя в широком диапазоне режимов работы важен учет насыщения. Модель с учетом насыщения магнитопровода будет являться нелинейной как для динамического, так и для установившегося режима. Для учета насыщения магнитопровода асинхронного двигателя по осям dq выразим потокосцепление статора из уравнений (4):

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\psi_{sd}}{dt} &= u_{sd} - i_{sd}R_s + \omega\psi_{sq}, \\ \frac{d\psi_{sq}}{dt} &= u_{sq} - i_{sq}R_s - \omega\psi_{sd}, \end{aligned}\right\}. \quad (8)$$

Потокосцепление статора по осям dq соответственно равны [13]:

$$\left.\begin{aligned} \psi_{sd} &= i_{sd} \cdot L_s^*, \\ \psi_{sq} &= i_{sq} \cdot L_s^*, \end{aligned}\right\}, \quad (9)$$

где L_s^* - переменный коэффициент пропорциональности между потокосцеплением и током статора. Зависимость тока статора от потокосцепления может быть задана таблично по данным магнитного расчета или опыта.

С учетом приведенных уточнений, структурная схема асинхронного двигателя

может быть дополнена блоком насыщения (рис. 2).

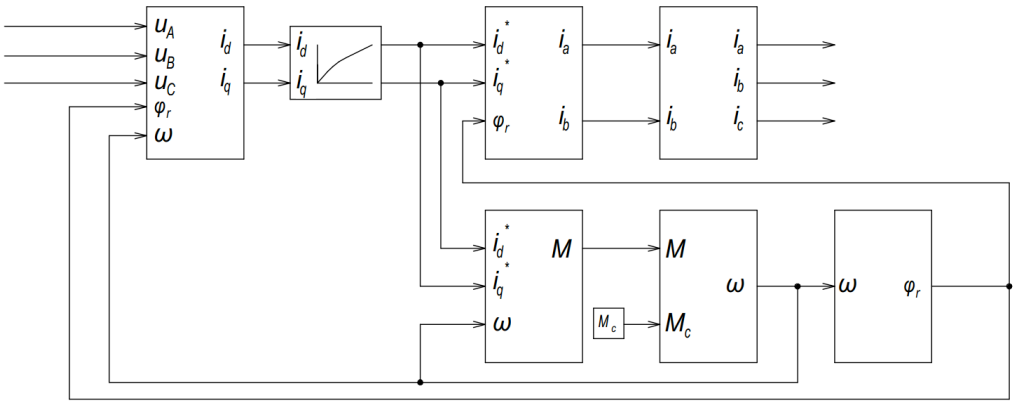


Рисунок 2 – Структурная схема асинхронного двигателя с учетом насыщения магнитной системы

В блоке насыщения требуется задание экспериментальных данных о зависимости тока от потокосцепления с применением линейной интерполяции между отдельными точками и линейной экстраполяции за пределами диапазона, представленного табличными данными. Структурная схема вычисления тока статора с учетом насыщения представлена на рис. 3. На рисунке блок ИТ является интерполяционной таблицей, который выдает значение выходного сигнала (тока статора) в зависимости от потокосцепления.

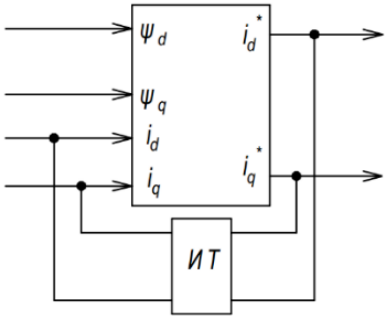


Рисунок 3 – Схема вычисления тока статора с учетом насыщения

Решение уравнений (8) – (9) приведенной модели, как правило, требует численного метода расчета. Реализация модели динамики асинхронного двигателя представляется возможной в современных пакетах численного моделирования [14]. Имитационная модель, полученная на основе приведенных уравнений с учетом насыщения позволит с приемлемой точностью оценивать рабочие и энергетические характеристики асинхронного двигателя, однако моделирование требует измерения электрических параметров в ходе эксперимента.

ВЫВОД

Системы электропривода являются наиболее крупным потребителем электрической энергии в горной промышленности. В связи с массовостью данного типа оборудования, увеличение КПД даже на 1% в масштабах отрасли приведет к экономии значительных денежных средств. Вычислительные мощности современных ЭВМ позволяют проводить численные расчеты и имитационное моделирование сложных систем линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, что позволяет увеличивать сложность разрабатываемых математических моделей и учитывать факторы, которые в классической

теории опускаются.

В данной статье приводится математическое описание асинхронного двигателя с учетом явления насыщения магнитопровода, а также приводится его структурная схема. Полученные структурные схемы могут быть использованы при имитационном моделировании системы управления асинхронного электропривода [15] с целью повышения ее производительности. Однако моделирование требует проведение эксперимента или магнитного расчета двигателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Макаров В.Г.* Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения / Вестник Казанского технологического университета, 2011. №6.
2. *Браславский И.Я.* Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
3. *Moulahoum S. & Touhami Omar & Ibtiouen R. & Fadel Maaref* 2007 *Induction Machine Modeling With Saturation and Series Iron Losses Resistance. Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC* 2007. 2. 1067-1072.
4. *Rai T., & Debre P.* 2016 *Generalized modeling model of three phase induction motor. 2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS).*
5. *Brandstetter P., & Kuchar M.* 2015 *Rotor flux estimation using voltage model of induction motor.* 2015 16*th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE).*
6. *Asgari S.H., Jannati M. & Idris N.R.N.* 2014 *Modeling of three-phase induction motor with two stator phases open-circuit.* 2014 *IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON).*
7. *Макаров В.Г., Матюшин В.А.* Анализ методов учета нелинейности магнитопровода и потерь в стали в математической модели асинхронного двигателя // Вестник Казанского технологического университета, 2010. №11.
8. *Мазуренко Л.И.* Учеты насыщения магнитной системы асинхронного двигателя и его влияния на процесс разгона / Вісник КДПУ, 2007. Вып. 3. Ч. 2. - С. 57-61.
9. *Hamid Ouadi, Fouad Giri, Luc Dugard* 2011 Accounting for magnetic saturation in induction machines modelling *International Journal of Modelling, Identification and Control, Inderscience* 14(1/2) 27-36.
10. *Габов В.В., Нгуен К.Л., Нгуен В.С., Ле Т.Б., Задков Д.А.* Обоснование геометрических и режимных параметров шнековых исполнительных органов, обеспечивающих эффективность погрузки угля на забойный конвейер / Уголь, 2018. №2(1103).
11. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
12. *Ковач К.П.* Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. – М.: АН СССР, 1962. – 624 с.
13. *Соколовский Г.Г.* Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
14. *Герман-Галкин С.Г.* MatLab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
15. *Алексеев В.В.* Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования / В.В. Алексеев, А.Е. Козярук, Э.А. Загривный. – СПб.: СПГГИ., 2006.

УДК 62-50

ГЛАДЫШЕВ В.Е,
СИНЮКОВ А.В.,
СИНЮКОВА Т.В
Липецкий государственный технический университет

МОДЕРНИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКИПОВЫМ ПОДЪЕМНИКОМ

Аннотация. Предложен возможный вариант модернизации системы управления скиповым подъемником основанный на предъявляемых к системе управления электроприводом подъемника требованиях. Предложена установка тиристорного преобразователя и внедрение регуляторов положения.

Ключевые слова: электропривод; двигатель постоянного тока; регулятор, моделирование.

GLADYSHEV V.E.,
SINYUKOV A.V.,
SINYUKOVA T.V.
Lipetsk State Technical University»

MODERNIZATION AND RESEARCH OF THE SKIP LIFT CONTROL SYSTEM

Abstract. A possible variant of modernization of the skip lift control system is proposed based on the requirements for the electric lift drive control system. The installation of a thyristor Converter and the introduction of position controllers are proposed.

Keywords: electric motor drives; DC motor; controller, simulation.

Подъемные механизмы используются в настоящее время в разных отраслях промышленности. Скиповый подъемник служит для перемещения (подъема) полезных ископаемых и породы. Подъемник представляет собой конструкцию, состоящую из наклонного моста в виде двух боковых вертикальных ферм сварной конструкции соединенных между собой поперечными связями; двух скипов, позволяющих параллельно производить наверху разгрузку материала, а внизу – загрузку; фундамента опоры; скиповой лебедки, служащей для передвижения скипов по наклонному мосту; двух рельсовых путей, предназначенных для движения скипов подъемника; системы контактов; блока и отдельной опоры. На текущий момент на объекте установлены два двигателя постоянного тока. При имеющейся системе Г-Д (генератор-двигатель) пуск и разгон двигателей производится подъемом напряжения на генераторе, что осуществляется уменьшением сопротивления в цепи обмотки возбуждения генератора. Системой предусмотрены два режима работы двухдвигательный – нормальный и однодвигательный – аварийный. Подъем напряжения для двухдвигательного режима производится в четыре ступени. Реверс двигателей осуществляется реверсированием обмотки возбуждения генератора. Замедление двигателей осуществляется в функции пути. Представленная на объекте система управления и составляющее ее оборудование морально и физически устарело. Применяемая релейно-контакторная база имеет не высокую степень надежности. Возникающие на объекте простои из-за сбоев в работе электрооборудования приводят к значительным производственным потерям [1-9].

Важным требованием к электроприводу подъемника является обеспечение

точности остановки привода при достижении конечных точек (угол опрокидывания 45-50 градусов), возможность плавного ускорения от нуля до номинальной скорости в начале пути и плавного замедления в конце пути, постоянство установившейся скорости.

В качестве модернизации данного объекта предлагается установка тиристорного преобразователя в цепь подъема, полученные в данном случае характеристики приведены на рис. 1-6 и использование регулятора положения. Данные с реального объекта приведены на рис. 7.

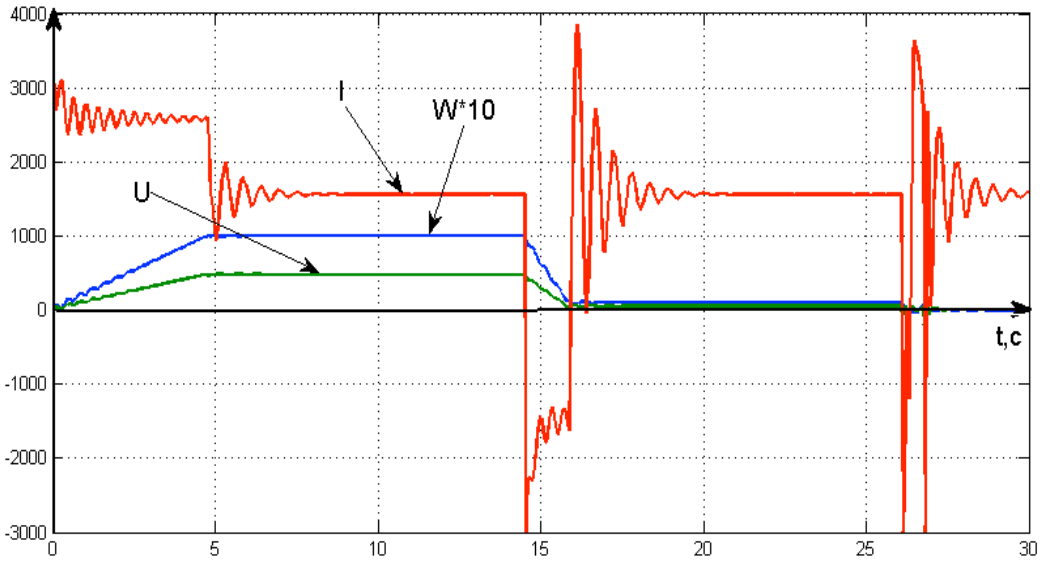


Рисунок 1 - Графики при номинальном моменте

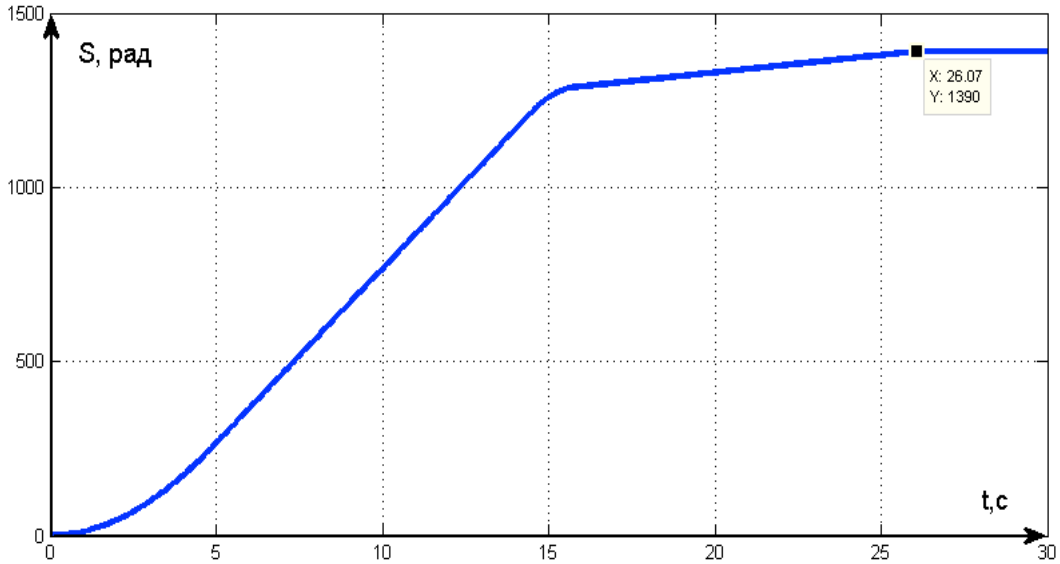


Рисунок 2 - Отработка положения при номинальном моменте

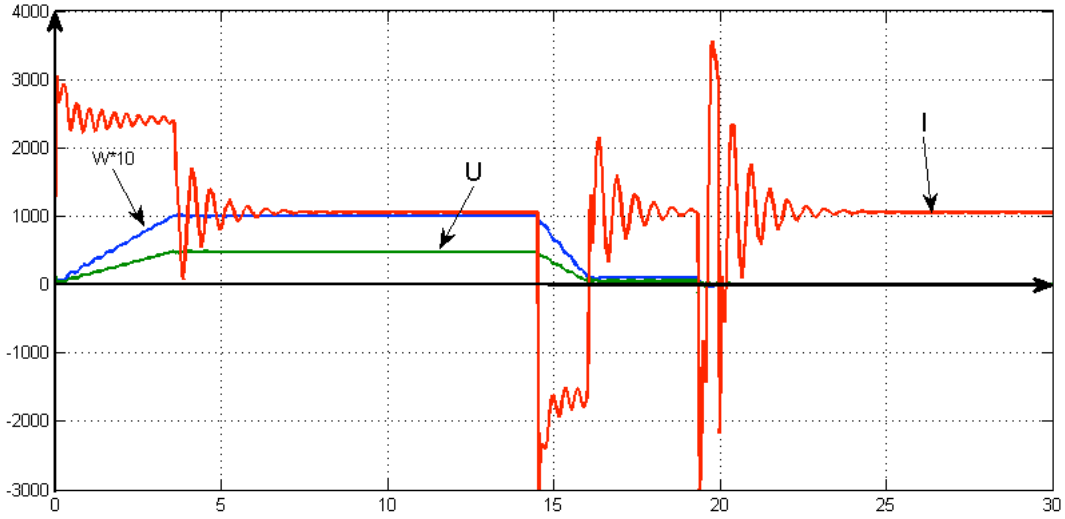


Рисунок 3 - Графики при значении момента равном 70 процентам от номинального

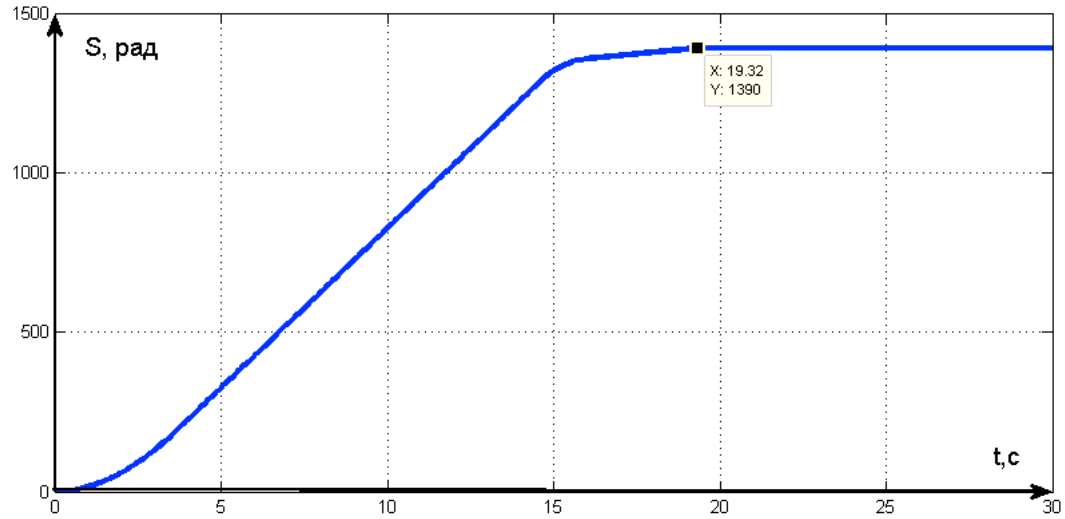


Рисунок 4 - Отработка положения при значении момента равном 70 процентам от номинального

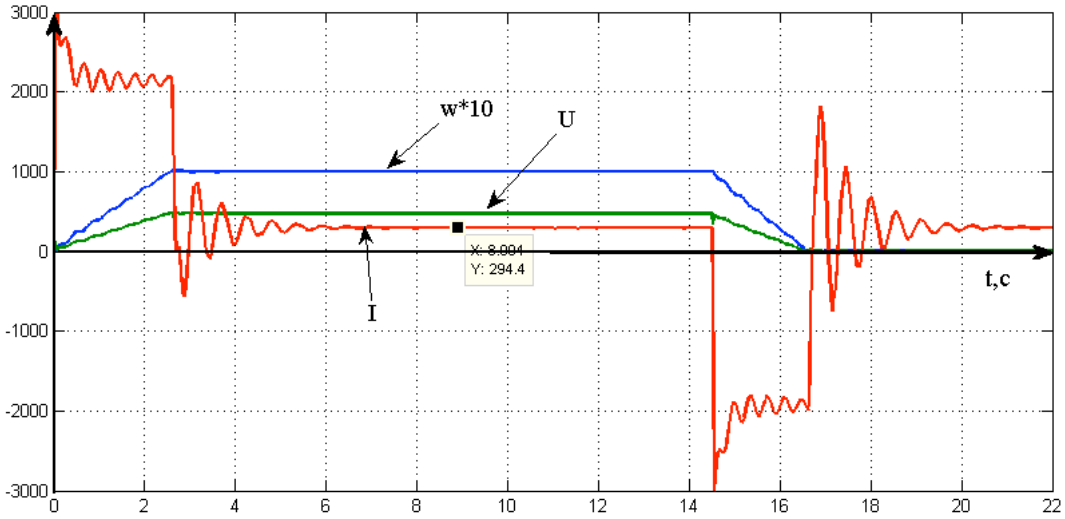


Рисунок 5 - Графики без нагрузки

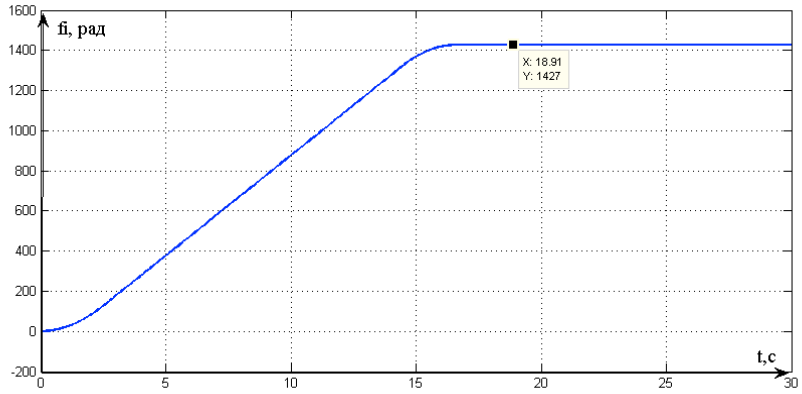


Рисунок 6 - Отработка положения без нагрузки

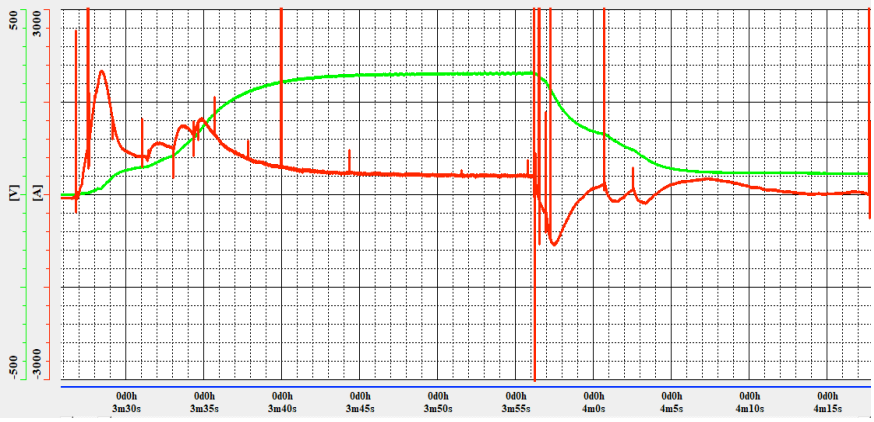


Рисунок 7 - Графики, полученные с реального объекта

Из графиков видно что скорость подьема скипа возрастает почти в два раза, следовательно возрастает производительность лебедки, обеспечивается плавный разгон и торможение, но остается проблема, связанная с точностью остановки скипа в положенном месте. Из графиков видно, что при одной настройке задания на скорость, можно добиться точной остановки скипа при постоянном весе, но при возрастании веса скипа, возрастает время подьема скипа, а при уменьшении веса, появляется ошибка по точности остановки.

Для решения данной проблемы, предлагаю внедрение регулятора положения. На основании полученных при моделировании в среде Matlab результатов производился сравнительный анализ систем с П-регулятором положения, ПД-регулятором, ПИД-регулятором и нечетким регулятором [10-15].

В результате получен вывод, о том, что применение регулятора положения, увеличивает быстродействие системы. ПД и ПИД регуляторы обеспечивают точную остановку привода, независимо от нагрузки, что очень важно для данной системы. Нечеткий регулятор имеет еще большее быстродействие системы, по сравнению с ПД и ПИД регуляторами, а также он снижает колебания в системе при торможении, что положительно влияет на срок службы агрегата.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Синюкова Т.В.* Моделирование режимов работы двигателя постоянного тока / Т.В. Синюкова, А.В. Синюков // Летняя школа молодых ученых ЛГТУ - 2017. Сборник научных трудов научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета, 2018. - С. 50-54.

2. *Сенцов Е.В.* Моделирование реостатного пуска двигателя постоянного тока

параллельного возбуждения / Е.В. Сенцов, А.В. Синюков, Т.В. Синюкова // Тенденции развития современной науки. Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета: в 2 частях, 2017. - С. 586-589.
3. *Козярук А.Е.* Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов / Электротехника, 2019. № 3. - С. 33-37.
4. *Козярук А.Е.* Эффективный промышленный электропривод сегодня / Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016, 2016. - С. 56-58.
5. *Козярук А.Е.* Энергоэффективные электромеханические комплексы горно-добывающих и транспортных машин / Записки Горного университета, 2016. Т.218. - С. 261-269.
6. *Козярук А.Е.* Опыт создания и перспективы развития электромеханических комплексов – технологических, движения и позиционирования техничечких средств освоения шельфа / Записки Горного университета, 2016. Т.221. - С. 701-705.
7. *Синюков А.В.* Энергоэффективная система управления / А.В. Синюков, Т.В. Синюкова // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы III Международной научно-практической конференции. 2019. - С. 574-580.
8. *Сенцов Е.В.* Перспективы использования программного пакета MATLAB SIMULINK для моделирования противовключения двигателя постоянного тока / Энергетика. Проблемы и перспективы развития. Тезисы докладов 3-й Всероссийской студенческой конференции, 2017. - С. 278-280.
9. *Синюков А.В.* Нечеткие регуляторы в системах управления объектами металлургических предприятий / А.В. Синюков, Т.В. Синюкова // Актуальные проблемы энергетики. Сборник научно-технических статей, 2019. - С. 129-133.
10. *Багрянцев И.А.* Качественное улучшение регулятора скорости прокатной клети горячего проката при переходе с П на ПИ-регулирование / И.А. Багрянцев, А.С. Марков, Т.В. Синюкова // Летняя школа молодых ученых ЛГТУ - 2019. Сборник трудов научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета, 2019. С. 55-58.
11. *Козярук А.Е.* Математическое и имитационное моделирование электропривода с преобразователем частоты нефтегазового оборудования / А.Е. Козярук, Ю.Б. Васильев, Ю.О. Яценко, А.И. Ивановский // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика, 2018. Т.18. № 1. - С. 122-132.
12. *Белокопытов Р.Н.* Математическая модель системы управления двигателем постоянного тока с помощью инвертора / Р.Н. Белокопытов, В.Н. Мещеряков // Энергосбережение и энергоэффективность в технических системах. Материалы VI Международной научно-практической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, 2017. - С.84-85.
13. *Синюков А.В.* Синтез нейроконтроллера NORMA-L-2 / А.В. Синюков, Т.В. Синюкова // Школа молодых ученых. Материалы областного профильного семинара, 2019. - С. 170-175.
14. *Левин П.Н.* Исследование классического и нечеткого регулятора / П.Н. Левин., Р.Н. Белокопытов, М.М. Новик // Modern Science, 2019. № 9-2. - С. 266-268.
15. *Синюкова Т.В.* Синтез индентификаторов частоты вращения ротора асинхронного двигателя, основанных на концепции NN / Т.В. Синюкова, Е.В. Сенцов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2019. № 9. - С. 13-20.

УДК 621.311.25

ГЕРРА Д.Д.,
ЯКОВЛЕВА Э.В.
Санкт-Петербургский горный университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КУБА

Аннотация. Данная статья посвящена изучению причин низкой эффективности солнечных генераторов на территории Республики Куба и предоставляет технические решения этих проблем. Внедрение новых технологических решений требует комплексного подхода, оценивающего возможность применения более эффективных технологий улавливания солнечного света в конкретных климатических условиях страны, а также оценивающего экономическую выгоду того или иного решения. Поэтому в данной статье представлены существующие проблемы низкой эффективности солнечных электростанций, как например отсутствие каких-либо систем слежения за солнцем, а также способы решения этой проблемы. Опыт, полученный в ходе исследования, представленного в данной работе, может быть применен при проведении аналогичных исследований и на территории России.

Ключевые слова: система слежения за солнцем, эффективность, электротехнический комплекс, возобновляемые источники энергии, солнечная энергия.

GUERRA D.D.,
IAKOVLEVA E.V.
Saint-Petersburg Mining University

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC POWER STATION IN THE REPUBLIC OF CUBA

Abstract. This article is devoted to the study of the reasons for the low efficiency of solar generators in the Republic of Cuba and provides technical solutions to these problems. The introduction of new technological solutions requires an integrated approach that evaluates the possibility of applying more efficient technologies for capturing sunlight in specific climatic conditions of the country, as well as evaluating the economic benefits of a particular solution. Therefore, this article presents the existing problems of low efficiency of solar power plants, such as the absence of any tracking systems for the sun, as well as ways to solve this problem. The experience gained in the course of the study presented in this paper can be applied in similar studies in Russia.

Keywords. Sun tracking system, efficiency, electrical complex, renewable energy, solar energy.

Климатические характеристики Республики Куба таковы, что наиболее естественным способом развития энергетической системы острова является широкое внедрение систем производства солнечной энергии. В последние годы в Республике Куба были разработаны программы строительства по всей стране солнечных электростанций, подключенных к национальным электронно-энергетическим системам в сети среднего напряжения (до 13,8 кВ). В настоящее время некоторые солнечные электростанции имеют проблемы с эффективностью некоторых компонентов, которые составляют электрическую систему этих объектов. В ходе исследований, проведенных на солнечной электростанции в провинции Сантьяго-де-Куба, было установлено, что основные причины низкой

эффективности этой солнечной электростанции заключаются в солнечных генераторах.

Есть несколько причин, которые обуславливают низкую эффективность этих установок при производстве электрической энергии в регионе. Основные причины заключаются в том, что солнечные модули, которые работают на этих станциях, не соответствуют техническим стандартам производителя. С другой стороны, есть некоторые конструктивные аспекты солнечных генераторов, входящих в состав электротехнического комплекса, которые являются неадекватными. Примером которых является то, что угол наклона и разделения таблиц статических солнечных генераторов не является оптимальным, поскольку в месяцы, когда Солнце имеет самую низкую точку на горизонте, между поверхностями солнечных генераторов наблюдаются частичные тени.

Отсюда вытекает необходимость проведения углубленного исследования, которое отражает основные причины низкой эффективности солнечных генераторов указанных солнечных электростанций, внедряя технические решения для устранения этих проблем.

В дополнение к решению текущих проблем эффективности солнечных генераторов для увеличения выработки энергии упомянутыми солнечными установками, так же оцениваются другие технические и экономические аспекты для внедрения более эффективных технологий улавливания солнечных лучей.

Широко распространены два путимаксимизации электроэнергии, получаемой от фотоэлектрической установки: улучшение структуры фотоэлектрической панели, направленное на повышение ее производительности, и увеличение количества улавливаемого панелью солнечного излучения. Для достижения наилучшего результаты при применении второго способа площадь фотоэлектрической панели должна оставаться перпендикулярной излучению источника света.Для этого в фотоэлектрических системах используются солнечные трекеры [2-3].

Перспективной технологией в области систем солнечной генерации является внедрение солнечных трекеров, отслеживающих положение солнца и позиционирующих солнечную панель перпендикулярно излучению, обеспечиваю наибольшую эффективность генерации электроэнергии. Однако невыясненным остается вопрос реального повышения генерации и экономической эффективности внедрения описываемой технологии. Поэтому актуальным является вопрос оценки эффективности применения солнечных трекеров в условиях острова Куба. В настоящее время на острове нет солнечных установок, использующих эту технологию, поэтому нет возможности получить данные, по которым можно было бы оценить ее реальную эффективность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Amir Abas M. et al.* 2010 Improved Structure of Solar Tracker with Microcontroller Based Control *Proceeding in the 2010 Second International Conference on Advances in Computing, Control and Telecommunication Technologies (ACT)* 55-59.
2. *Enriquez J.M. et al.* 2010 A reliable, fast and low cost maximun power point tracker for photovoltaic applications *Solar Energy* 84(1) 79-89.
3. Ivanchenko D.& Smirnov A. 2019 Identification of interturn faults in power transformers by means of generalized symmetrical components analysis *E3S Web of Conferences* 140 04007.
4. *Guerra D.D. & Iakovleva E.V.* 2019 Mathematical modeling of parameters of solar modules for a solar power plant 2.5 MW in the climatic conditions of the Republic of Cuba *Proceeding of the 2019 International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECE 2019. E3S Web of Conferences* 140 18 04013.
5. *Kelly N.A., Gibson T.L.* 2009 Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system *Solar Energy* 83(11) 2092-2102.
6. *Roca J.A.* The world's 10 largest manufacturers of photovoltaic followers in 2018: three Spanish, PVH, Soltec and STi, in the Top 10. Global PV tracker supplier market rankings, March 2019, p. 1.

7. *Skamyin A.N. & Vasilkov O.S.* 2019 Power Components Calculation and Their Application in Presence of High Harmonics *2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM), Kärdla, Estonia, 2019* 1-4.
8. *Shklyarskiy J.E. & Bardanov A.I.* 2019 Novel Approach to Active Rectifier Control during Voltage Dips *2018 Int. Multi-Conference Ind. Eng. Mod. Technol. FarEastCon 2018*.
9. *Veligorskyi O. et al.* 2014 High-efficiency solar tracker development and effectiveness estimation *Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* 153-158.
10. *Zamyatin E., Voytyuk I. & Zamyatina E.* 2019 Increasing the energy efficiency of an enterprise by point compensating of power quality distortions *Paper presented at the E3S Web of* Conferences 140.
11. *Frolov, V.Y., Ivanov, D.V., Belsky, R.A.* Increasing of operation security and of breaking capacity of surge arresters. Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017, 7910861, c. 1520-1523.
12. *Frolov, V., Petrov, G., Yushin, B., (...), Churkin, I., Ivanov, D.* Research and development of plasma technologies of spraying of coatings, 18th Symposium on Physics of Switching Arc, FSO 2009, c. 162-165.
13. *Frolov, V., Matveev, I., Ivanov, D., (...), Ushin, B., Petrov, G.* Experimental investigations of the hybrid plasma torch with reverse vortex stabilization, 2011 Romanian Reports of Physics, 56(SUPPL.), c. 36-40.

УДК 537.9

ДАВЫДОВСКАЯ К.С.,
ЛЕБЕДЕВ А.А.
Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе
КОЗЛОВСКИЙ В.В.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ И НИТРИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Аннотация. Произведено сравнение радиационной стойкости силовых приборов на основе карбида кремния и нитрида галлия с кремниевыми. Исследовались коммерческие высоковольтные (блокирующее напряжение 600, 1200) 4H-SiC диоды Шоттки и JBS структуры с блокирующим напряжением 1700 В. Облучение производилось электронами с энергией 0,9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ при температурах от комнатной до 700 °С. Установлено, что при данных параметрах концентрация всех образцов линейно убывает с увеличением дозы облучения. Сделан вывод, что SiC приборы являются намного более радиационно стойкими, чем Si, что позволит заменить традиционную кремниевую электронику на карбид кремниевую в таких отраслях, как атомная энергетика и космическая промышленность.

Ключевые слова: карбид кремния; нитрид галлия; диод Шоттки; протонное облучение; радиационные дефекты; радиационная стойкость.

DAVYDOVSKAYA K.S.,
LEBEDEV A.A.
Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian
Academy of Sciences
KOZLOVSKI V.V.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

PROSPECTS FOR THE USE OF SILICON CARBIDE AND GALLIUM NITRIDE FOR POWER ELECTRONICS

Abstract. The radiation resistance of power devices based on silicon carbide and gallium nitride with silicon is compared. We studied commercial high-voltage (blocking voltage 600, 1200) 4H-SiC Schottky diodes and JBS structures with a blocking voltage of 1700 V. Irradiation was carried out by electrons with an energy of 0.9 MeV and protons with an energy of 15 MeV at temperatures from room temperature to 700 °C. It was found that with these parameters, the concentration of all samples decreases linearly with increasing radiation dose. It was concluded that SiC devices are much more radiation resistant than Si, which will replace traditional silicon electronics with silicon carbide in industries such as nuclear energy and space industry.

Keywords: silicon carbide; gallium nitride; Schottky diode; proton irradiation; radiation defects; radiation resistance.

Исторически сложилось так, что большую часть электроники делают на основе кремния, однако постепенно с развитием технологий ему на смену стали искать более перспективные материалы. Например, для силовой электроники больше подходили более широкозонные полупроводники [1-7]. Причиной этого являлись повышенные требования

и к температурной стойкости приборов, и к их радиационной стойкости. В качестве главных кандидатов для замены кремния выступили карбид кремния и нитрид галлия. Главными отраслями их использования предполагаются космическая и атомная промышленность [8-9].

Карбид кремния незаменим на высоких температурах (500-600 К), более того, на них уже сейчас получилось создать силовую электронику (диоды Шоттки и JBS) с напряжениями пробоя на 600, 1200 и 1700 В (как например те, что использовались в наших работах). В то же время нитрид галлия, хотя и уступает карбиду кремния в теплопроводности и кристаллическом качестве эпитаксиальных слоев - рост GaN происходит при меньших температурах, с использованием более дешевых материалов и на различных подложках. Так что приборы на основе нитрида галлия смогут конкурировать с карбид кремниевыми при работе на относительно невысоких (для силовой электроники) температурах [10].

Целью серии последних работ [11-15] было изучение изменений, происходящих в диодах Шоттки (ДШ) и JBS структурах, после их облучений электронами с энергией 0,9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ при разных температурах. В работах использовались 4H-SiC ДШ, 4H-SiC JBS-диоды, изготовленные компанией CREE (США), а также GaN ДШ.

Проводилось измерение зависимости концентрации нескомпенсированных носителей заряда от приложенного обратного смещения методом вольт-фарадных характеристик, и рассчитывалась скорость удаления носителей заряда.

В ходе серии экспериментов облучения при комнатной температуре концентрация нескомпенсированных носителей заряда N_a-N_d линейно снижалась для всех изучаемых приборов. Скорости удаления носителей заряда V_d при облучении электронами составили:

- ~ 0.095 $см^{-1}$ для 4H-SiC ДШ с напряжением пробоя 600 В,
- ~ 0.073 $см^{-1}$ для 4H-SiC ДШ с напряжением пробоя 1200 В,
- ~ 0.15 $см^{-1}$ для диодов JBS с напряжением пробоя 1700 В,
- ~ 12.44 $см^{-1}$ для GaN ДШ.

В то время как для приборов на основе кремния характерная V_d = 0.23 $см^{-1}$. То есть для компенсации SiC ДШ требуется примерно 200-кратная доза, по сравнению с Si диодом с таким же $U_{проб}$ (для их сравнения требуется учитывать их разные критические поля). Аналогично, для 4H-SiC JBS потребуется в 100 раз большая доза. К сожалению, нитрид галлиевые приборы пока не выдерживают конкуренции по радиационной стойкости, однако это связано с неоднородностью самих выращенных структур, что в дальнейшем будет исправляться, и работа над этим сейчас только начинается в данном направлении.

Скорости же удаления носителей заряда V_d при облучении протонами составили:

- ~ 63 $см^{-1}$ для 4H-SiC ДШ с напряжением пробоя 600 В,
- ~ 50 $см^{-1}$ для 4H-SiC ДШ с напряжением пробоя 1200 В,
- ~ 54 $см^{-1}$ для диодов JBS с напряжением пробоя 1700 В.

А для кремниевых диодов Шоттки: V_d = 110 $см^{-1}$, что так же сразу показывает, насколько кремниевые приборы хуже выдерживают радиационное облучение, чем карбид кремниевые.

Также был рассмотрен одновременный эффект воздействия температуры и излучения, имитируя экстремальные условия работы 4H-SiC JBS-диодов, например, в реакторах. Облучение проводили протонами с энергией 15 МэВ при дозах до $3*10^{13}$ $см^{-2}$. В итоге выяснилось, что облучение образцов при температуре до 700ºС практически не привело к изменению V_d (рис. 1). Таким образом, можно сделать вывод, что одновременное воздействие температуры (<= 700 °С) и протонного облучения не приводит ни к ускорению деградации SiC приборов, ни к его замедлению. Последнее требует дополнительных экспериментов при более высоких температурах, а также исследований облучений электронами в такой же концепции.

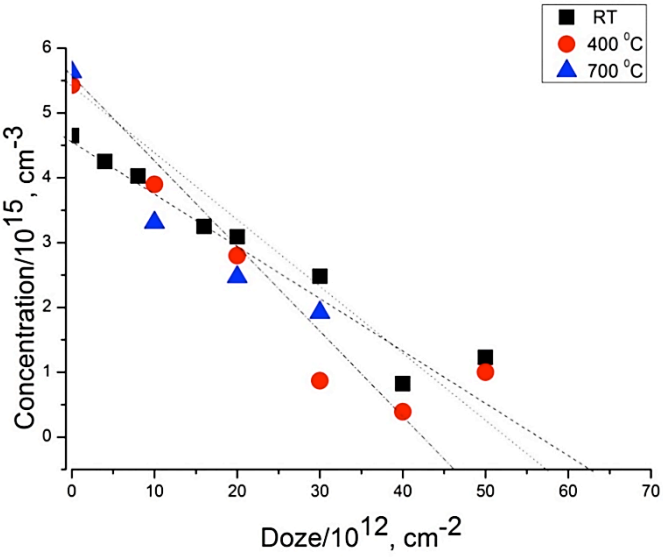


Рисунок 1 - Зависимость концентрации N_d-N_a от дозы облучения в JBS структурах, облученных при трех температурах протонами с энергией 15 МэВ.

Полученные в работе результаты подтверждают перспективность карбида кремния при разработке силовых приборов для экстремальных условий эксплуатации, таких как ядерные реакторы или космическая промышленность. И кремниевые силовые приборы уже сейчас можно заменять карбид кремниевыми, как более радиационно и термически стойкими. А дальнейшая работа над нитрид галлиевыми структурами позволит, и им занять определенную нишу в силовой электронике, также став более перспективными в использовании, нежели кремний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Omotoso E., Meyer W.E., Auret F. D., Paradzah A.T., Diale M., Coelho S.M.M., Janse van Rensburg P.J.* 2015 *Material Science in Semiconductor Processing* 39 112-118.
2. *Лебедев А А., Белов С.В., Мынбаева М.Г., Стрельчук А.М., Богданова Е.В., Макаров Ю.Н., Усиков А.С., Курин С.Ю., Бараш И.С., Роенков А.Д., Козловский В.В. Физика и техника полупроводников*, 2015, Т.49. Вып. 10.
3. *Калинина Е.В., Лебедев А.А., Богданова Е.В., Berenquier B., Ottaviani L., Виолина Г.Н., Скуратов В.А.* Физика и техника полупроводников, 2015. Т. 49, Вып. 4.
4. *Иванов А.М., Строкан Н.Б., Щербов Н.А., Лебедев А.А.* Физика и техника полупроводников, 2010. Т. 44. Вып 7.
5. *Емцев В.В., Иванов А.М., Козловский В.В., Лебедев А.А., Оганесян Г.А., Строкан Н.Б.* ФТП, 2010. 44(5), 706.
6. *Лебедев А.А., Бер Б.Я., Богданова Е.В., Середова Н.В., Казанцев Д.Ю., Козловский В.В.* Письма в ЖТФ, 2015. Т. 41. Вып. 23.
7. *Козловский В.В., Лебедев А.А., Ломасов В.Н., Богданова Е.В., Середова Н.В.* Физика и техника полупроводников, 2014. Т.48. Вып. 8.
8. *Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.Т.* Радиационные эффекты в космосе. - М.: Корпорация «ВНИИЭМ», 2014.
9. Новиков Л.С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. - М.: Университетская книга, 2010.
10. *Boles T., Varmazis C., Carlson D., Xia L., Jin D., Palacios T., Turner G.W., Molnar R.J.* 2013 *Proc CS MANTECH Conf. (New Orleans, Lousiana,)* 297.
11. *Козловский В.В., Корольков О., Давыдовская К.С., Лебедев А.А., Левинштейн М.Е., Слепчук Н., Стрельчук А.М., Тоотрии Ј.* Влияние температуры протонного облучения на

характеристики мощных высоковольтных карбид-кремниевых диодов Шоттки / Письма ЖТФ, 2020. Т.46(6). 35-37.
12. *Lebedev A.A., Davydovskaya K.S., Kozlovski V.V., Korolkov O., Sleptsuk N., Toompuu J.* 2019 Dependence of the carrier removal rate in 4H-SIC PN structures on irradiation temperature *12TH EUROPEAN CONFERENCE ON SILICON CARBIDE AND RELATED MATERIALS 2018 (ECSCRM 2018) Mater. Sci. Forum* 963 730-733.
13. *Kozlovski V.V., Vasil`ev A.E., Davidovskaya K.S., Lebedev A.A.* 2019 Role of the Carbon Sublattice in n-SiC Conductivity Compensation *J. Surf. Invest. X-ray* 13(1) 140-145.
14. *Kozlovski V.V., Lebedev A.A., Davydovskaya K.S., Lyubimova Y.V.* 2018 Galvanic and Capacitive Effects in n-SiC Conductivity Compensation by Radiation-Induced Defects *Semiconductors* 52(12) 1635-1637.
15. *Lebedev A.A., Davydovskaya K.S., Strel'chuk A.M., Yakimenko A.N., Kozlovski V.V.* 2018 Comparison of the Effects of Electron and Proton Irradiation on 4H-SiC and Si Device Structures *Materials Science Forum* 217-220.

УДК 621.316.573

ДЕРЕВЯНКИН П.Г.,
ФРОЛОВ В.Я.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
Институт Энергетики и Транспортных систем

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ГОРЕНИИ ДУГИ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕДНО-ГРАФИТОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Аннотация. В статье приводится расчёт переходного контактного сопротивления электродов с покрытием, полученным с использованием технологии плазменного напыления. В качестве распыляемого вещества использовался медно-графитовый порошок, который зарекомендовал себя как дугостойкий материал. Электроды с покрытием были испытаны на эрозионную стойкостьдугой при токах в несколько килоампер. Целью работы является определение влияния состава покрытия на переходные процессы в межконтактном промежутке.

Ключевые слова: переходное контактное сопротивление, электрические аппараты, электрические выключатели.

DEREVYANKIN P.G.,
FROLOV V.YA.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Institute of Energy and Transport Systems

ANALYSIS OF TRANSITION PROCESSES IN ARC BURNING ON THE SURFACE OF COPPER-GRAPHITE ELECTRODES

Abstract. The article provides a calculation of the transient contact resistance of elecrodes with a coating obtained using plasma spraying technology. Copper-graphite powder with high arc resistance was used as a spraying substance. Coated electrodes were tested for erosion resistance by an arc at currents of several kiloamperes. The aim of the work is to determine the influence of the coating composition on transients in the contact gap.

Keywords: contact resistance, circuit breakers.

При анализе работы электрических выключателей необходимо учитывать наличие контактного соединения, которое оказывает на технические свойства аппаратов. В конструкции аппаратов большое внимание уделяется сопротивлению основных (проводящих) контактов, через которые протекает ток при включенном положении. Анализируя коммутационные процессы необходимо также уделить внимание контактному соединению вспомогательных (дугогасительных) контактов, так как при размыкании через них краткосрочно протекают большие токи и сопротивление этих контактов влияет на работу выключателя.

Значение переходного сопротивления - очень важный качественный показатель состояния любого контактного соединения, влияющий на надёжность коммутационных аппаратов. Повышенное значение этого параметра увеличивает потери, а, следовательно, и нагрев контактных частей коммутационных устройств, что снижает их ресурс и характеристики. В данной статье представлен математический анализ переходного сопротивления контактов, которые могут быть получены путём плазменного напыления

медно-графитового порошка на медных электродах в воздушной среде. При таком способе нанесения покрытия на поверхности электрода образуется медно-графитовый слой, обладающий пористой структурой и содержащий в себе включения оксидов меди. Полученные электроды обладают лучшими дугостойкими свойствами [1], за счёт наличия тугоплавкой фазы, а также оксидов меди, которые имеют значительно меньшую теплопроводность, по сравнению с медью.

Переходное сопротивление контактов определяется собственным сопротивлением контакта ($R_м$), сопротивлением оксидных плёнок ($R_{оп}$) и сопротивлением стягивания ($R_{ст}$):

$$\frac{1}{R_{пер}} = 1/\sum (R_м + R_{оп} + R_{ст}) \quad (1)$$

При этом, с учётом сопротивления стягивания кругового контакта, переходное сопротивление можно выразить формулой (2) [2]:

$$R_{пер} = \frac{8}{3} * \frac{\rho_{пер}}{\sqrt{\pi^3 * S_к}}, \quad (2)$$

где $\rho_{пер}$ – переходное удельное сопротивление, определяемое с учётом всех факторов контактной поверхности (материал, гетерогенность структуры и пористость):

$$\rho_{пер} = \sum_i (\rho_{мi} + \rho_{оni} + \rho_{порi}) \quad (3)$$

Так как материал имеет включения графита, а в некоторых случаях содержит в себе и оксидные включения, необходимо выразить расчёт удельного сопротивления материала следующим образом:

$$\sum_i \frac{\rho - \rho_i}{\rho + 2\rho_i} * C_i = 0 \quad (4)$$

Подставляя значения сопротивления графитовых включений и сопротивления окислов получим:

$$\frac{\rho_м - \rho_{Cu}}{\rho_м + 2\rho_{Cu}} * C_{Cu} + \frac{\rho_м - \rho_C}{\rho_м + 2\rho_C} * C_C + \frac{\rho_м - \rho_{CuO}}{\rho_м + 2\rho_{CuO}} * C_{CuO} = 0 \quad (5)$$

При этом, при расчёте сопротивления материала электрода также необходимо учитывать наличие пор:

$$\rho = \rho_м * \frac{1 - C}{1 - 2C}, \quad (6)$$

где C – объёмная концентрация пор.

Так как оксид меди представляет собой полупроводниковую структуру[3], то расчёт приводится для температуры 1000 К. При этом в зависимости от способа получения монооксид меди может обладать, как p-, так и n-типом проводимости.

Исходя из (2) и (3), можно сказать, что:

$$R_{пер} \sim \rho_{пер} \sim \rho \quad (7)$$

Соответственно, для оценки влияния на контактное сопротивление

По представленным формулам был произведён расчёт удельного переходного сопротивления для электродов с различными составами и пористостью. Результаты представлены на рис. 1.

Из результатов расчётов видно, что наличие оксидов и графита в составе электрода оказывает наибольшее влияние на контактное сопротивление. При значительном содержании оксидов и графита ожидается более чем двукратное увеличение переходного контактного сопротивления.

Тем не менее, так как при замкнутом положении выключателя дугогасительные контакты не пропускают через себя ток, двукратное увеличение сопротивления не является проблемой и не должно оказывать негативного влияния на работу выключателя. Также, применяя полученную математическую модель и анализируя режимы работы выключателя, можно подобрать оптимальный состав покрытия дугогасительных контактов.

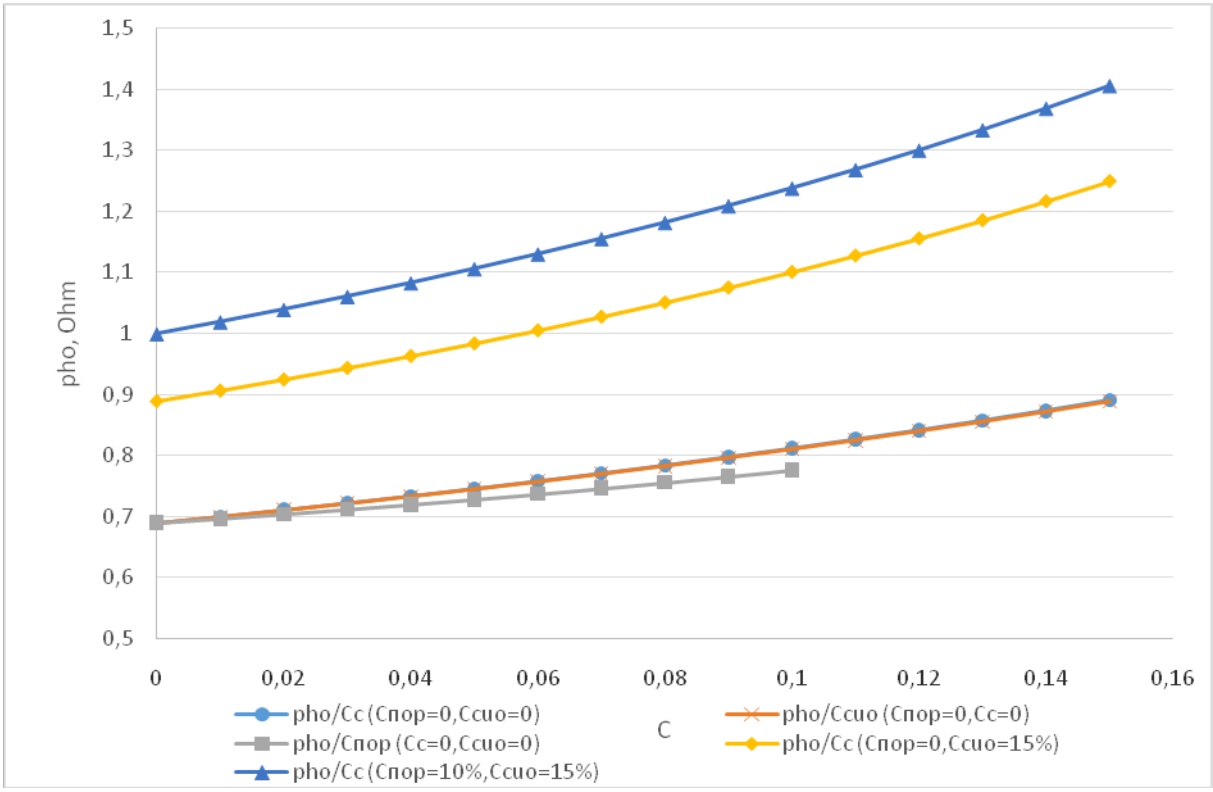


Рисунок 1 – Зависимость удельного сопротивления материала от наличия графита (Cc), оксидов меди (Ccuo) и пористости (Cпор)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведён математический анализ зависимости переходного контактного сопротивления от состава покрытия, нанесённого на электрод. Была установлена зависимость переходного сопротивления от удельного сопротивления материала контактной группы. Установлена зависимость удельного сопротивления нанесённого покрытия от наличия примесей и пористости материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Derevyankin P., Frolov V., Gonzalez D., Gorchakov S., Methling R., Uhrlandt D.* 2019 Analysis of erosion resistance of CuC arcing contacts manufactured by plasma spraying technology *Plasma Physics and Technology Journal* 6 123-126.

2. Фролов В.Я. Исследование энергетических характеристик и тепловых процессов установки контактно-дуговой резки и обработки металлов / Нестор, 2002. – 112 с.

3. *Калинин Ю.Е.* Влияние углерода на электрические свойства объемных композитов на основе окиси меди / Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков, А.В. Ситников // Журнал технической физики, 2018. 60. 677.

4. *Kovalchuk M.S., Poddubniy D.A.* Ensuring the Reliable Operation of the Pumping Units by Efficient State Diagnosis // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 224 (1), 012032. DOI: 10.1088/1755-1315/224/1/012032.

5. *Abramovich B.N., Sychev Y.A., Pelenev D.N.* Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 327(5). 052027. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052027.

6. *Bolshunova O.M., Korzhev A.A., Vatlina A.M., Kamyshyan A.M.* Determination of multicomponent media permittivity by high-frequency method // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 194, 062004. DOI: 10.1088/1755-1315/194/6/062004.

7. *Kostin V.N., Minakova T.E.* Protective and control relays as coal-mine power-supply ACS subsystem // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87, 032017. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032017.
8. *Shklyarskiy Y.E., Shklyarskiy A.Y., Zamyatin E.O.* Analysis of distortion-related electric power losses in aluminum industry // Tsvetnye Metally. 2019, vol. 4, pp. 84-91.
9. *Veprikov A., Abramovich B.* Prospects for IGBT application in electrical power converters for industrial high-current DC loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
10. *Korolev N.A., Solovev S.V., Zhukovskiy Y.L.* Problems of diagnostics of asynchronous motor powered by an autonomous voltage inverter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 643, 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012022.
11. *Rastvorova, I.I., Belitskiy, A.A., Rastvorova, I.V.* Optimization of induction devices for aluminium casting to electromagnetic crystallizer // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018, 2018-January, pp. 758-760.
12. *Ivanchenko D., Smirnov A.* Simulation of Interwire Short Circuits in Transformer Windings by Means of Simulink MATLAB // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, pp. 977-980. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657097.

УДК 621.3.017

ЗАМЯТИНА Е.Н.,
ЗАМЯТИН Е.О.,
ШКЛЯРСКИЙ Я.Э.
Санкт-Петербургский горный университет

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация. В статье представлены первые результаты исследования влияния качества электрической энергии на энергетическую эффективность электротехнического комплекса. Представлена функция оценки эффективности мероприятий по повышению энергетической эффективности.

Ключевые слова: энергетическая эффективность; качество электроэнергии; электротехнический комплекс; высшие гармоники.

ZAMYATINA E.N.
ZAMYATIN E.O.
SHKLYARSKY Y.E.
Saint-Petersburg Mining University

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF APPLICATION OF MEASURES TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF THE ELECTRICAL COMPLEX

Abstract. The article presents the first results of a study of the influence of the quality of electric energy on the energy efficiency of the electrical complex. The function of evaluating the effectiveness of measures to increase energy efficiency is presented.

Keywords: energy efficiency; power quality; electrical complex; higher harmonics.

Большая часть нагрузки любого предприятия является нелинейной, что приводит к искажению кривой тока и напряжения, увеличению уровня реактивной мощности, что увеличивает общий уровень потерь активной мощности при распределении электрической энергии и снижает энергетическую эффективность электротехнического комплекса [1-7].

Повышение энергетической эффективности электротехнических комплексов позволяет снизить долю энергетических затрат в себестоимости. Для оценки эффективности мероприятий по энергосбережению необходимо определить критерии оценки энергетической эффективности.

Критерии энергетической эффективности разделяются на три типа [8]: термодинамические, натуральные, экономические.

Эффективность применения методик по повышению реализации мероприятий по энергосбережению оценивается как степень фактического достижения целевого индикатора по выражению:

$$E = \frac{In_F}{In_N} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где: In_F – фактическое значение индикатора эффективности; In_N – нормативное значение индикатора эффективности.

Для электротехнических комплексов возможно применение следующих

индикаторов эффективности:

- потери активной мощности в распределительной сети;
- уровень гармонических искажений тока;
- уровень реактивной мощности, коэффициент мощности.

Потери активной мощности, характеризуют состояние проводов линий электропередач, правильность выбора их сечений, степень износа изоляции.

Потери активной мощности определяются в каждой линии, после чего складываются и определяется суммарный уровень потерь во всей распределительной сети электротехнического комплекса.

Уровень гармонических искажений тока или суммарный коэффициент гармонических искажений тока – THD_I определяется по выражению (2):

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{n} I_k^2}{I_1^2}}, \tag{2}$$

где: I_1 – модуль действующего значения тока первой гармоники; I_k – модуль действующего значения тока *k*-ой гармоники.

Уровень THD_I также определяется по каждой отдельно взятой линии, затем вычисляется средневзвешенный $\overline{THD}_I$, как:

$$\overline{THD}_I = \frac{\sum_{g=1}^{n}\left(THD_I^{(g)} \cdot P_I^{(g)}\right)}{\sum_{g=1}^{n}\left(P_I^{(g)}\right)}, \tag{3}$$

где: $THD_I^{(g)}$ – суммарный коэффициент гармонических искажений тока линии *g*; $P_I^{(g)}$ – активная мощность нагрузки, подключенной к линии *g*.

В случае применения параметра THD_I в качестве критерия определения энергетической эффективности, нет необходимости сбора данных о параметрах линии распределительной сети, достаточно лишь измерить форму тока [9].

Коэффициент мощности в общем случае – это отношение активной мощности к полной:

$$K_M = \frac{P}{UI}, \tag{4}$$

где: P – активная мощность; U, I – действующие значения напряжения и тока соответственно.

В частном случае – отсутствии высокочастотных искажений в токе и напряжении – коэффициент мощности равен косинусу угла сдвига фаз:

$$K_M = \cos(\varphi), \tag{5}$$

где: φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

Для анализа эффективности применения указанных критериев в среде Matlab Simulink разработана имитационная схема прибора учета электроэнергии, а также имитационная схема электротехнического комплекса (рис. 1).

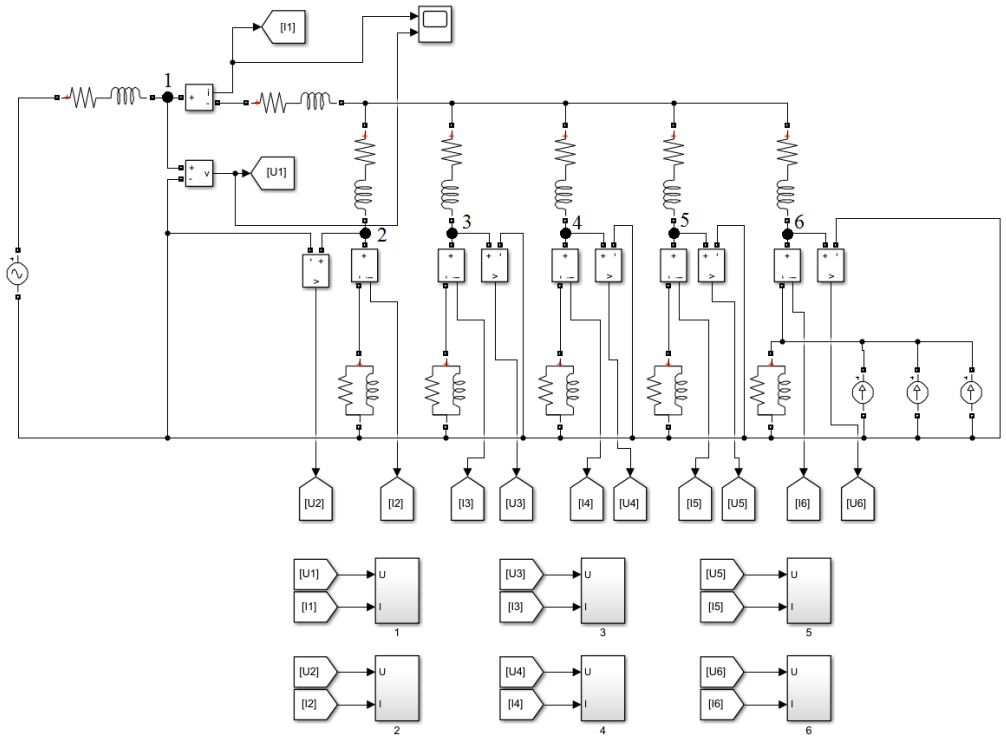


Рисунок 1 – имитационная схема замещения электротехнического комплекса среднего уровня напряжения

На рис. 1 представлена схема замещения электротехнического комплекса среднего уровня напряжения. В отмеченных узлах: 1, 2, 3, 4, 5, 6 измеряются активная, реактивная (неактивная [7]), полная мощности, коэффициент мощности, суммарный коэффициент гармонических искажений. Нелинейная нагрузка моделируется источниками тока.

В результате моделирования получены данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1.

Данные имитационного моделирования

№ п/п	Участок цепи	Потери активной мощности, кВт	Уровень реактивной мощности, квар	Коэффициент мощности, о.е.	Суммарный коэффициент гармонических искажений тока, о.е.
1.	1-2	3,4	707,3	0,79	0
2.	1-3	0,4	5,8	0,99	0
3.	1-4	0,9	88,2	0,98	0,001
4.	1-5	45	874,9	0,98	0,001
5.	1-6	6,2	421,6	0,92	0,439
6.	Сумма	55,9	2097,8	0,95	0,0596

Как говорилось выше, понятие реактивной мощности справедливо лишь при отсутствии гармонических искажений в напряжении и токе. В общем случае высшие гармоники присутствуют в токе и напряжении в виду большой доли нелинейной нагрузки в электротехническом комплексе. Поскольку единого мнения о реактивной или неактивной мощности при наличии высших гармоник нет, в дальнейшем этим параметром пренебрегаем.

Исходя из вышесказанного, при оценке эффективности внедрения энергосберегающего оборудования необходимо учитывать такие индикаторы эффективности, как коэффициент искажения тока, коэффициент мощности и потери

активной мощности. Выражение (1) справедливо для одного индикатора эффективности. Очевидно, что в отдельности индикаторы не дают полной картины, а значит их необходимо учитывать в комплексе.

Таким образом, для оценки эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий выражение (1) преобразуется в следующий вид:

$$E = \frac{k_I^N}{k_I^F} \cdot \frac{K_M^F}{K_M^N} \cdot \frac{\Delta P^F}{\Delta P^N} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где: k_I^F – фактический коэффициент искажения тока [10]; k_I^N – требуемый коэффициент искажения тока; PF^F – фактическое значение коэффициента мощности; PF^N – требуемое значение коэффициента мощности; ΔP^F – фактический уровень потерь активной мощности; ΔP^N – требуемый уровень потерь активной мощности.

Фактические значения показателей входящих в выражение (6) вычисляются или измеряются. Требуемые значения задаются исходя из экономической оценки потенциала энергосбережения.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что в качестве индикаторов эффективности применения мероприятий по повышению энергетической эффективности электротехнических комплексов целесообразно использование функции по выражению (6).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шклярский Я.Э.* Способы уменьшения влияния высших гармоник на работу электрооборудования / Я.Э. Шклярский, А.Н. Скамьин // Записки горного института, 2011. Т. 189. С. 121–124.
2. *Ding T.* 2016 A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks *IEEE Trans. Sustain. Energy* 7(1) 301–311.
3. *Скамьин А.Н.* Компенсация реактивной мощности с учетом генерирования высших гармоник сторонними потребителями / А.Н. Скамьин, А.Я Шклярский // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017 под ред. Максаров В.В., Габов В.В., 2017. С. 211–215.
4. *Шклярский Я.Э.* Вопросы компенсации реактивной мощности при наличии высших гармоник на коксохимическом производстве / Я.Э. Шклярский, А.Н. Скамьин // Кокс и химия, 2016. № 4. С. 44–49.
5. *Nguyen T.T., Truong A.V.* 2015 Distribution network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using cuckoo search algorithm *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 68 233–242.
6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2012. - 20 с.
7. *Mirjalili S., Lewis A.* 2016 The Whale Optimization Algorithm *Adv. Eng. Softw*. 95 51–67.
8. *Аверина О.И.* Критерии оценки энергетической эффективности / О.И. Аверина, Е.Г. Москалёва, Т.С. Морозкина // Молодой ученый, 2014. №8. С. 427-429.
9. ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) Электрическая энергия Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Москва: Стандартинформ, 2014. С. 58.
10. *Замятин Е.О.* Компенсация высших гармоник и реактивной мощности с учетом топологии и параметров распределительной сети электротехнического комплекса предприятий: дис. канд. техн. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018.

11. *Murashov, I., Frolov, V., Kadyrov, A*. Development of the arc plasma torch opera-tion mathematical model for spheroidization of fine-dispersed powders // 2018 Journal of Physics: Conference Series, 1058(1), 012024.
12. *Frolov, V.Y., Kvashnin, A.O., Murashov, I.V*. Nonstationary mathematical model of a magnetic arc blast system. Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus.
13. *Vostrov, K., Frolov, V., Safonov, E.* Development of current limiting device for short and autonomous networks // 22nd Symposium on Physics of Switching Arc, 2017-September, c. 182-185.
14. *Obraztsov, N.V., Subbotin, D.I., Popov, V.E., Frolov, V.Y., Surov, A.V*. Model-ling of heating of plasma-chemical reactor in Comsol Multiphysics // 2018 Journal of Physics: Conference Series, 1038(1), 012137.

УДК 621.313

КАГАН А.В.
Санкт-Петербургский горный университет

ЭВОЛЮЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН

Аннотация. Приведена оригинальная классификация современных электрических машин. Вектор задает направление движения к наиболее эффективной конструкции активных частей силовой электромашины.

Ключевые слова: электрическая машина; конструкция; эволюция.

KAGAN A.V.
Saint-Petersburg Mining University

ELECTRIC POWER MACHINES CONSTRUCTION EVOLUTION

Abstract. The new classification of modern electric machines is given. The vector shores the motion direction to the most effective active parts of power machines construction.

Keywords: electric machine; construction; evolution.

Эволюция электрических машин вот уже почти 200 лет идет по нелегкому пути создания компактной надежной конструкции, обеспечивающей наибольшую эффективность энергопреобразовательного процесса [1]. Классификационная схема, укрупненно отражающая многообразие существующих конструкций и устанавливающая вектор движения к универсальной конструктивной компоновке активных частей современной энергоэффективной машины, приведена в табл. 1.

Конструкция активных и конструктивных частей такой эффективной силовой электромашины в зависимости от ее типа, мощности, частоты вращения, уровней напряжения и тока, а также других показателей (IP, IM, IC) и в соответствии с разнообразнейшими требованиями постоянно расширяющейся практики претерпевает постоянные изменения и с дальнейшим техническим прогрессом продолжает совершенствоваться.

Таблица 1.

Вектор развития конструкций электрических машин

Признак классификации	Многообразие конструкций активных частей силовых электрических машин	
по природе энергоносителя	Электромеханические преобразователи энергии ↓ \ индуктивные (магнитное поле) | \	емкостные (электрическое поле)
по агрегатному состоянию подвижных частей	твердое | \ ▼	жидкое, газообразное
по роду движения	вращающиеся | \ ▼	с поступательным, колебательным, импульсным движением

продолжение табл. 1

по числу степеней свободы	одномерные	многомерные (двух-, трех-, шестимерные)
по взаимному расположению магнитопроводов	концентрические	торцевые (дисковые)
по наличию механических преобразователей	без механического преобразователя	с механическим преобразователем (со встроенным редуктором, с катящимся, волновым ротором)
по относительной ориентации статора и ротора	ротор внутренний	ротор внешний, полый
по типу обмотки	с разноименнополюсной обмоткой	с одноименнополюсной обмоткой (униполярные)
по форме магнитопроводов	цилиндрические	тороидальные, когтеобразные
по способу создания магнитного поля	электромагнитные	магнитоэлектрические
по комбинации обмоток на статоре и роторе	с активными магнитопроводами – с одной обмоткой на статоре и одной обмоткой на роторе (магнитопроводы статора и ротора как гладкие, так и зубчатые)	с пассивным магнитопроводом ротора – параметрические: одна, две обмотки на статоре (магнитопровод ротора зубчатый безобмоточный)
	энергоэффективные электрические машины общего назначения	

Перспективы развития конструкции энерго-ресурсосберегающих электрических машин общего назначения связаны со следующими мировыми тенденциями: использование новых или улучшенных материалов для активных и конструктивных частей; усовершенствование систем охлаждения электрических машин; уточнение инженерных расчетов и применение прогрессивных технологий, позволяющих повысить точность изготовления и сборки отдельных узлов; придание деталям и элементам конструкции рациональных и эстетических форм и конфигураций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каган А.В*. Конструкция электрических машин. - СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2012. - 87 с.

УДК 621.365

КАДЫРОВ А.А.,
ЮШИН Б.А.,
ФРОЛОВ В.Я.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Аннотация. В статье описаны основные характеристики плазменной технологии, предназначенной для производства металлических порошков, такие как: напряжение, сила тока, расход плазмообразующего газа, температура плазменного потока. На основе экспериментальных данных и теоретических расчетов построены математические модели для уточнения определяющих характеристик, а также для визуализации процесса. Математическая модель содержит распылительную камеру, механизм вращения электрода, блок подачи газовой смеси, источник нагрева плазмы, систему водяного охлаждения стенок камеры. Использовался метод вращающегося электрода с плазменным нагревом (PREP).

Ключевые слова: плазмотрон; металлический порошок; джоулев нагрев; теплопередача; математическое моделирование; сила тока; напряжение; расход газа.

KADYROV A.A.,
YUSHIN B.A.,
FROLOV V.YA.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

DEVELOPMENT OF PLASMA TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF METAL POWDERS USED IN ADDITIVE TECHNOLOGIES

Abstract. The article describes the main characteristics of plasma technology designed for the production of metal powders, such as voltage, current, plasma-forming gas flow rate, plasma flow temperature. Based on experimental data and theoretical calculations, mathematical models are constructed to refine the defining characteristics, as well as to visualize the process. The mathematical model contains a spray chamber, an electrode rotation mechanism, a gas mixture supply unit, a plasma heating source, and a water cooling system for the chamber walls. The method of a rotating electrode with plasma heating (PREP) was used.

Keywords: plasma torch; metal powder; joule heating; heat transfer; mathematical modeling; current strength; voltage; gas consumption.

Введение.

С начала 21 века в развитых странах мира многие технологические компании начали переходить на более экологическо-чистое и экономное производство. Одним из таких направлений, включающих в себя два этих аспекта, являются аддитивные технологии. Благодаря послойному наращиванию детали, технология расходует минимальное необходимое количество материала. Однако, несмотря на все ее преимущества, для создания данной технологии и ее продвижения в будущем имеется ряд сложностей, которые будет необходимо решить нынешним инженерам и ученым. Условно оборудование для 3D-печати можно разбить на 3 компонента: это то из чего состоит 3D-

принтер (железо); программная часть (ПО) и расходные материалы (металлический порошок, керамический порошок, пластиковая проволока и др.).

Исходя из этих потребностей, сотрудники высшей школы электроэнергетических систем проявили заинтересованность в изучении данной проблематики и решении данной задачи, а именно в создании способа производства металлических порошков. Мы отталкивались уже от имеющегося у нас опыта работы с похожими материалами и технологиями: нанесение металлических покрытий на поверхности [1] и сфериодизация порошков в потоке плазмы [2]. Для решения данной задачи была принята концепция, создания многоструйной плазменной установки прямого действия.

Теоретическое обоснование и математическая модель.

Одним из ныне существующих способов получения металлических порошков является PREP технология, которая заключается в нагреве косвенной плазменной дугой вращающегося распыляемого электрода в камере заполненной смесью инертного газа. Для расчета столь сложного комплекса задач и внесения изменений в уже существующую установку, были использованы ряд программных пакетов для моделирования физико-химических задач, такие как Comsol Multiphysics и Mathcad. Всю работу можно разбить на несколько подзадач:

- расчет и выбор газовой смеси и плазмообразующего газа,
- расчет мощности и тепловых потерь в плазменной установке,
- создание модели многоструйной плазменной установки,
- моделирование расплава металлической заготовки под воздействием плазменной дуги прямого действия,
- получение и охлаждение металлических частиц.

Для расчета состава и транспортных свойств газовой смеси использовались в первом приближении свойства аргона и пары меди, являющимися частью расплавляемого электрода. Для составления системы уравнений, описывающих равновесие в среде используются законы: первый базирующийся на основе закона действующих масс, а второй – на нахождении минимума термодинамического потенциала системы.

Для заряженных компонентов закон действующих масс выражается законом Саха:

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = \frac{g_e Z_i(T)}{Z_a(T)} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{иониз}}{kT} \right).$$

В системы уравнений термодинамического равновесия необходимо добавить закон Дальтона:

$$\sum_{i=1}^{m} p_i = p.$$

Свойства плазмы такие как ρ плотность и c_p теплоемкость, полученные при помощи данных расчетов, будут использоваться в дальнейшем для расчета математической модели.

- плотность плазмы $\rho = \sum_i m_i n_i = \frac{1}{N_A} \sum_i M_i n_i$,
- теплоемкость при постоянном давлении $c_p = \frac{dh_{пл}}{dT}$,

Расчет мощности плазменного потока рассчитывается исходя из способов передачи тепла от плазмотрона к расплавляемой детали:

- Джоулев нагрев $Q_D = \int_{t_1}^{t_2} RI^2 dt$,
- Конвективный нагрев $Q_{conv} = q \cdot S \cdot St$,
- Кондуктивный теплоперенос $Q_{cond} = \lambda \cdot \left(\frac{T_{ai} - T_{кип}}{\Delta z} \right) \cdot S_{пятна}$,

- Электронная составляющая мощности дуги $Q_e = I \cdot \left(\frac{5}{2} \cdot k \cdot T_e \frac{1}{e} + e\varphi + \Delta U\right)$.

Суммарная полученная мощность используется для моделирования расплавления металлической заготовки под воздействием плазменного потока. Результаты данной модели представлены в статье [3].

В конечном итоге мы получаем осесимметричную модель плазмотрона, для завершения которой мы вводим следующие уравнения: уравнение движения для ламинарного потока, уравнение неразрывности, уравнение теплового баланса, система уравнений Максвелла:

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \rho(\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} = \nabla[-p\boldsymbol{I} + \mu(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T] + \frac{Re(\boldsymbol{J} * \mathbf{B})}{2},$$

$$\rho\nabla(u) = 0,$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \boldsymbol{u}\nabla T + \nabla(-k\nabla T) = \frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{5k_B \cdot T}{2q}\right) \cdot (\nabla T \cdot J) + E \cdot J + Q_{rad},$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J},$$

$$\nabla \times \boldsymbol{A} = \boldsymbol{B},$$

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} + \boldsymbol{J_e},$$

$$\boldsymbol{E} = -\nabla V.$$

Ниже представлен результат моделирования работы плазмотрона после 0,3 секунд. Как видно из рис. 1, 2 плазменная струя обладает достаточной температурой, а рассчитанная мощность способна расплавить вращающийся электрод для дальнейшего получения металлического порошка.

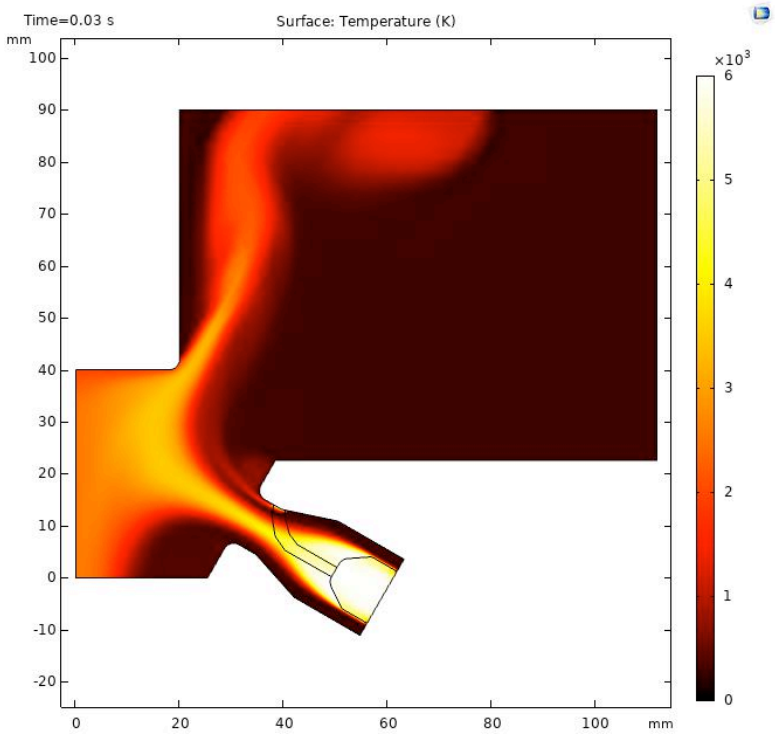


Рисунок 1 - Физическая модель работы плазменной установки

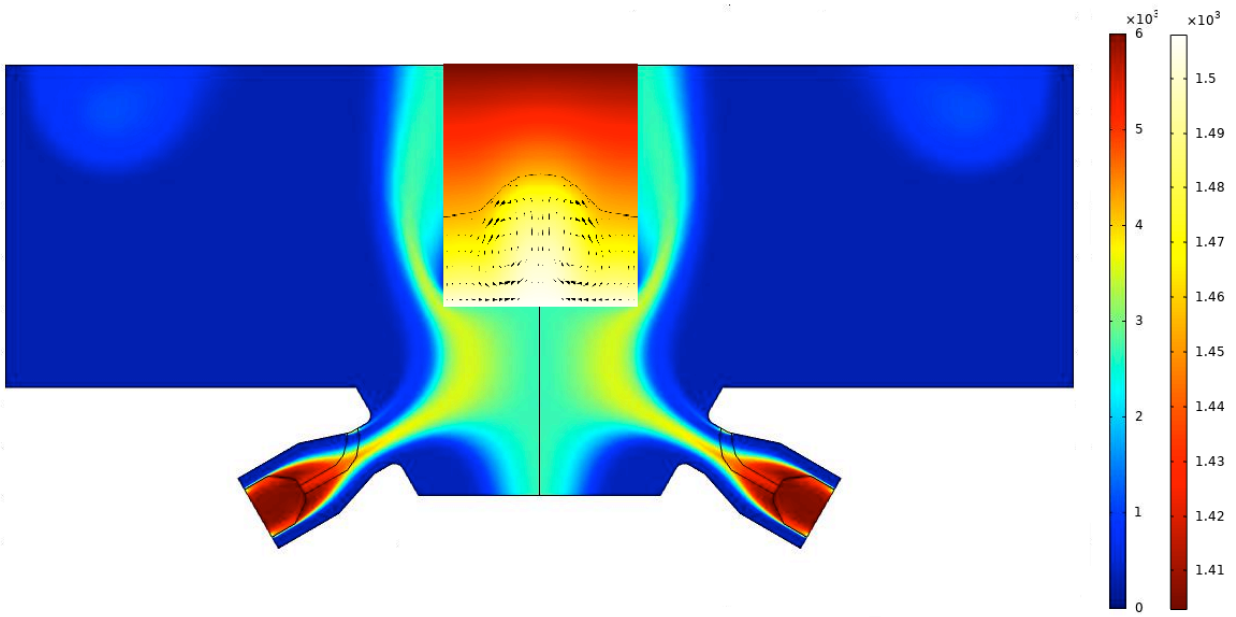


Рисунок 2 - Распределение температуры в плазменной струе и расплавляемой заготовке

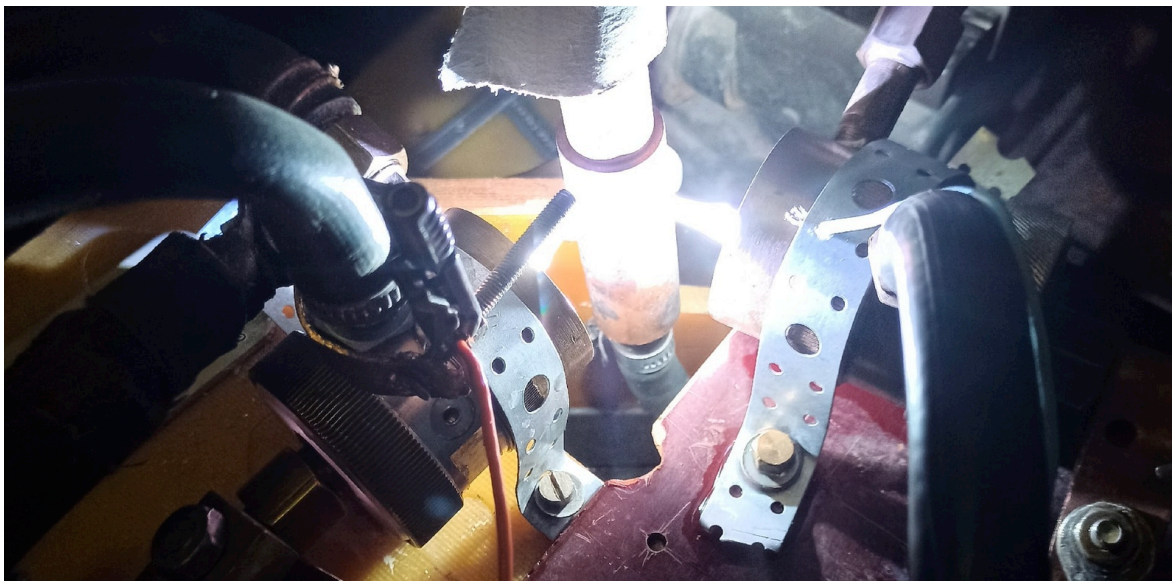


Рисунок 3 - Проведение эксперимента с двумя плазмотронами

Полученные в ходе математического моделирования данные позволили провести эксперимент (рис. 3) в лаборатории Политехнического университета и измерить необходимые величины для продолжения работы в данном направлении и решении последней подзадачи, озвученной в начале нашей статьи.

В ходе работы была проколориметрирована вода, проходящая через распыляемую деталь, с помощью чего было подтверждено, что на заготовку передается необходимое количества тепла, были проверены различные режимы работы плазмотронов, где изменялся расход газа от 0,3 г/с до 1,5 г/с. Было замечено, что зажигание дуги производится гораздо легче с небольшим расходом газа, а уже после установления стабильного горения дуги, можно увеличивать расход плазмообразующего газа. В дальнейших планах стоит создание модели газовой камеры для расчета охлаждения металлических частиц и траектории движения, а так же продолжение создании установки и проведения экспериментов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Батурова Л.П., Кадыров А.А., Петров Г.К., Фролов В.Я., Юшин Б.А.* Исследования характеристик титановых покрытий, нанесенных плазменно-дуговым методом / Пленки и покрытия: сборник трудов 13-ой международной конференции. – СПб, 2017. Вып. 13. С. 231-236.
2. *Murashov I. et al.* 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1058 012024.
3. *Kadyrov A.A. et al.* 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 643 012074.
4. *Shklyarskiy Y.E., Bardanov A.I., Shklyarskiy A.Y.* Novel approach to control of active rectifier during voltage dips // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 194, 052022. DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052022.
5. *Ivanova T.S., Malarev V.I., Kopteva A.V., Koptev V.Yu.* Development of a power transformer residual life diagnostic system based on fuzzy logic methods. Journal of Physics: Conference Series. 2019. 1353. 012099. Doi: 10.1088/1742-6596/1353/1/012099.
6. *Skamyin A.N., Belsky A.A.* Reactive power compensation considering high harmonics generation from internal and external nonlinear load // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87(3), 032043. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032043.
7. *Zhukovskiy Y.L., Korolev N.A., Koteleva N.I.* Diagnostics of an asynchronous motor powered from a self-commutated voltage inverter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 560, 012171. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012171.
8. *Shpenst V.A.* Investigation of the state of materials of power lines by multispectral optical-electronic devices // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, Volume 378, 012072. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012072.
9. *Belsky A.A., Dobush V.S., Kuksov N.A., Gluhanich D.Y.* Autonomous power supply complex for oil leakage detection system in pipelines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 643(1), 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012029.
10. *Ptitsyna E.V., Ptitsyn D.V., Kuvaldin A.B.* To the question of effective modes mixed load with the complex waveform current supply. Journal of Physics: Conference Series 2019.

УДК 621.3.064.42

КВАШНИН А.,
МУРАШОВ Ю.,
ФРОЛОВ В.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
Институт энергетики

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования отключающей способности автоматического выключателя. Исследование выполнено с использованием методов высокоскоростной съемки. Выполнен анализ влияния конструкции дугогасительной решетки на процесс дугогашения. Также выполнено параметрическое исследование влияния коэффициента мощности, величины коммутируемого тока и момента коммутации на гашение электрической дуги в дугогасительной системе автоматического выключателя.

Ключевые слова: автоматический выключатель; дугогасительная решетка; отключающая способность; электрическая дуга; коммутация.

KVASHNIN A.,
MURASHOV IU.,
FROLOV V.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Institute of Energy

RESEARCH OF INTERRUPTING CAPACITY OF LOW VOLTAGE CIRCUIT BREAKER

Abstract. The experimental results of the circuit breaker interrupting capacity are presented in the article. The study was performed using high-speed shooting methods. The analysis of the arc divider geometry influence on the extinguishing process is completed. A parametric study of the influence of the power factor, the interrupting current magnitude and the moment of switching on the extinction of the electric arc in the circuit breaker is also performed.

Keywords: circuit breaker; arc divider; interrupting capacity; electric arc; switching.

Введение.

Первоначальный анализ безопасной работы энергосистемы приводит к выделению двух основных типов защитных устройств: автоматических выключателей и предохранителей. В отличие от предохранителей, которые должны заменяться после каждого срабатывания, автоматические выключатели имеют возможность повторного включения, что делает эти устройства более привлекательным вариантом. Защитные функции автоматического выключателя направлены на безопасность людей, а также на предотвращение повреждения электрической цепи от токов перегрузки или короткого замыкания.

В связи с важностью низковольтных автоматических выключателей в энергосистеме вопрос о методике проектирования контактных и токоведущих систем, а также системы дугогашения является одним из наиболее актуальных вопросов в области

разработки электротехнических устройств.

Основу современных технических решений, исследуемых в этой статье, заложил российский инженер-электротехник, физик, конструктор Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862-1919) еще в 1912 г., что подтверждается патентами № 266745 и № 272742 [1]. В практике нашли применение два основных вида конструкций дугогасительной камеры автоматического выключателя (рис. 1).

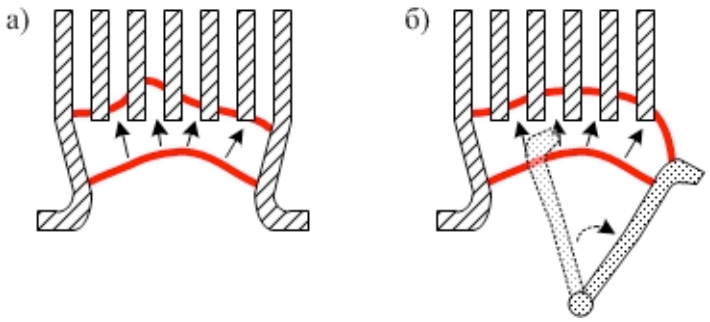


Рисунок 1 – Виды конструкций систем магнитного дутья

При прочих равных условиях схема на рис. 1, а позволяет получить меньшую продолжительность горения дуги, чем схема на рис. 1, б, однако, второй вариант дугогасительной системы обеспечивает равномерное вхождение дуги во все промежутки между пластинами. Второй тип конструкции системы дугогашения используется в подавляющем большинстве современных низковольтных автоматических выключателей [2-4].

С целью исследования влияния конструкции дугогасительной камеры на отключающую способность был разработан прототип низковольтного автоматического выключателя с различными вариантами исполнения дугогасительных решеток (рис. 2).

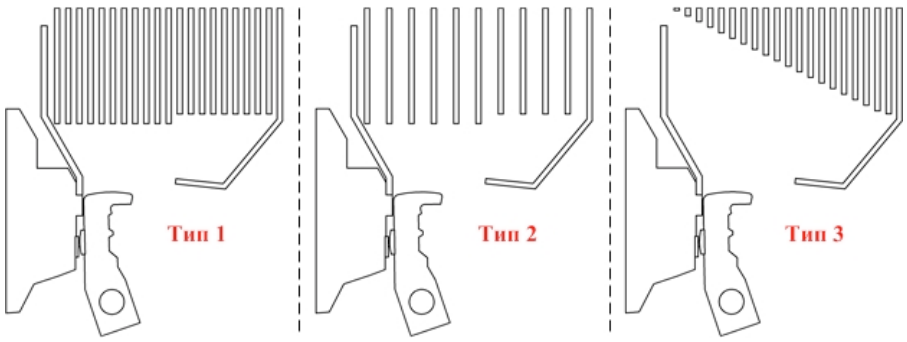


Рисунок 2 – Конструкции исследуемых дугогасительных решеток

Описание экспериментальной установки.

Принципиальная электрическая схема для исследования отключающей способности автоматического выключателя представлена на рис. 3. Измерение электрических параметров (временных зависимостей тока и напряжения) автоматического выключателя синхронизировано с высокоскоростной съемкой. Измерение тока осуществлялось с использованием пояса Роговского. Подключение автоматического выключателя осуществлялось на испытательном стенде (см. рис. 3) между фазным и нейтральным проводами для реализации однофазного короткого замыкания. Активация автоматического выключателя реализована с применением пневмопривода. Управление пневмоприводом синхронизировано с сетью для возможности коммутации в различные моменты времени относительно начала периода синусоидального напряжения. Блоки переменных индуктивностей и резисторов позволяют регулировать коэффициент мощности и величину коммутируемого тока.

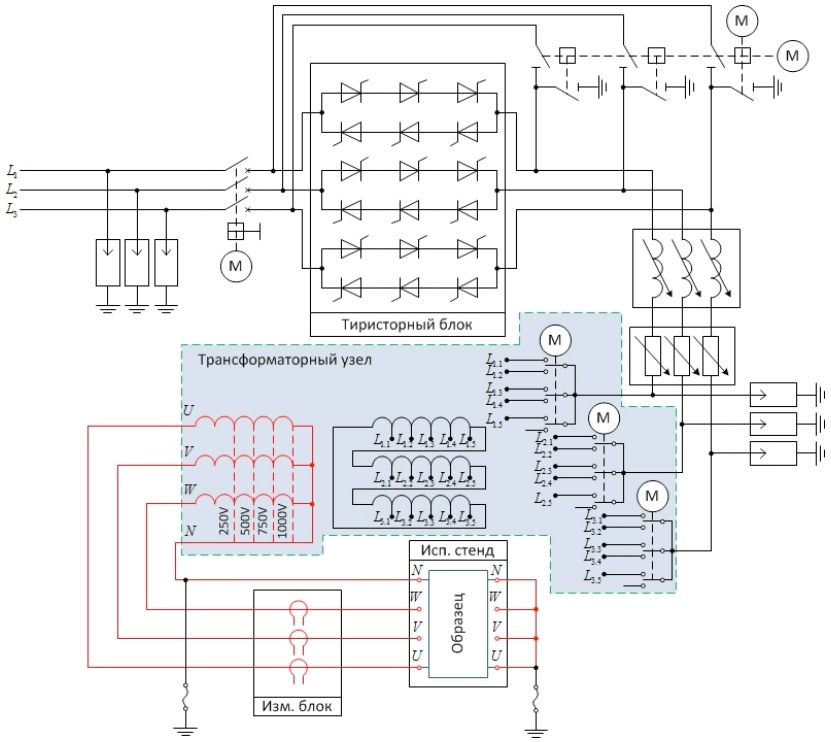


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки

Результаты экспериментального исследования.

Экспериментальные исследования выполнены для трех типов конструкции дугогасительной решетки при действующем значении тока короткого замыкания 4 кА, 10 кА, 16 кА, 19 кА и 26 кА, кроме того, было выполнено исследование зависимости процесса дугогашения от момента коммутации с задержкой 3 мс, 5 мс и 7 мс от начала периода синусоидального тока короткого замыкания.

Временные зависимости для трех типов конструкций дугогасительной решетки автоматического выключателя для момента коммутации с задержкой 5 мс и действующего значения тока короткого замыкания 10 кА показаны на рис. 4.

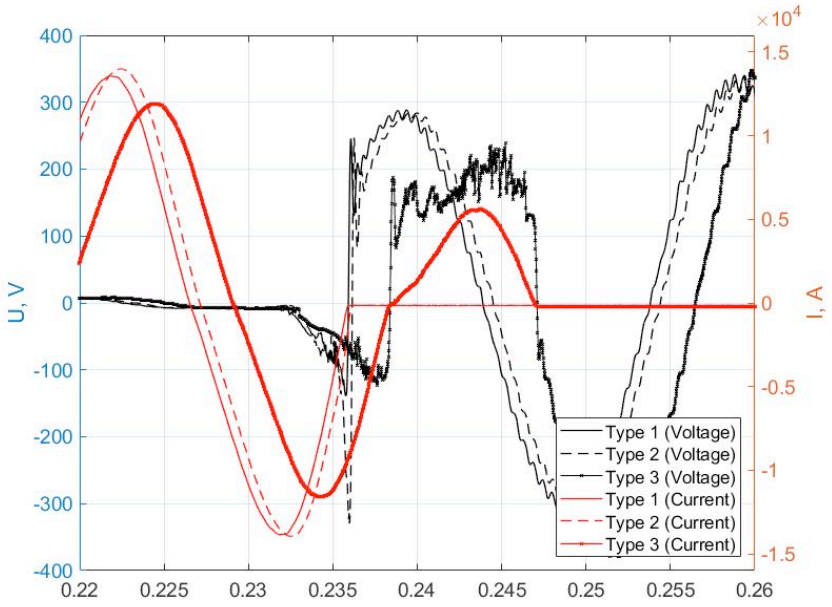


Рисунок 4 – Результаты экспериментального исследования при $I_{кз}$ = 10 кА и t = 5 мс

Заключение.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что третий тип дугогасительной решетки не справляется с токами короткого замыкания от 10 кА и выше. Существенной разницы для первого и второго типов дугогасительной решетки до 19 кА выявлено не было. С уменьшением значения коэффициента мощности значительно снижается отключающая способность автоматического выключателя. С увеличением времени задержки коммутации отключающая способность автоматического выключателя снижается, при коммутации автоматического выключателя во второй половине полупериода синусоидального тока короткого замыкания гашение в нуле тока не происходило.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брон О.Б.* М.О. Доливо-Добровольский - изобретатель искрогасительной решетки / Электричество, 1949. № 9. С. 71-73.
2. *NIU Chunping, DING Juwen, WU Yi, YANG Fei, DONG Delong, FAN Xingyu, RONG Mingzhe* 2016 Simulation and experimental analysis of arc motion characteristics in air circuit breaker *Plasma Science and Technology* 18(3).
3. *Karetta F., Lindmayer M*. 1996 Simulation of the gasdynamic and electromagnetic processes in low voltage switching arcs *Proceedings of the 42nd IEEE Holm Conference*.
4. *Игумнов Н.П.* Типовые элементы и устройства систем автоматического управления: Учебное пособие для студентов специальности 220301. – 3-е изд. - Канск: КПК, 2009. – 180 с.
5. *Skamyin A.N., Dobush V.S.* Analysis of nonlinear load influence on operation of compensating devices // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194 (5), 052023. DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052023.
6. Koptev V. Y., Kopteva A. V., Starshaya V. V. Information Support for the Process of Multiphase Flows Transportation Based on the Introduction of a Radioisotope Non-Separation Hydrocarbon Measuring System / 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 674-679. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039314.
7. *Voytyuk I.N., Zamyatina E.N., Zamyatin E.O.* Increasing the energy efficiency of an enterprise by point compensating of power quality distortions. Proceedings of the International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019). – 2019.
8. *Ustinov D.A.* increase of dynamic stability of alternating current electric drives at short-term violations of oilfield power supply // 12th International Scientific and Technical Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2019, 8601457. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601457.
9. *Turysheva A.V., Baburin S.V.* Justification of power supply system's structure of oil and gas facilities using backup energy sources with associated petroleum gas as the energy carrier // International Journal of Applied Engineering Research. 2016, vol. 11(1), pp. 749-755.
10. *Gerra, D.D., Iakovleva, E.V.* Sun tracking system for photovoltaic batteries in climatic conditions of the Republic of Cuba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 643(1), 012155. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914004007.
11. *Chmilenko, F.V., Rastvorova, I.I.* Improvement of quality of aluminum ingots at electromagnetic processing // Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1118(1), 012030.
12. *Kozjaruk A.E., Vasilev B.U., Shtop S.A., Serdukov N.A.* Currents in bearings of induction motors of electric drives with semiconductor converter // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives. 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341707.

УДК: 621.311.1.018.3

КОСТИН В.Н.,
СЕРИКОВ В.А.
Санкт-Петербургский горный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

Аннотация. Выполнен анализ режимов работы систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой, подключенной к одной из обмоток трансформатора с расщеплением вторичной обмотки. К другой обмотке подключены линейная нагрузка с конденсаторной батареей. Рассмотрены режимы суточного изменения линейной нагрузки и соответствующего регулирования мощности конденсаторной батареи для типового ряда трансформаторов.Установлено, что выделение нелинейной нагрузки на отдельную секцию шин недостаточно для обеспечения требуемого качества напряжения на шинах линейной нагрузки и допустимой загрузки конденсаторов токами высших гармоник.Показано, что включение последовательно с конденсаторами реакторов с частотой расстройки 7 % полностью устраняет проблемы с качеством напряжения на линейной нагрузке и с токовой перегрузкой конденсаторной батареи.

Ключевые слова: система электроснабжения, моделирование режима, нелинейная нагрузка, высшие гармоники, качество напряжения, конденсаторная батарея, антирезонансный реактор.

KOSTIN V.N.,
SERIKOV V.A.
Saint-Petersburg Mining University

MODELING OF OPERATION MODES OF ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS WITH NON-LINEAR LOAD

Abstract. An analysis is made of the operating modes of power supply systems with a non-linear load connected to one of the transformer windings with a splitting of the secondary winding. A linear load with a capacitor bank is connected to the other winding. The modes of daily variation of the linear load and the corresponding regulation of the capacitor bank power for a typical range of transformers are considered. It has been established that the allocation of a nonlinear load to a separate bus section is insufficient to ensure the required quality of voltage on the linear load buses and the permissible loading of capacitors by higher harmonics currents. It is shown that switching successively with capacitors of reactors with a detuning frequency of 7% completely eliminates problems with the quality of voltage at the linear load and with the current overload of the capacitor bank.

Keywords:power supply system, mode modeling, non-linear load, higher harmonics, voltage quality, capacitor bank, antiresonance reactor.

Введение. Известно, что высшие гармоники, генерируемые вентильными преобразователями, негативно влияют на работу всего оборудования, а особенно на работу конденсаторных батарей [1, 9-12]. Исследованию режимов систем электроснабжения (СЭС) с нелинейной нагрузкой посвящено много работ, в частности [2, 7, 8], в которых выбранная высшая гармоника представляется источником тока и анализируется процесс растекания этой гармоники в упрощенной однофазной модели

СЭС. Отсутствуют работы, в которых бы рассматривались процессы формирования, изменения по величине и растекания высших гармоник тока в трехфазной модели СЭС с непосредственным источником этих гармоник – вентильным преобразователем. Известны меры подавления высших гармоник. Это, в частности, установка дополнительных реакторов, а из схемных решений – подключение нелинейной нагрузкина отдельную секцию шин [5].

Цель работы. Исследование несинусоидальных режимов СЭС, в которой источником питания служит система и трансформатор с расщепленной вторичной обмоткой, от которого питаются нелинейная и линейная нагрузки с конденсаторной батареей (КБ). Нелинейная нагрузка подключена к одной вторичной обмотке трансформатора, линейная нагрузка и КБ – к другой.

Исследования режимов СЭС для случая подключения линейной и нелинейной нагрузок к одной секции выполнено в [4, 10]. Установлено, что при суточном изменении линейной нагрузки и соответственно мощности КБ не удается избежать резонансных режимов, в которых перегрузки КБ токами высших гармоник оказываются недопустимыми и не выполняются нормативные требования к качеству напряжения.

Модель СЭС. В качестве аппарата исследования был выбран программный комплекс *Multisim*. Система моделировалась трехфазным источником напряжения. Элементы СЭС моделировались параметрами, рассчитанными для первой гармоники.

Рассматривался типовой ряд трансформаторов напряжением 110/10 кВ с расщепленной обмоткой низшего напряжения и номинальными мощностями $S_{\text{т ном}}$ = 25, 40, 63 и 80 МВА. Мощность каждой из полуобмоток низшего напряжения составляет $0{,}5 \cdot S_{\text{т ном}}$. Параметры схемы замещения трансформатора определялись по справочным данным с учетом коэффициента расщепления $K_{\text{р}}$ = 3,5 и с учетом допущения, что напряжение короткого замыкания трансформатора $U_{\text{к}}$% определяет общее индуктивное сопротивление трансформатора [3]. Схема замещения трансформатора определяется только продольными параметрами без учета поперечных параметров трансформатора.

Линейная нагрузка моделировалась активно-индуктивным сопротивлением, конденсаторная батарея – емкостями [3]. Нелинейная нагрузка моделировалась трехфазным мостовым выпрямителем, работающим на активную нагрузку. В отличие от работ [2, 7, 8], где исследуемая гармоника задавалась неизменным по величине источником тока, выпрямитель сам генерировал весь спектр гармоник тока, величины которых определялись режимом СЭС [4, 10].

Все регулируемые мощности представлялись в относительных единицах по отношению к номинальной мощности трансформатора $S_{\text{т ном}}$:

- мощность нелинейной нагрузки $P^*_d = P_d / S_{\text{т ном}}$;
- мощность линейной нагрузки $P^*_{\text{н}} = P_{\text{н}} / S_{\text{т ном}}$;
- мощность конденсаторной батареи $Q_{\text{к}}^* = Q_{\text{к}} / S_{\text{т ном}}$.

В рассматриваемой СЭС можно выделить колебательный контур *LC*-контур относительно источника высших гармоник тока. В однофазном представлении схемы СЭС при пренебрежении активными сопротивлениями этот контур будет образован индуктивностями высшей и низшей обмотками трансформатора, индуктивностью линейной нагрузки и емкостью батареи конденсаторов. Расчет амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик колебательного контура показал, что в рассматриваемой схеме СЭС возможны резонансные явления на канонических гармониках n = 5, 7, 11, 13, … генерируемых трехфазным мостовым выпрямителем, при диапазоне мощностей конденсаторов $Q_{\text{к}}^*$, приведенных в табл. 1.

Таблица 1.

Мощности КБ, при которых возникают резонансные явления на гармониках n

n	5	7	11	13	17	19
$Q^*_{\text{к}}$, %	20,5 … 24	10,5 … 12,5	4,2 … 5	3 … 3,5	1,8 … 2,0	1,3 … 1,4

Более точное значение резонансной мощности $Q_к^*$, из приведенного в табл. 1 диапазона, определяется коэффициентом загрузки трансформатора $K_З$ = 0,1…0,35 мощностью линейной нагрузки.

По табл. 1 видно, что резонансные режимы наиболее вероятны на 5, 7, 11 и 13 гармониках.

Результаты моделирования. В трехфазной модели СЭСмоделировалось суточное изменение линейной нагрузки. Соответственно изменялась мощность КБ для поддержания cos φ > 0,93 на шинах 10 кВ.

При компьютерном моделировании оценивались по виртуальным измерительным приборам и через разложение в ряд Фурье:

- суммарный ток $I_{Σк}$ через КБ с последующим расчетом коэффициента перегрузки $K_п = I_{Σк} / I_{к ном}$;
- суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на секции шин линейной нагрузки.

Известно, что перегрузка конденсаторов не должна превышать 30 % ($K_п$ < 1,3), а значение коэффициента гармонических составляющих не должно превышать 5 % (K_U < 5 %).

Результаты моделирования возможных резонансных режимов для трансформаторов с расщеплением вторичной обмотки типового ряда номинальных мощностей, загруженных нелинейной нагрузкой, причастичной загрузки $P^*_d \approx 0,1$ и при допустимой загрузки вторичной обмотки трансформатора $P^*_d \approx 0,35$, сведены в табл. 2.

По табл. 2 видно, что в этих режимах коэффициент K_U выходит за допустимые пределы, а коэффициент $K_п$ имеет недопустимые значения при $P^*_d \approx 0,1$ на 11 и 13 гармониках, а при $P^*_d \approx 0,35$ на 7, 11 и 13 гармониках.

В работе [10] показано, что при загрузке трансформатора $P^*_d \approx 0,35$, но при подключении всех нагрузок к одной обмотке, величины коэффициентов $K_п$ и K_U превысили значения 2,5 и 20 %.

Таблица 2.

Результаты моделирования резонансных режимов

n	$Q^*_к$, %	$P^*_d \approx 0,1$		$P^*_d \approx 0,35$	
		K_U, %	$K_п$, о.е.	K_U, %	$K_п$, о.е.
5	22,5	5,5	1,1	12	1,26
7	10	6,7	1,15	12	1,67
11	4	6,9	1,38	10	1,55
13	2,8	9,6	1,8	12	1,66

Таким образом, разделение линейной и нелинейной нагрузок на разные секции шин, получающих питание от расщепленной вторичной обмотки трансформатора, улучшает оба показателя $K_п$ и K_U, но не позволяет полностью решить проблемы как с токовой перегрузкой КБ высшими гармониками, так и с качеством напряжения на шинах линейной нагрузки.

Одним из методов подавления высших гармоник с СЭС является установка дополнительных индуктивностей (антирезонансных реакторов), которые изменяют общее сопротивление резонансного контура с индуктивно-емкостного до индуктивного характера. Эти реакторы могут устанавливаться в различных точках СЭС, однако исходя из минимума мощности реакторов наиболее целесообразно их включение последовательно с конденсаторами.

Принятые VDEW (Association of German Power Supply Companies) частоты расстройки колебательного контура составляют 14 или 7 %, что соответствует индуктивному сопротивлениюреактора в долях от сопротивления КБ на промышленной

частоте ρ = 14 или ρ = 7 % [6]. Первый вариант применяется для защиты конденсаторов от всех гармоник, начиная с 3-й, второй – от всех гармоник, начиная с 5-й. Поскольку при работе трехфазного мостового выпрямителя отсутствуют гармоники кратные трем, для дальнейшего моделирования был принят вариант с частотой расстройки 7 %.

Результаты моделирования показали, что при включении реакторов с частотой расстройки ρ = 7 % в цепь конденсаторной батареи, токовая перегрузка конденсаторов высшими гармониками отсутствовала ($К_{пер}$ = 1), а напряжение на секции шин с линейной нагрузкой было практически синусоидально ($К_U \approx 0…1$ %).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Б.Н.* Методы компенсации провалов и искажений напряжения в электрических сетях нефтедобывающих предприятий / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев, А.Я. Шклярский // Нефтяное хозяйство, 2014. Т. 8. С. 110-112.
2. *Жеженленко И.В.* Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000.
3. *Костин В.Н.* Электроэнергетические системы и сети: Учебное пособие. — СПб.: Троицкий мост, 2015. — 304 с.: ил.
4. *Костин В.Н.* Компьютерное моделирование режимов работы систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой / В.Н.Костин, В.А. Сериков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки, 2019. Т. 25. № 1. С. 19–29.
5. *Фишман В.С.* Качество электроэнергии в руках проектировщика / Новости электротехники, 2004. №3(27).
6. *Шишкин С.* Защитные антирезонансные дроссели низковольтных конденсаторных батарей / Силовая электроника, 2007. №4.
7. *Шклярский Я.Э.* Способы уменьшения влияния высших гармоник на работу электрооборудования / Я.Э. Шклярский, А.Н. Скамьин // Записки Горного института, 2011, Т.189, С.121-124.
8. *Шклярский Я.Э.* Проблемы высших гармоник в сетях промышленных предприятий / Я.Э.Шклярский, А.Н.Скамьин // Електротехніка і електромеханіка, 2013. № 1, С. 69-71.
9. *Abramovich B.N.*, *Sychev Yu.A.* 2016 Problems of ensuring energy security for enterprises from the mineral resources sector/B.N.Abramovich *Journal of Mininig Institute* №217. С. 132-139.
10. *Kostin V.N.*, *Serikov V.A., Sherstennikova I.A.* 2019 Higher harmonics and limiting thereof in power supply systems of different *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 378 012051.
11. *Skamyin A.N.*, *Baburin S.V.* 2017 Algorithm for Selecting Cross-Capacitive Compensation Device Parameters with High Harmonics *Accounted For. International Journal of Applied Engineering Research* 12(6) 1049-1053.
12. *Skamyin A N.*, *Belsky A.A.* 2017 Reactive power compensation considering high harmonics generation from internal and external nonlinear load *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 87(3) 032-043.

УДК 621.9-115

КЛЮЧЕРЕВ Н.А.,
РАСТВОРОВА И.И.
Санкт-Петербургский горный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО СТАНКА С ЧПУ

Аннотация. В статье рассматривается конструкция ЧПУ станка, применимого для изготовления широкого спектра деталей робототехники. Путем аналитического расчета и компьютерной симуляции, определяется влияние конструкции станка в целом и его основных узлов на эксплуатационные и экономические качества. Предложен проект недорогого, универсального ЧПУ станка, обосновано его применение для прототипирования деталей робототехники и мехатроники.

Ключевые слова: ЧПУ, фрезерование, точение, 3D-печать, моделирование станков.

KLYUCHEREV N.A.,
RASTVOROVA I.I.
Saint-Petersburg Mining University

DESIGN AND MODELING OF A UNIVERSAL CNC MACHINE

Abstract. This work concerns the design of a CNC machine, usable for the manufacture of a wide range of robotic parts. The effect of the machines overall design, and that of its parts, on its performance and economic characteristics is determined by the way of calculation and computer modeling. A design is offered for an inexpensive, universal CNC machine. The use of such a machine for the manufacture of robotic and mechatronic parts is justified.

Keywords: CNC, milling, turning, 3D printing, machine modeling.

Исследование и разработка систем робототехники и мехатроники нуждаются в создании прототипов. Механические детали произвольной формы требуют обработки на дорогостоящих станках, чем обусловлена дороговизна создания прототипов. 3D-принтеры популярны в виду своей дешевизны и возможности создания произвольных форм из пластиков, однако такие детали уступают по своей прочности и точности металлическим деталям, произведенным вычитательными процессами.

Основная задача данной статьи в том, чтобы разработать проект экономически доступного станка, позволяющего создавать наиболее востребованные для робототехнических и мехатронных исследований металлические детали приемлемого качества.

Сначала, рассматриваются виды деталей, используемых в робототехнике. К таким деталям относятся болты, гайки, муфты, подшипники, шестерни, ремни, корпуса и каркасы машин, валы, и другие детали. Эти детали можно условно разделить на детали, которые практично купить у дистрибутора (в виду стандартной геометрии и широкого использования, что приводит к их дешевизне и доступности), и на детали, имеющие слишком специфичную геометрию для массового производства (т.е. детали, разработанные специально для определенного устройства или машины). Именно второй вид деталей является целью обсуждаемого станка, хотя при достаточной степени универсальности, производство стандартных метизов так же возможно.

Далее, рассматриваются виды операций, к которым можно свести изготовление обозначенных деталей. Условно еще раз разделим детали на те, которые можно

полностью описать проекцией на одну плоскость с указанием толщины, и на детали, имеющие в разных точках разную толщину. Первый вид деталей принято изготавливать на станках лазерной, гидроабразивной или плазменной резки, где заготовкой является лист или пластина материала. Для второго вида деталей используется точение, если деталь имеет заданные радиальные и угловые размеры, и фрезерование, если размеры преимущественно линейные. Фрезерование и точение могут быть объединены в одном станке при наличии как линейных, так и угловых осей перемещения. Наконец, мелкосерийные детали сложной формы, но не имеющие требований к точности и не несущие механической нагрузки, экономично выполнить на 3D-принтере, так как отпадает необходимость разрабатывать специальные молдинги и инструменты производства.

Теперь рассмотрим, какие требования к качеству станка имеются в случае применения обозначенных операций для производства деталей. 3D-принтеры не испытывают механической нагрузки на свой инструмент (экструдер), поэтому для них важна лишь скорость и точность линейного позиционирования инструмента относительно детали. Аналогично со станком лазерной резки. С другой стороны, операции фрезерования и точения предполагает возможность применения значительной силы инструментом к детали. Эта сила прикладывается постоянно в случае точения, и циклически в случае фрезерования. Воздействие этой силы наинструмента, подвижные ступени, основание станка, и на деталь, приводит к отклонению реального положения инструмента от заданного, что в свою очередь снижает точность изготовления и применимость детали к использованию.

Таким образом, первое требование к станку – возможность применить силы и моменты к инструменту и детали, тем самым обеспечив обработку детали. Второе требование – обеспечить точное позиционирование инструмента и детали во время обработки. Третье требование, обусловленное экономической осмысленностью применения станка – низкая стоимость как самого станка, так и работы на нем, отсутствие необходимости высокой квалификации оператора, что обеспечивается работой под ЧПУ. Четвертое требование, проистекающее из первого – обеспечить быстрое и безопасное выполнение станком работ по производству деталей, при наименьшем износе частей станка, что сокращает затраты на обслуживание.

На данный момент в индустрии разработаны, и широко применяются, несколько главных вариантов конструкции как для станков, так и для ступеней их движения – линейных и вращательных осей. В данной работе производится расчет эксплуатационных качеств станка в случае применения наиболее популярных вариантов конструкции, а так же рассчитываются обратная задача, т.е. габариты и приблизительная стоимость разных вариантов конструкции для обеспечения требуемых параметров. Определяется лучшая конструкция станка с точки зрения как эксплуатационных, так и экономических параметров.

Наконец, предложенный вариант конструкции станка проходит компьютерную симуляцию для более точного определения его свойств и для идентификации узлов конструкции, наиболее критичных для качества станка.

В будущем возможно экспериментальное подтверждение расчетных характеристик станка, расширение его возможностей, а так же разработка улучшенных методов управления технологическим процессом изготовления деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schipachev A.M.* 2019 The choice of an optimal technological process for mechanical treatment of machine components base on structural models *IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Science* 378 012070.
2. *Malviutov A.R., Zlotnikov E.G.* 2018 Optimization of cutting parameters for machining time in

turning process *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327 042069.
3. *Ershov D.Y., Zlotnikov E.G., Kobayankwe L.E.* 2017 Dynamic processes in technological systems of machining and the nature of their origin *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 87 082016.
4. *Chernysheva N.V.*, *Platovskikh M.J., Vetyukov M.M.* 2019 Frictional self-oscillations of the one – two degree of freedom systems *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1236 012054.
5. *Maksarov V.V., Krasnyy V.A., Viushin R.V.* 2018 Simulation of dynamic processes when machining transition surfaces of stepped shafts *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 327 022047.
6. *Frolov, V.Y., Ivanov, D.V., Belsky, R.A.* Increasing of operation security and of breaking capacity of surge arresters. Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017, 7910861, c. 1520-1523.
7. *Frolov, V., Petrov, G., Yushin, B., (...), Churkin, I., Ivanov, D.* Research and development of plasma technologies of spraying of coatings, 18th Symposium on Physics of Switching Arc, FSO 2009, c. 162-165.
8. *Frolov, V., Matveev, I., Ivanov, D., (...), Ushin, B., Petrov, G.* Experimental investigations of the hybrid plasma torch with reverse vortex stabilization, 2011 Romanian Reports of Physics, 56(SUPPL.), c. 36-40.
9. *Obraztsov, N.V., Frolov, V.Y.* A two-dimensional axisymmetric model of an AC arc // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, c. 430-432.
10. *Frolov, V.Y., Neelov, A.A., Zhiligotov, R.I., Bystrov, A.V.* Identification of the protection parameters of the local electrical network taking into account the detuning of the inrush current Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, c. 626-628.

УДК 004.582

КОТЕЛЕВА Н.И.,
ЖУКОВСКИЙ Ю.Л.
Санкт-Петербургский горный университет

ТЕХНОЛОГИЯ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ И АНАЛИТИКИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. Технологии дополненной реальности все чаще и чаще становятся неотъемлемой частью человеческой деятельности, показывая свою эффективность в разных сферах - от бытовых домашних систем до крупных промышленных предприятий.В данной работе показан вариант применения технологии дополненной реальности при обслуживании электрооборудования. Представлены основные функции системы дополненной реальности для обслуживания электрооборудования, показано решение вопроса интеграции программного приложения дополненной реальности с существующими системами автоматизации, а также описаны способы взаимодействия разрабатываемого программного модуля со сторонними модулями, например, различными аналитическими модулями и пр.

Ключевые слова: дополненная реальность, электрооборудование, техническое обслуживание.

KOTELEVA N.I.,
ZHUKOVSKY Y.L.
Saint-Petersburg Mining University

AUGMENTED REALITY TECHNOLOGY AS A TOOL TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF MAINTENANCE AND ANALYTICS OF THE OPERATION OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT

Abstract. Augmented reality technologies are increasingly becoming an integral part of human activity, showing their effectiveness in various fields - from smart home systems to big industrial enterprises. This paper shows an application of augmented reality technology in the maintenance of electromechanical equipment. The basic functions of the augmented reality system for maintenance of electrical equipment are presented, a solution to the issue of integrating an augmented reality software application with existing automation systems is shown, and ways to interact the developed software module with third-party modules (for example, various analytical modules) are described.

Keywords: augmented reality, electromechanical equipment, maintenance.

Исследовательская компания Gather [1] в своих последних отчетах указывают технологии дополненной и виртуальной реальности как технологии, которые прошли «пик ожиданий» и в течении 5-10 лет начнут внедряться на предприятиях. Для реализации столь оптимистичных прогнозов необходимо решить ряд вопросов: определить круг задач, которые можно решать с помощью систем дополненной реальности, разработать универсальную методику внедрения систем дополненной реальности решить вопросы интеграции с существующими системами, выявить наиболее эффективный способ внедрения технологий дополненной реальности (например разрабатывать их как отдельный программный модуль, а потом решать вопросы интеграции, либо сразу их

разрабатывать как отдельную часть или дополнительный модуль существующих систем автоматизации) и т.д.

В представленной работе показан опыт создания отдельного программного приложения с использованием технологии дополненной реальности для обслуживания электромеханического оборудования, показаны вопросы интеграции данного модуля, определены круг решаемых задач, а также описаны способы взаимодействия разрабатываемого программного модуля со сторонними модулями, например,различными аналитическими модулями и пр.

Разработка системы дополненной реальности проводилась для установки «Умный щит» лаборатории Санкт-Петербургского горного университета. Разработка системы велась в несколько стадий:

1. Разработка функционала системы;
2. Создание ПО;
3. Настройка канала связи для интеграции модуля дополненной реальности и системы автоматизации, работающей на оборудовании;
4. Настройка канала связи для связи модуля дополненной реальности и аналитического модуля;
4. Разработка методики тестирования системы и проведение тестирования;
5. Разработка программной части для обеспечения видео и аудио связи с экспертом.

В системе разрабатывались и тестировались несколько функций, основными из которых являются:

1. Визуализация действий пользователя (проверялось в трех формах – в виде видеофайла, на сборной 3D-модели, отображаемой поверх обслуживаемой детали, в форме подсвечивания (выделения светом и цветом на реальном объекте) деталей, которые требуют внимания обслуживающего персонала (например, подсветить болты, которые необходимо выкрутить и нужный тип инструмента)
2. Отображение параметров процесса – параметры процесса в режиме реального времени и их значения в истории (в виде трендов или таблиц)
3. Отображение экспертных советов или подсказок бегущей строкой
4. Возможность видеосвязи с экспертом напрямую (организация единого окна просмотра для эксперта и сервисного инженера)
5. Возможность аудио связи с экспертом.
6. Вывод информации сторонних приложений и программных модулей (аналитики, документации сервисной информации и пр.).

Разработка программного приложения дополненной реальности велась в программной среде Unity (UnityTechnologies) с установленной платформой Vuforia (Qualcomm). Данное программное обеспечение может быть заменено на любое другое ПО так как в структуре системы в целом была заложена модульность, позволяющая интегрировать различные программные приложения. На рис. 1 представлена структурная схема системы. Интеграция между системой дополненной реальности и объектом («Умный щит») производится путем использования протоколов OPC и MQTT. Также для создания и ведения архива значений параметров системы используется SQL сервер.

На рис. 2 представлен внешний вид работы модуля дополненной реальности. Показано окно визуализации параметров (Активная мощность, действующий ток, действующие значение фазного напряжения) с возможностью просмотра значений других параметров, трендов, а также возможностью управлять автоматическим выключателем iC60N. Также пользователем выделена опция изображать 3D-модель устройства для детализации особенностей управления автоматическим выключателем.

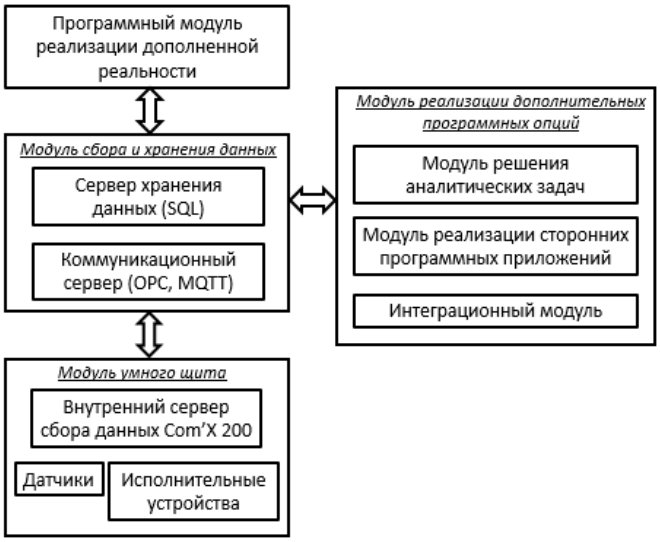


Рисунок 1 - Структурная схема системы

Рисунок 2 - Структурная схема системы. Внешний вид работы модуля дополненной реальности

Для тестирования системы использовалась следующая методика:

1. Разрабатывались задачи для тестирования. Примерами задач являются: выполнить монтаж/демонтаж оборудования, проверка исполнения команд диспетчера по месту, поиск причины неисправности оборудования (работа с историческими данными системы), программное отключение устройств (отработка аналитических функций) и пр.
2. Формировалась команды тестировщиков. Для тестирования созданных программных алгоритмов использовались 4 группы людей – 1-я группа - группа, которой разрешалось пользоваться только документацией на бумажном носителе или интернетом, 2-я группа – группа которая могла пользоваться только подсказками и функционалом, введенными в систему, 3-я группа – группа которая могла пользоваться внутренними подсказками и функционалом, а также при необходимости помощью эксперта, 4-я группа – группа могла пользоваться только помощью эксперта.
3. Для каждой группы тестировщиков фиксировалось время выполнения каждой задачи
4. Анализ результатов.

Основываясь на указанной выше методике было проведено тестирование разработанных алгоритмов. По результатам исследования можно сделать вывод, что в процессе тестирования группа, которая пользовалась только помощью эксперта решала поставленные задачи дольше чем группа, которая пользовалась только инструкцией и интернетом. Виной тому явился психологический фактор – тестировщики сначала пытались решить задачу самостоятельно, и только в случае неудачи обращались к помощи

эксперта. Поэтому решено было добавить группу для тестирования 5 которая решала задачу сразу же пользуясь помощью эксперта. Однако, данная группа была введена только лишь для получения результата во всем спектре возможных вариантов, в том числе в процессе выполнения задач только под руководством эксперта. В реальности же постоянное привлечение эксперта для решения даже простейших задач не сможет повысить эффективность проведения техобслуживания поскольку потребует не только новую систему, но и новые ресурсы в виде постоянно дежурившего эксперта, что безусловно является не лучшим решением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-appear-on-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2019/
2. *Котелева Н.И., Жуковский Ю.Л., Козак Р.А.* Технология дополненной реальности как средство повышения безопасности промышленных производств / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2019. № S7. С. 117-129.
3. *Zhukovskiy Y.L., Vasilev B.U., Koteleva N.I.* 2017 Quality estimation of continuing professional education of technical specialists *Proceedings of the 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", IT and QM and IS 2017* 704-707.
4. *Жуковский Ю.Л., Котелева Н.И.* Управление программой технического обслуживания и ремонта электромеханического оборудования на основе интегрированной информационно-аналитической системы / Промышленная энергетика, 2017. № 7. С. 14-20.
5. *Zhukovskiy Y., Koteleva N.* 2018 Development of augmented reality system for servicing electromechanical equipment *Journal of Physics: Conference Series International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 - Enterprise Information Systems* 042068.
6. *Makhovikov A.B., Katuntsov E.V., Kosarev O.V., Tsvetkov P.S.* 2019 Digital transformation in oil and gas extraction Innovation - Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects *11th conference of the Russian-German Raw Materials* 531-538.
7. *Kazanin O.I., Sidorenko A.A.* 2017 Interaction between gas dynamic and geomechanical processes in coal mines *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 12 (5) 1458-1462.
8. *Ivanov A.V., Smirnov Y.D., Petrov G.I.* 2018 Investigation of waste properties of subway construction as a potential component of soil layer *Journal of Ecological Engineering* 19(5) 59-69.
9. *Крюков О.В., Серебряков А.В.* Анализ результатов прогнозирования технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов / ЭСиК, 2016. №1(30). С.39-44.
10. *Устинов Д.А., Бабанова И.С.* Обоснование выбора ценовой категории оплаты за электроэнергию с учетом потребителей-регуляторов / Промышленная энергетика, 2016. №11. С. 9-16.
12. *Абрамович Б.Н., Бабанова И.С.* Система прогнозирования энергопотребления с применением искусственной нейронной сети / Горные науки и технологии. - М.: МИСиС, 2016. №2. С. 66-77.
13. *Бабанова И.С., Устинов Д.А.* Разработка модели искусственной нейронной сети с целью управления и прогнозирования режимов энергопотребления предприятий минерально-сырьевого комплекса / Электроэнергетика глазами молодежи - 2016: материалы VII Международной научно-технической конференции, 19–23 сентября 2016, г. Казань. − В 3 т. Т.2. – Казань: Казан.гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 47-50.
14. *Korolev N.A. and Solovev S.V.* 2016 AC motor diagnostics system based on complex parametric analysis *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 177(1) 012007.

15. *Жуковский Ю.Л., Королев Н.А., Бабанова И.С.* Оценка технического состояния и остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем / «Горное оборудование и электромеханика».
16. *Pashkov E.N., Martyushev N.V., Masson I.A.* 2014 Vessel ellipticity and eccentricity effect on automatic balancing accuracy *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 66(1) 012011.

УДК 621.316.13

КРЫЛЬЦОВ С.Б.,
СОЛОВЬЁВ С.В.,
КОРОБИЦЫНА М.А.
Санкт-Петербургский Горный Университет

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается применение искусственных нейронных сетей в системах управления силовым оборудованием и устройствами релейной защиты и автоматики в качестве алгоритмов, определяющих режим работы трёхфазной распределительной сети среднего уровня напряжения. В работе приводится пример построения архитектуры нейросети на основе перцептрона, который затем обучается на искусственно сгенерированных сигналах, моделирующих работы сети в условиях несимметрии и несинусоидальности питающего напряжения. На основе моделирования работы обученной нейросети выявлены зависимости точности и требования к вычислительными ресурсам нейросети в зависимости от размера окна, на котором анализируются сигналы токов и напряжений.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть; перцептрон; качество электроэнергии; цифровая обработка сигналов.

KRYLTCOV S.B.,
SOLOVEV S.V.,
KOROBICYNA M.A.
Saint-Petersburg Mining University

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS TO DETERMINE THE OPERATION MODES OF MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION GRIDS

Abstract. The paper discusses the use of artificial neural networks in control systems of power equipment and relay protection devices as algorithms that determine the operation mode of a three-phase distribution network of medium voltage level. The paper gives an example of constructing a neural network architecture based on a perceptron, which is then trained on artificially generated signals that simulate the grid operating in conditions of asymmetry and distorted waveforms of the supply voltage. Based on the simulation of the trained neural network, dependencies of accuracy and requirements for the computing resources of the neural network are revealed depending on the window size on which the signals of currents and voltages are analyzed.

Keywords: artificial neural network, perceptron, power quality, digital signal processing.

Определение режимов работы распределительных сетей среднего уровня напряжения является одной из ключевых задач в системах электроснабжения предприятий [1, 2]. Аварийными режимами работы таких сетей наиболее часто являются несимметричные режимы работы с гармоническими искажениями фазных токов и напряжений [3, 4]. При выявлении аварийных режимов работы электросети в кратчайшее время должна формироваться реакция устройств релейной защиты и автоматики, силового оборудования, предназначенного для обеспечения требуемого качества электроэнергии, а также силового оборудования нагрузки [5]. Сокращение времени реакции на изменение

режимов работы сети позволяет уменьшить негативные последствия аварийных режимов работы сети для силового оборудования [6, 7].

Быстродействие современных силовых устройств и устройств релейной защиты и автоматики в значительной степени зависит от быстродействия алгоритмов, применяемых в их системах управления. Для выявления режимов и параметров работы трёхфазной электрической сети в системах управления необходимо определить средние и колебательные составляющие токов, напряжений, мгновенной мощности для основной и высших гармоник, а также составляющие прямой и обратной последовательности.

Для определения спектрального состава токов, напряжений и составляющих мгновенной мощности чаще всего применяются алгоритмы на основе преобразования Фурье либо каскадные цифровые фильтры, которые основываются на анализе параметров сигнала на значительном периоде (до 20 мс для частоты напряжения сети 50 Гц) [8]. Определение составляющих прямой и обратной последовательности зачастую реализуется на основе цифровых линий задержки сигнала на четверть периода (5 мс для частоты напряжения сети 50 Гц) [9]. Вносимая алгоритмами задержка реакции оказывает негативное влияние на способность силовых устройств быстро реагировать на изменение режима работы сети. Например, электропривод в условиях провалов напряжения при одно- и двухфазном коротком замыкании в сети в среднем может проработать до момента срабатывания защиты по напряжению звена постоянного тока до 2-5 электрических периодов. Перевод системы управления инвертором в режим работы в ослабленном поле может существенно увеличить время работы установки до срабатывания защиты и таким образом не отключаться от сети [10]. Однако, такой подход эффективен только при своевременной реакции на изменение режима работы питающей сети, так как задержка на один электрический период существенно снижает запас энергии в конденсаторах звена постоянного тока и уменьшает возможное время работы электропривода в условиях провалов напряжения.

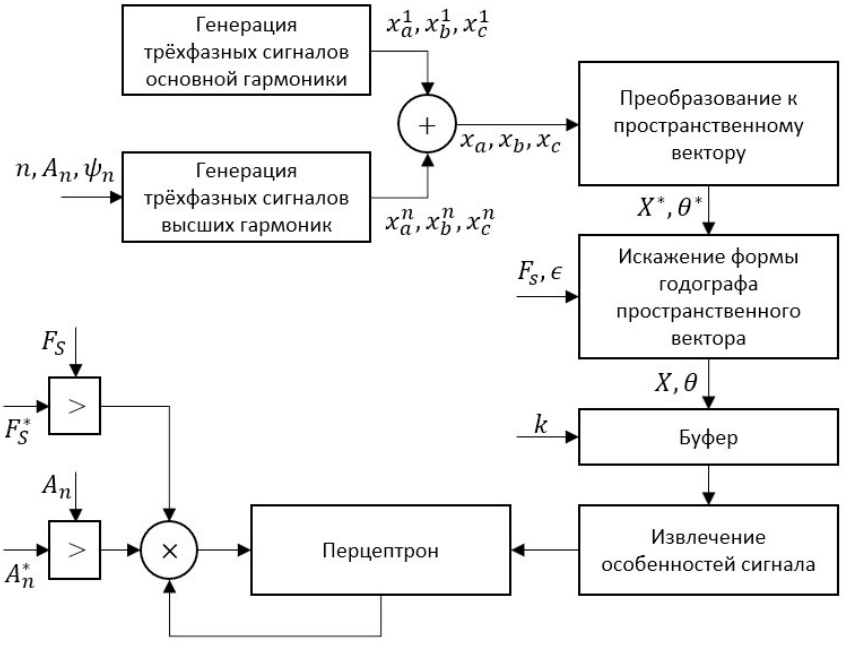


Рисунок 1 – Структурная схема системы обучения нейронной сети для определения изменения режимов работы сети

Задача определения состояния системы по сигналам, формируемым системой на определённом периоде, является типичной задачей кластеризации [11]. В свою очередь уменьшение размера окна, на котором рассматриваются значения сигналов, является задачей предсказания состояния системы и позволяет уменьшить время реакции систем

управления на изменение режимов работы сети. Обе задачи в информационных системах успешно решаются с помощью перцептронов [12, 13]. В работе показано формирование архитектуры искусственной нейронной сети на основе перцептрона и дальнейшее её обучение на сгенерированных сигналах, моделирующих работу трёхфазной электросети в условиях гармонических искажений токов и напряжений, а также несимметричных режимов работы, обусловленных короткими замыканиями в питающих линиях. Структура системы для обучения перцептрона на рис. 1.

Система обучает перцептрон на активацию в зависимости от превышения порогового значения амплитуды высшей гармоники либо коэффициента несимметрии фазных сигналов. Для этого в системе генерируются сигналы фазных напряжений основной гармоники с мгновенными значениями x_a^1, x_b^1, x_c^1, фазные сигналы гармонических искажений с мгновенными значениями x_a^n, x_b^n, x_c^n, получаемые на основе принимаемых на вход системы значений порядка высшей гармоники n, её амплитуды A_n и начальной фазы ψ_n. Полученные сигналы суммируются и переводятся в соответствии с преобразованием Кларк [14] в координаты пространственного вектора, расположенного в двухфазной ортогональной системе координат αβ, из которых определяется амплитуда X^* и угол θ^* пространственного вектора $\underline{x}^*$ трёхфазной системы. Несимметрия сигналов моделируются на основе определения параметров годографа пространственного вектора основной гармоники и преобразования его к эллипсу с коэффициентом формы F_s, характеризующим соотношение между большой и малой осями эллипса, и углом наклона ε, которые позволяют регулировать коэффициент несимметрии генерируемого сигнала, а также в дальнейшем используются для определения типа несимметричного режима работы сети. Сформированные мгновенные значения амплитуды X и угла поворота θ прострaственного вектора $\underline{x}$ с искажённым годографом сохраняются в буфер, вмещающий k измерений, формирующий скользящее окно, которое и служит входными данными для перцептрона.

На основе пороговых значений амплитуды высшей гармоники A_n^* и коэффициента формы эллипса F_s^*, являющихся заданиями для системы, определяется требуемое значение активационной функции перцептрона, которое сравнивается с фактическим и приводит к изменению весовых коэффициентов искусственной нейросети. Обучение нейросети было производится для различных значений размера буфера, частоты дискретизации сигналов, внесения сигналов нескольких гармоник, а также с добавлением ограничений на размер модели. Работа обученной нейросети моделируется в условиях зашумлённости сигналов с датчиков токов и напряжений, переходных и установившихся режимах работы трёхфазной сети [15]. По итогам моделирования приведены рекомендации по использованию нейросетей на основе перцептрона в качестве алгоритмов быстрого определения режима работы распределительных сетей среднего уровня напряжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шклярский Я.Э.* Оценка добавочных потерь мощности в электрических сетях с нелинейной и несимметричной нагрузкой / Я.Э. Шклярский, А.А. Белицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. № 7. С. 86-93.
2. *Veprikov A.A.*, *Abramovich B.N.* 2019 Prospects for IGBT application in electrical power converters for industrial high-current DC loads *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 560(1) 1-6.
3. *Муньос-Гихоса Х.М.* Применение активного выпрямителя в качестве компенсатора токов искажений в распределительных сетях 6-10 кВ / Х.М. Муньос-Гихоса, С.Б. Крыльцов, С.В. Соловьев // Записки горного института, 2019. 236. С. 229-238.
4. *Eluvathingal A.V., Swarup K.S.* 2017 Instantaneous symmetrical components based microgrid interface protection relay *7th International Conference on Power Systems (ICPS)* 1 398-403.

5. *Solovev S.V., Bardanov A.I.* 2018 Efficiency estimation method of three-wired AC to DC line transfer *Journal of Physics: Conference Series* 1015(3) 1-6.
6. *Shklyarskiy J.E., Bardanov A.I.* 2018 Improving of active rectifier VOC technique for unbalanced power grid *Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers, April 18-20. 2018* 1 277-284.
7. *Шклярский Я.Э.* Компенсация провалов напряжения частотно-регулируемого привода на основе использования Z-инвертора / Я.Э. Шклярский, Р.А. Салов, С.В. Соловьев // Известия Тульского государственного университета. Техническиенауки, № 9. С. 560-569.
8. *Ahmed H., Amamra S.A., Salgado I.* 2018 Fast estimation of phase and frequency for single-phase grid signal *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66(8) 6408-6411.
9. *Hao T., Gao F., Xu T.* 2018 Fast Symmetrical Component Extraction From Unbalanced Three-Phase Signals Using Non-Nominaldq-*Transformation IEEE Transactions on Power Electronics* 33(11) 9134-9141.
10. *Шонин О.Б.* Обеспечение работоспособности асинхронного частотно-регулируемого электропривода с векторной системой управления при провалах напряжения сети / Шонин О.Б., Новожилов Н.Г. // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции: Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017, 2017. №1. С. 181-185.
11. *Wang S., Chen H.* 2019 A novel deep learning method for the classification of power quality disturbances using deep convolutional neural network *Applied energy* 235 1126-1140.
12. *Sridhar S., Rao K.U., Jade S.* 2016 Detection and classification of power quality disturbances in the supply to induction motor using wavelet transform and neural networks *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* 4(1) C. 37-45.
13. *Ehsan R.M., Simon S.P. Venkateswaran P.R.* 2017 Day-ahead forecasting of solar photovoltaic output power using multilayer perceptron *Neural Computing and Applications* 28(12) 3981-3992.
14. *Aboutanios E.* 2017 An adaptive Clarke transform based estimator for the frequency of balanced and unbalanced three-phase power systems *2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)* 1 1001-1005.
15. *Thirumala K., Jain T., Umarikar A.C.* 2017 Visualizing time-varying power quality indices using generalized empirical wavelet transform *Electric power systems research* 143 99-109.

УДК 621.311

ЛАВРИК А.Ю.,
БУЛДЫСКО А.Д.,
ЖУКОВСКИЙ Ю.Л.
Санкт-Петербургский горный университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УПРАВЛЕНИИ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЭНЕРГОСИСТЕМ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Аннотация. В работе рассмотрены цифровые технологии, развитие которых непосредственным образом влияет на основные этапы жизненного цикла энергетических систем горных предприятий, включающих возобновляемые источники энергии. Особое внимание уделено этапу проектирования системы генерации, интеллектуальным алгоритмам прогнозирования электрической нагрузки, оптимизации режимов работы системы, а также её утилизации. Работа содержит результаты имитационного моделирования энергетического баланса энергетического комплекса на протяжении его жизненного цикла, выполненного в среде MATLAB Simulink.

Ключевые слова: электростанция; нагрузка; прогнозирование; нейронная сеть; оптимизация; электропотребление; спрос; умные сети.

LAVRIK A.Y.,
BULDYSKO A.D.,
ZHUKOVSKIY Y.L.
Saint-Petersburg Mining University

USE OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE LIFE CYCLE MANAGEMENT OF MINING ENTERPRISES POWER SYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

Abstract. The paper considers digital technologies, the development of which directly affects the main stages of the life cycle of mining enterprises power systems, including renewable energy sources. Particular attention is paid to the design stage of the generation system, intelligent algorithms for predicting the electrical load, optimizing the operating modes of the system, and its remove. The work contains the energy balance simulation results of the powersystem during its life cycle, performed in the MATLAB Simulink.

Keywords: power station; load; forecasting; neural network; optimization; power consumption, demand; smart grid.

Введение.

В настоящее время децентрализованное электроснабжение, по разным оценкам,охватывает от 60 до 70% территории России [1]. В основном это регионы Дальнего Востока, Арктики, и Сибири. Природные богатства этих территорий привели к строительству большого числа горнодобывающих предприятий и рабочих посёлков, зачастую – в суровых климатических условиях и в сотнях километров от цивилизации. Многие их этих добычных предприятий через несколько десятков лет остановили свою работу, например, угледобывающий разрез «Новиковский» на о. Сахалин, или флюоритовый рудник в Амдерме Архангельской области, однако оставшиеся рабочие посёлки не исчезли с карты. Реконструкция энергетических комплексов данных поселений

привела к появлению в России одних из первых ветро-дизельных комплексов и способствовала увеличению доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в нашей стране. Вместе с тем, в наше время успешно функционируют многие удалённые горнодобывающие предприятия, а также реализуются новые крупномасштабные проекты, требующие создания новых энергетических систем [2].

В большинстве случаев для выработки электроэнергии в автономных системах электроснабжения, при отсутствии собственного пригодного источника ископаемого топлива, используется привозной дизель [3]. Стоимость вырабатываемой электроэнергии крайне высока как за счёт отпускной цены на оптовых базах, так и за счёт транспортной составляющей, достигающей порой 70% конечной стоимости поставки [4-6]. Эти факторы делают целесообразным рассмотрение в качестве вспомогательного или основного источника электроэнергии ВИЭ. Так, в 2018 году компанией «Полиметалл» была возведена первая фотоэлектрическая станция, снабжающая электроэнергией месторождение.

Рассмотрение вопросов проектирования, возведения, эксплуатации, утилизации энергетических комплексов горных предприятий, включающих ВИЭ, является комплексной задачей, направленной на улучшение основных технико-экономических параметров проекта. Особую роль в планировании жизненного цикла таких систем играют цифровые технологии [7].

Проектирование.

Строительство электростанции на базе ВИЭ, как правило, осуществляется путём внедрения в существующую систему генерации, образованную действующей тепловой электростанцией. Таким образом, известны основные исходные данные для проектирования электростанции: параметры дизель-генераторов или газотурбинных агрегатов, графики электрических нагрузок потребителей и т.д.

Обоснование состава ВИЭ может осуществляться с помощью специализированных компьютерных программ, таких, как iHOGA или HOMERPro, позволяющих работать с фотоэлектрическими панелями, ветрогенераторами, микро-ГЭС, накопителями энергии, дизель-генераторами и водородными накопителями [8]. Вместе с тем, если требуются более гибкиевозможности выбора режимов работы будущей системы, можно использовать другие методы: генетический алгоритм, метод градиентного спуска и т.д. Так, на рис. 1 представлены результаты расчёта основных технико-экономических параметров энергетического комплекса: стоимости жизненного цикла, капитальных затрат, себестоимости электроэнергии, годового расхода топлива и годовых выбросов углекислого газа. Оптимизация осуществлялась методом градиентного спуска [9].

Особое внимание нужно уделять наличию технических ограничений, которые могут быть обусловлены суровостью климата, транспортной удалённостью и т.д.

Стоит также отметить, что уже на этапе проектирования должны быть определены основные режимы работы электростанции, поскольку от них зависит и результат решения задачи оптимизации состава генерирующего оборудования.

Эксплуатация.

Устойчивый курс на цифровизацию всех производственных процессов привёл к появлению «цифровых двойников» – копий реальных физических объектов, способных фактически в режиме реального времени повторять их характеристики. Это открывает широкие возможности как для совершенствования алгоритмов работы энергетической системы, так и для диагностики её неполадок [10].

Другой важной и динамично развивающейся технологией является прогнозирование электропотребления с помощью искусственных нейронных сетей [11]. Прогнозирование позволяет оптимизировать режимы работы оборудования и улучшить технико-экономические параметры функционирования системы электроснабжения [12]. На рис. 2 показан результат прогнозирования «на час вперёд», полученный с помощью модели искусственной нейронной сети, реализованной в программном пакете MATLAB.

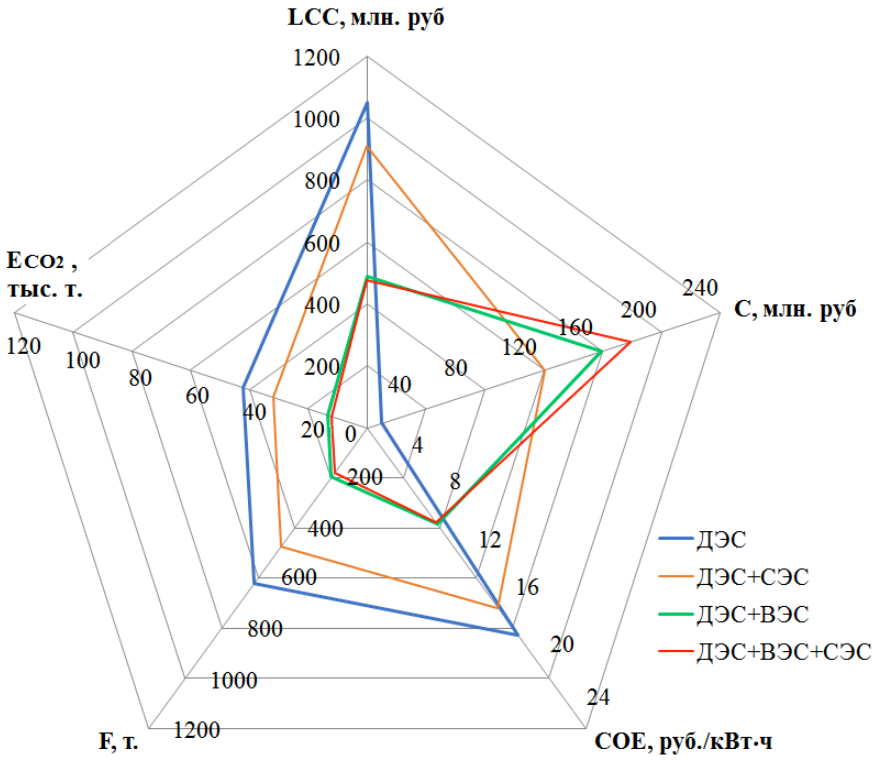


Рисунок 1 - Оптимизация состава генерирующего комплекса с ВИЭ

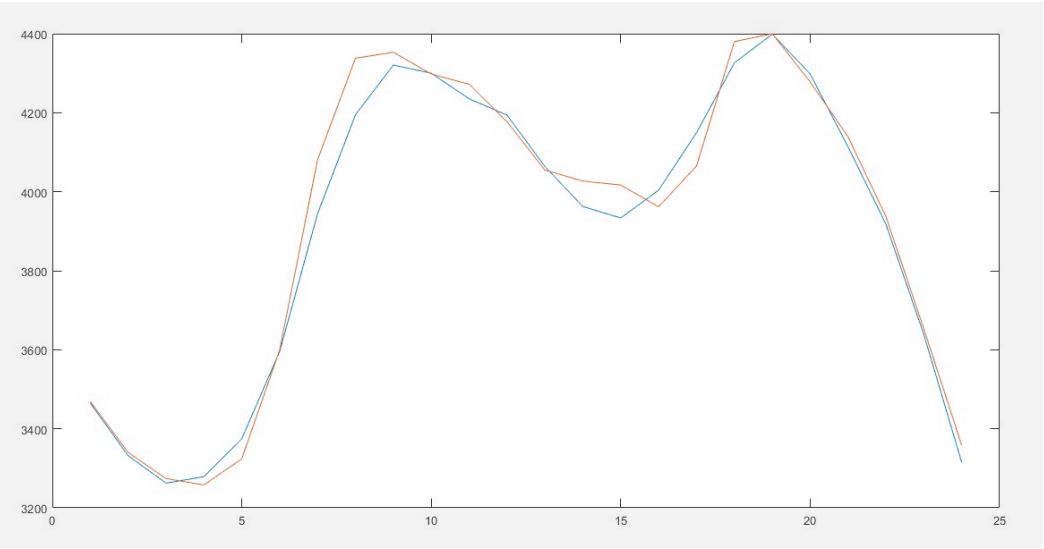


Рисунок 2 - Результат прогнозирования электропотребления «на час вперёд» с помощью модели искусственной нейронной сети, реализованной в программном пакете MATLAB

Наконец, ещё одной технологией, получающей стремительное распространение во всём мире, становится управление спросом на электроэнергию [13]. При этом происходит перемещение допустимой величины электрической нагрузки в другую зону графика потребления таким образом, чтобы обеспечить минимальную себестоимость вырабатываемой электроэнергии, что в рассматриваемом случае означает меньший расход ископаемого топлива. Данная цифровая технология реализуема только при условии прогнозирования потребления электроэнергии.

Реконструкция или модернизация.

Энергетическая система горных предприятий и других потребителей электроэнергии является гибкой системой, что обусловлено вводом и выводом производственных мощностей, в случае с добывающей промышленностью – подвижным

фронтом горных работ и т.д. Эти и другие факторы обуславливают возможность внесения изменений в существующую схему электроснабжения. Поэтому в процессе эксплуатации может возникнуть необходимость вывода, ввода в строй или замены части генерирующего оборудования.

Утилизация.

Отдельное внимание в работе уделено этапу утилизации энергетического оборудования предприятия [14, 15]. Расходы на утилизацию объектов в обязательном порядке должны учитываться при проектировании системы, поскольку оборудование ВИЭ имеет ограниченный срок эксплуатации, а его эффективность по мере приближения к концу жизненного цикла падает.

Вывод.

Цифровые технологии, используемые в управлении жизненным циклом энергосистем с ВИЭ, позволяют многократно ускорить решение задач, стоящих на этапе проектирования, строительства, эксплуатации и утилизации комплекса. Основными проблемами, препятствующими широкому развитию технологий, являются ограниченные инвестиции и нехватка квалифицированных кадров, в том числе на местах – для осуществления оперативного ремонта и обслуживания ВИЭ и различных интеллектуальных устройств электромеханики.

Вместе с тем, моральный и физический износ большей части эксплуатируемых в настоящее время в удалённых уголках России дизельных электростанций создаёт благоприятные возможности не только для модернизации, но и для существенного изменения структуры электроэнергетического хозяйства – создания интеллектуальных систем генерации, передачи и распределения электроэнергии. Можно сделать вывод о том, что SmartGrid и весь комплекс входящих в это понятие технологий способен не просто повысить надёжность и качество электроснабжения, но и вывести его на совершенно новый уровень.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Асманкин Е.М.* К вопросу развития энергосберегающих технологий в АПК / Е.М. Асманкин, С.В. Юмакаева, М.Б. Фомин и др. // Известия Оренбургского аграрного государственного университета, 2012. №34-1. С. 77-79.
2. *Makhovikov A.B., Katuntsov E.V., Kosarev O.V., Tsvetkov P.S.* 2019 Digital transformation in oil and gas extraction Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects *11th conference of the Russian-German Raw Materials* 531-538.
3. *Лукутин Б.В.* Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. - М., 2008. – 231 с.
4. *Лукутин Б.В.* Ветроэлектростанции в автономной энергетике Якутии. / Б.В. Лукутин, В.Р. Киушкина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. - 202 с.
5. *Дубровин Е.А., Дубровин И.А.* Как снизить затраты на углеводородное топливо в Арктике // Энергетика и промышленность России, 2018. №01-02. С. 32-33.
6. *Смоленцев Д.О.* Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации / Арктика: экология и экономика, 2012. №3 (7). С. 22-29.
7. *Яковлева Э.В.* Анализ перспектив регионального развития интеллектуальных энергетических систем / Э.В. Яковлева, Е.В. Сизякова, П.В. Иванов, Ю.Л. Жуковский, Т.В. Пудкова // Российский экономический интернет-журнал, 2018. №2. С. 107.
8. *Мирошниченко А.А.* Сравнительный анализ систем управления гибридными энергокомплексами на базе ВИЭ в программе HOMER / А.А. Мирошниченко, А.З. Кулганатов, Е.М. Гордиевский, В.И. Станчаускас // COLLOQUIUM-JOURNAL, 2019. №25-2(49). С. 65-69.
9. *Лаврик. А.Ю.* Определение оптимального состава резервируемой гибридной ветро-солнечной электростанции / А.Ю. Лаврик, Ю.Л. Жуковский, Н.А. Максимов //

Промышленная энергетика, 2019. №10. С. 47-53.
10. *Zhukovskiy Y.L., Starshaia V.V., Batueva D.E., Buldysko A.D.* 2019 Analysis of technological changes in integrated intelligent power supply systems. Innovation - Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects - *11th conference of the Russian-German Raw Materials, 2018 11th*. 249-258.
11. *Абрамович Б.Н.* Система прогнозирования энергопотребления с применением искусственной нейронной сети / Б.Н. Абрамович, И.С. Бабанова // Горные науки и технологии. - М.: МИСиС, 2016. №2. С.66-77.
12. *Устинов Д.А.* Обоснование выбора ценовой категории оплаты за электроэнергию с учетом потребителей-регуляторов / Д.А. Устинов, И.С. Бабанова // Промышленная энергетика, 2016. №11. С. 9-16.
13. *Conteh F., Tobaru S., and Howlader H.O.R.* 2017 Energy management systems for hybrid distributed generation sources in grid connected and stand-alone micro-grids *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 9(6).
14. *Василенко Д.М.* Экологические аспекты производства, эксплуатации и утилизации солнечных батарей / Д.М. Василенко, М.А. Некрасова // Техника и технология, 2011. №4. С. 49-56.
15. *Павлов Д.В.* Анализ эффективности утилизации устаревших ветрогенераторов / Промышленная энергетика, 2017. №12. С. 54-56.

УДК 621.316.969

ЛАНЦЕВ Д.Ю.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

РЕАЛИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННОЙ ЦИФРОВОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА КОНТРОЛЛЕ РАХПРИСОЕДИНЕНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Аннотация. В статье представлены основные идеи тепловой защиты контактной сети (ТЗКС)и обосновывается ее применение для городского электротранспорта, описан алгоритм реализации современной цифровой ТЗКС.Предложена математическая модель тепловой защиты. Проведены испытания математической модели, путем написания программы реальной ТЗКС, на языке Си. Данные испытания проводились на серийном контроллере присоединения от ООО «Импульс-автоматика», установленном на тяговой подстанции постоянного тока для электрического городского транспорта.

Ключевые слова: тепловая защита контактной сети; релейная защита; современная телемеханика; оборудование тяговых подстанций.

LANTSEV D.Y.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

IMPLEMENTATION OF MODERN DIGITAL THERMAL PROTECTION OF THE CONTACT NETWORK ON THE CONNECTION CONTROLLERS OF TRACTION SUBSTATIONS

Abstract. The paper presents the main ideas of thermal protection of the contact network and justifies its usability for urban electric transport, describes the algorithm of implementing modern digital network protection. The mathematical model of thermal protection is proposed. Tests of the mathematical model were performed by writing a program of real protection on the C programming language. These tests were carried out on a bay controller from "Impulse-automation" company, installed on a direct currenttractionpowersubstationfor electric urban transport.

Keywords:thermal protection of the contact network; relay protection; modern telemechanics; equipment of traction power substations.

Now days, in all modern traction power substations the digital electronic equipment is used. The most common bay controllers of the middle level are based on microcontrollers with the core ARM Cortex-M4 or DSC controllers Texas Instruments [1]. Their use is economically justified due to the fact that they can confidently support the real-time operating system for example FreeRTOS. Bay controllers are assigned the tasks of horizontal communication with other bay controllers and vertical communication, as well as communication with the low and up level.

At the middle level of the digital substation system, it is necessary to record emergency waveforms for subsequent download and analysis of the accident development in accordance with IEC 60255-24 Ed.2, for example, in the publication [2-3], oscillograms are obtained as the result of modelling the operation of telemechanics relay.

Usually, bay controllers have many protections, for example such as current protection, differential protection and also very useful is the thermal overheating protection. The function of

thermal protection of the contact network, otherwise-protection against small short-circuit currents, is designed to switch off the bay when approaching the design temperature of the contact wire to the annealing temperature of copper.

The controller continuously measures the load current of the feeder and calculates the probable temperature of the contact wire on its basis. When the wire temperature limit is reached, the controller produces unconditional disconnection of the circuit breaker. Disconnection is performed regardless of the selected mode on the bay local control mode or telemechanics control mode. So, the object of research in that paper is the thermal protection of contact network. The subject of research is the optimized method of calculation critical temperature that can be used on the microcontroller.

Also, for effective working as system modern bay controller must support IEC 60870-104 and IEC 61850 protocols. IEC 61850 requires a file describing the capabilities of the device in ICD format, with proper programming, the device reads the configuration fromit, which is a more flexible solution than static compilation of a given configuration, since during operation it is possible to change the peripheral modules, and also allows you to create a single firmware for the entire line of devices. In paper [4] describes an abstract model of the system in accordance with IEC 61850, as well as both GOOSE and MMS communication protocols. In order to realise this features we need to have reliable file system on over embedded controller. The methods of increasing reliability of external SPI flash you can see in my previous paper [5].

There are some articles about thermal protection [6-10]. In them some mathematical models are offered. The aim of research is the optimized mathematical model that can be used on practice. So, we need to develop some more rapid algorithms. The tasks of research are firstly to get theoretical formula that can be rather simple to use in rapid calculations. Secondary we need to use empirical research methods such as experiment. In order to get some results, we take real bay controller with current sensor. The main board of the bay controller uses STM32F407 microcontroller so test program can be written on C or C++ programming language.

Modern methods of calculation of temperature of the wire and the permissible current load is based on solving the heat balance (1) equation written in differential form per unit length of bare wire (1 m) at a fixed value of current in the wire:

$$I^2 R_0 (1 + \alpha v_t)dt = Cd\, v_t + kdt, \quad (1)$$

there are:

C – heat capacity of 1m wire, W/°C (temperature independent), W/^{o}C;

v_t – wire overheating temperature relative to ambient temperature, ^{o}C;

I – current value in the wire, A;

R_0 – resistance of 1 m of a wire on a direct current at temperature 20 ^{o}C, Ohm;

α – temperature coefficient of wire resistance, 1/^{o}C;

t – current time, sec;

k – coefficient that takes into account the heat transfer from the wire to the environment, W/(m$^2\cdot{}^o$C);

After integration the left and right sides of the equation you can take indefinite integrals and then add a constant term to the solution, which can be determined from the initial conditions. If the values of the temperature settings of the thermal protection do not exceed 100 ^{o}C, the influence of the change in the resistance value from the wire temperature on the calculation error can be considered insignificant. Based on this, we assume in the calculation α as zero.

While, in fact, the current in the wire of the contact network changes continuously, when calculating the digital method, based on the mathematical model outlined above, during the calculated period of time in the controller, the current will be understood as a constant effective value, which is equivalent to the release of heat in the wire. We assume that the error of temperature calculation will not affect the quality of protection of the contact network material from the action of high temperatures.

An important parameter in this simplification is the value of the duration of the calculation period. When choosing this value, it is necessary to take into account the speed of the controller's

calculations, the workload of the processor with related tasks on the one hand and the inertia of thermal processes in the material of the contact network wire on the other hand.

$$v_{t+1} = v_t + ((I_{rms}k_c)^2 \cdot R/(k_i k) - v_t)(1-e^{-1/T}). \quad (2)$$

The total temperature of the wire consists of two components: the overheating temperature of the wire by the flowing current and the environment temperature. After all mathematic researches the final formula (2) can be used in digital calculations on the ARM microcontroller that is set on other bay controller.

The value of the current in the feeder has a very unstable character, mainly due to the fact that the connection of the trams is made by sliding the current collectors on the contact wires of the contact network. As mentioned above, to perform calculations of the wire temperature, it is necessary to determine the effective value of the feeder current for a time of 1 sec. It is well known that the effective value is calculated as the RMS value of the input value for a given sample size, i.e. the square root of the sum of squares of the input values divided by the sample size value. Obtaining the next current value can be a condition for the beginning of the calculation cycle of the new current value of the wire temperature.

As noted above, the heat balance equation takes into account the removal of heat energy from the wire in the form of a loss factor value k. Losses consist of two main components: convective losses and radiation losses. Convective losses are formed due to the transfer of heat by contact method from the surface of the wire to the air molecules of the environment. The determining factors of heat exchange in this case is the speed and direction of the air flowing around the wire. Due to the fact that it is technically not possible to obtain these values for specific areas of the contact network, the account of convective heat losses has to be calculated by an averaged empirical method (3) that was developed on the basis of experimental data.

$$k = 2.8125 \cdot v^{0.59} + 3.4. \quad (3)$$

It is advisable to calculate the values of the loss coefficient k_i for several ranges of wind speed values in order to relieve the work of the calculator. The error of calculations with this simplification can be considered insignificant.

Thus, when calculating the temperature, it is necessary to take into account the wind speed and heat capacity, which depends on the mass, i.e. on the brand of the wire.If the wire wear is understood as a change in the shape of its cross-section due to the mechanical action of current collectors of rolling stock, then two parameters of the wire change, which significantly affect its temperature during operation. Reducing the cross-sectional area leads to an increase in current resistance, and reducing the mass leads to a decrease in the heat capacity of the wire. When calculating the temperature value for a new wire $k_i = 1$. Heat generation under the influence of current increases with increasing wire wear and decreases with increasing cross-sectional area (wire grade).

The heat capacity of the wire increases with increasing weight (wire grade) and decreases with increasing wire wear. Respectively increases or decreases the time constant of the transition process. A thick wire heats up more slowly, and a worn one heats up faster.

The current value measured in the bay controller cell feeder is the sum of the currents flowing through the wires of the contact network. The actual distribution of currents in each wire depends on many factors that are not technically possible to take into account. In practice, on most sections of the contact network wires, the current value can be significantly less than the current value in the bay controller. Therefore, the actual heating of these wires may be less than the calculated value. In these cases, the thermal protection may be triggered prematurely. By setting the network topology coefficient $k_c < 1$, you can approximately take into account the design features of this section of the network to reduce the probability of false thermal protection operations.

In order to check this theory the experiment has been organized on the traction power substation. The values of outdoor temperature, wind speed, wire grade, wire wear and contact network topology, as well as alarm and protection temperature settings, must be supplied to the controller from the communication protocol.

The test program was written on C programming language for real bay controller of “Impulse-automation” company. It uses (2) as the method to calculate temperature by measuring current. To control the results of the experiment was used MF100 type wire. Also, we get two accurate Pt100 thermo sensors in different parts of the MF100 cable. Data was received from the bay controller by the IEC 60870-104 protocol that implements on KPL600f bay controller and OPC Server.Mathlab Simulink OPC client was connected to OPC Server in order to get plots.

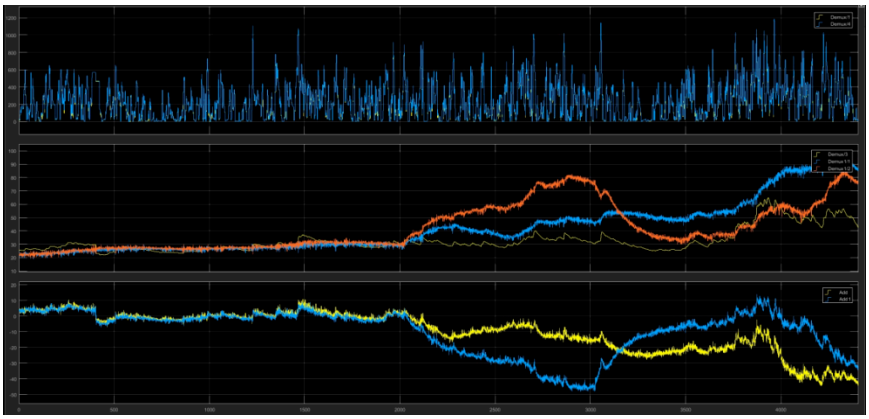


Fig. 1. Plot of current and temperature

In Fig. 1 on the first plot we can see the true RMS current. In the second plot there are calculating temperature by the controller and two temperatures from thermo Pt100 sensors that were set at the wire in the points with different k_i values. In the Third plot we can see discrepancy of the measuring and calculation temperature in different modes of the experiment.

After analyzing plots we can see that the first half of the experiment the calculate temperature was equal to Pt100 sensor, in the second half we see some problems but they were caused by the temperature linearity of the Pt100 sensor. In the end of experimentthermo sensor was cooled by fan and the discrepancy was going down.

By the results of the experiment it was obtained that the model is correct. But it has some limitations such as during each cycle of temperature calculations, the current and wire temperature values are considered constant. Another one is to make temperature calculations for a wire one meter long. Also, the resistance of the wire does not depend on changes in its temperature. So, algorithm of calculation temperature of contact network by current measurement was offered, and theoretical formula has been proved.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frolov V., Bystrov A. and Neelov A. 2017 Imitating model of a microprocessor trip unit of a circuit *Breaker Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference ElConRus* 838-840.
2. Othman M., Ishak A. and Wahab N. 2014 Modeling and simulation of the industrial numerical distance relay aimed at knowledge discovery in resident event reporting *Malaysia Journal Citation Reports* 90 660-686.
3. *Frolov V., Neelov A., Zhiligotov R. and Bystrov A.* 2018 Identification of the protection parameters of the local electrical network taking into account the detuning of the inrush current *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018* 626-628.
4. *Matousek P.* 2018 Description of IEC61850 Technical Report no. FIT-TR-2018-01 Faculty of Information Technology Brno University of Technology.
5. *Lantsev D. and Frolov V.* 2019 Methods of increasing the reliability of external memory of digital substation bay controllers IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Enq. 643 012117.

6. *Deng S., Zhang K., Xin J. and Wang L.* 2019 Assessment of thermal reliability of thermal protection systems by importance sampling method. Chongqing Daxue Xuebao/Journal of Chongqing University 42(2) 62-70.
7. *Kang Sungwook, Yoon Choi J., Kwon M. and Choi S.* 2019 Development of Testing Environment for Thermal Protective Clothing at Critical Conditions *The Proceedings of 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology* 435-449.
8. *Huang J. and Yao W*. 2018 Damage Tolerance Analysis on Thermal Protection System Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics* 50(4) 509-515.
9. Dynamic Assessment of Overhead Line Capacity for integrating Renewable Energy into the Transmission Grid. CIGRE WG B2-207 2014.
10. *Jupe S., Murphy G. and. Kazerooni A.K.* 2013 De-risking the implementation of real-time thermal ratings *22 International Conference on Electricity Distribution. Stockholm Paper* 1106.

УДК 620.93

ЛЕБЕДЕВ В.А.,
КАРАБУТА В.С.
Санкт-Петербургский Горный Университет

РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ПОДГОТОВКИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Аннотация. Рассмотрена система подготовки попутного нефтяного газа для различных вариантов энергообеспечения месторождений. Проведен анализ основных компонентов ПНГ и их негативного влияния на элементы оборудования энергетического комплекса. Предложена схема очистки попутного нефтяного газа от основных составляющих газа - серы, тяжелых углеводородов, механических примесей и конденсата. Предложены варианты прямого и раздельного использования рабочих тел в зависимости от состава и параметров исходного ПНГ, компоновки установки подготовки попутного нефтяного и энергоустановки.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ, система подготовки газа, очистка газа, сера, тяжелые углеводороды, компоновка оборудования энергокомплекса.

LEBEDEV V.A.,
KARABUTA V.S.
Saint-Petersburg Mining University

MODELING OF THERMAL PROCESSES IN ASSOCIATED PETROLEUM GAS TREATMENT PLANTS

Abstract. The system of preparation of associated petroleum gas for various options of energy supply of fields is considered. The analysis of the main components of APG and their negative impact on the equipment elements of the energy complex is carried out. A scheme for cleaning associated petroleum gas from the main components of the gas-sulfur, heavy hydrocarbons, mechanical impurities and condensate. Variants of direct and separate use of working bodies are proposed depending on the composition and parameters of the initial APG, the layout of the associated oil and power plant preparation unit.

Keywords: associated petroleum gas, gas treatment system, gas purification, sulfur, heavy hydrocarbons, power complex equipment layout.

Арктика является важнейшим экономическим регионом России, который в настоящее время и в ближайшем будущем будет обеспечивать благополучие страны. К 2050 году примерно 30% всех углеводородов будет добываться в Арктике [1]. Полуостров Ямал имеет огромные извлекаемые запасы легкой нефти сорта Novy Port с низким содержанием серы (примерно 0,1%) категории С1 – 203 млн.т., С2 – 30 млн.т., конденсат: С1 – 18 млн.т, С2 – 1 млн.т. Газ: С1 – 262 млрд. м^3., С2 - 12 млрд. м куб. [2]. Энергетическое обеспечение нефтяных месторождений, которые зачастую расположены в труднодоступной местности и удалены от инженерной инфраструктуры и дорог, существенно затруднено. На многие месторождения доставка оборудования и топлива возможна только в зимнее время по льду, либо по морю с применением ледоколов. Основные запасы нефти и газа размещены в пластах, что требует глубокого и горизонтального бурения кустовых скважин, применения мощных буровых установок и технологического оборудования с существенным уровнем энергопотребления. Важными

показателями свойств нефтегазоконденсатных месторождений являются газовый и конденсатный факторы [3]. Газовый фактор на месторождении достигает 103 м³ на добываемую тонну нефти, что делает весьма актуальной задачу его эффективного использования, в первую очередь, для автономного обеспечения нефтяного куста всеми видами энергии: механической, тепловой и электрической. Поэтому разработка и оптимизация энергетического комплекса, использующего подготовленный до топливного уровня попутный нефтяной газ (ПНГ), является актуальной научно-технической задачей.

В последние десятилетия в России предпринимаются попытки применения различного по составу и свойствам ПНГ для автономной генерации электрической и тепловой энергии для буровых установок и инженерной инфраструктуры месторождений. Как во время бурения, так и при добыче нефти, в ее себестоимости доля топлива и снабжение энергией составляет от 25 до 40% [4], что является одним из основных вопросов при формировании производственной структуры месторождения [5, 6]. Однако, учитывая малоразвитую инфраструктуру в районах Крайнего Севера, отдаленность от населенных пунктов и дорог, в первую очередь, будет интересовать вопрос рациональной утилизации ПНГ, автономного энергообеспечения с использованием добываемого попутного нефтяного газа [7, 8, 9]. Многие проекты энергетических комплексов, использующих своем составе газотурбинные и газопоршневые, в том числе когенерационные установки, является не вполне эффективными, так как не учитывают свойства попутного нефтяного газа. Высокое содержание сероводорода и меркаптановой серы в ПНГ, высокое содержание тяжелых углеводородов С3 + В, наличие твердых частиц и конденсата являются серьезным препятствием для его неподготовленного применения в качестве топлива. Работа энергоустановок на таком ПНГ отличается нестабильностью, частыми аварийными остановками. Использование не подготовленного ПНГ существенно ограничивает ресурс силовых агрегатов, до 20-25% от паспортных данных. Требования производителей газотурбинных и газопоршневых агрегатов к газообразному топливу приближены к свойствам природного газа, для которого большинство силовых агрегатов и создавались. Автономная генерация энергии с использованием ПНГ, который на многих нефтяных и нефтеконденсатных месторождениях существенно отличается от природного газа по составу и параметрам, требует применения и исследования дополнительного блока подготовки исходного ПНГ, получаемого в процессе сепарации нефти, до приемлемого уровня топливного газа, а также оптимизации архитектуры ЭУ.

Одной из важнейших систем ЭУ, работающих на ПНГ является установка подготовки топливного газа – УПТГ, основным назначением которой является очистка исходного ПНГ от серы, тяжелых углеводородов, механических примесей и конденсата.

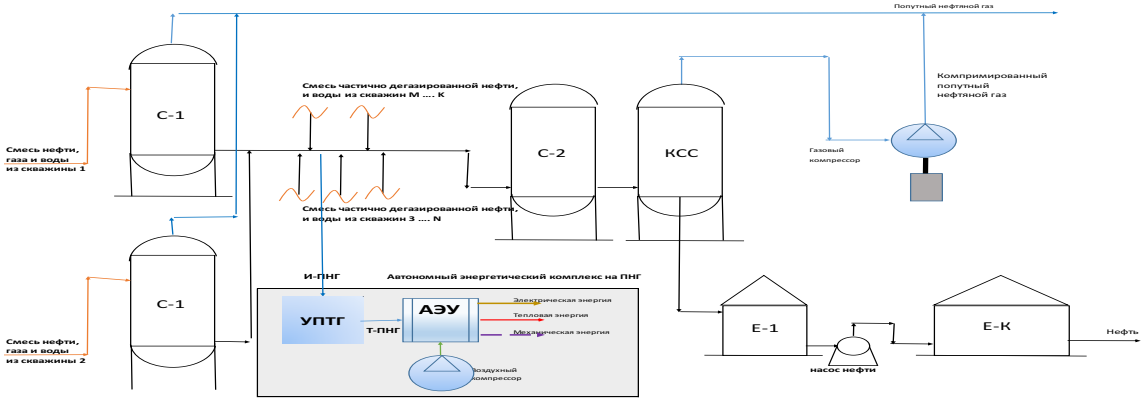


Рисунок 1 – Схема установки по подготовке топливного газа при дегазации нефти на кустовой буровой площадке в составе автономного энергетического комплекса на ПНГ: С-1 - сепаратор первой ступени, С-2 – сепаратор второй ступени, КСС - концевая ступень сепарации, Е-1 - мерный резервуар нефти, Е-К – мерный резервуар–коллектор, УПТГ – установка подготовки топливного газа, ЭУ – автономная энергетическая установка, И-ПНГ – исходный ПНГ – на входе в УПТГ, Т-ПНГ – топливный ПНГ – на выходе из УПТГ

Место забора ПНГ для подготовки топливного газа зависит от газового фактора месторождения, дебета эксплуатационных скважин, мощности и КПД ЭУ. На рис. 1. представлена типовая многоступенчатая схема дегазации нефти с отбором исходного ПНГ на УПТГ после первой ступени сепарации. Первую ступень сепарации размещают вблизи устья скважины, что облегчает компоновку системы, вторые и последующие ступени могут быть размещены на центральном или кустовом пунктах сбора продукции. Принципиальная схема УПТГ представлена на рис. 2.

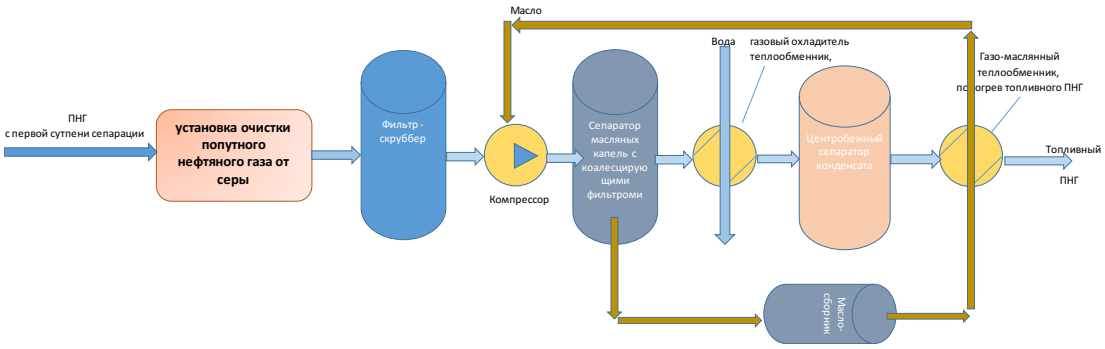
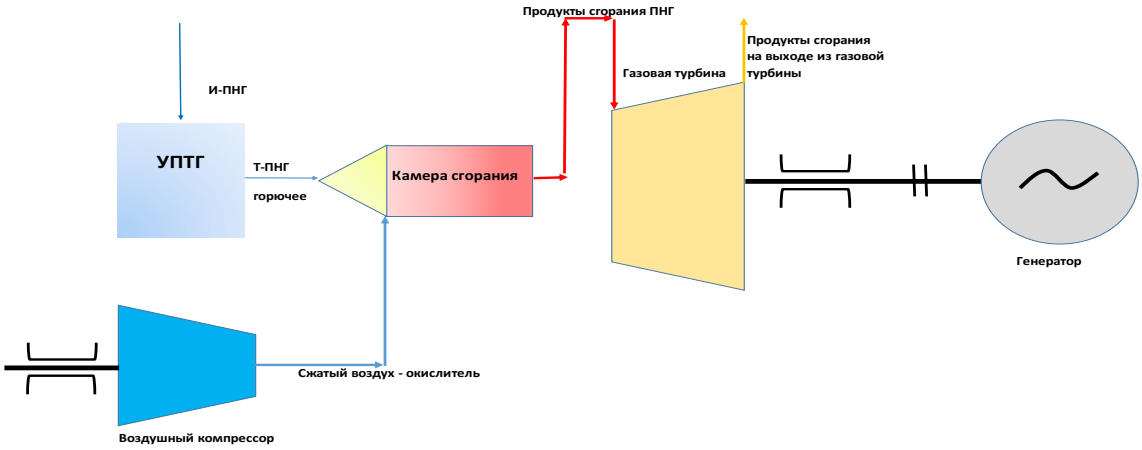


Рисунок 2 – Схема принципиальная установки подготовки топливного попутного нефтяного газа (Т-ПНГ)

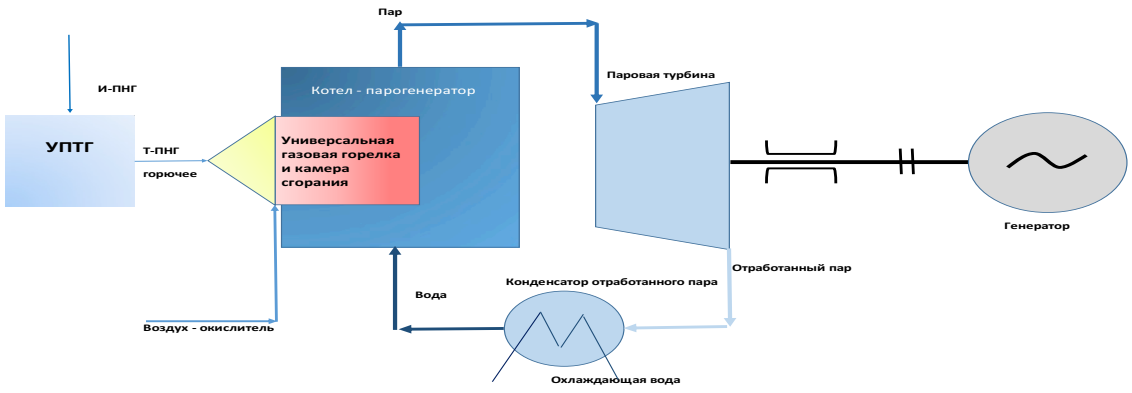
УПТГ, в общем случае, состоит из систем очистки И-ПНГ от сероводорода и меркаптановой серы, газового компрессора - при недостатке давления ПНГ после первой ступени сепарации, очистки ПНГ от примесей с помощью промывки водой, центробежного сепаратора конденсата. УПТГ должен быть включен в состав ЭУ, т.к. это установка не применяется для иных целей. Соответственно, капитальные и эксплуатационные затраты на УПТГ, потребление энергии, массогабаритные показатели должны будут «отягощать» ЭУ при расчетах целевых функций оптимизации. Важнейшим вопросом использования ПНГ в качестве топливного газа является разработка методов очистки от сероводорода и меркаптановой серы для малотоннажной установки (в пределах расхода ПНГ до 1000 м^3/час). Из трех известных способов очистки от серы: алканоламиновой, адсорбционной и щелочной для условий нефтяного куста может быть приемлема, практически, только щелочная. Однако по данной схеме были проведены только ограниченные эксперименты по очистке от серы, и впоследствии эксплуатация установки была прекращена из-за высокой стоимости очистки. Очистка ПНГ от механических примесей и от конденсата путем низкотемпературной сепарации - сравнительно хорошо освоенные процессы, которые, однако, в составе УПТГ должны присутствовать и очищать топливный ПНГ из исходного ПНГ в зависимости от требований силового агрегата при прямой схеме использования продуктов сгорания ПНГ в нем.Тепловой поток к топливному газу может подводиться либо электрическим нагревателем, либо отработавшими продуктами сгорания на выходе из силовой установки.

УПТГ должен располагаться на площадке месторождения и его производительность должна быть достаточной для обеспечения требуемого расхода Т-ПНГ при заданном давлении газа и степени очистки. Классы ПНГ согласно содержания сернистых соединений, напомним, подразделяют на безсернистые (массовая концентрация сероводорода (СВ) < 0,0007 мг/м^3, меркаптановая сера (МС) < 0,0016 мг/м^3), малосернистые (СВ = 0.007 – 0.1, МС > 0.0016), сернистые (СВ = 0,1 - 3,00; МС > 0.0016), высокосернистые (СВ $\geq 3.01; MC > 0.0016$). Очевидно, что наиболее сложной будет очистка ПНГ, содержащего серу, для высокосернистых и сернистых газов. Тяжелые углеводороды, содержащиеся в ПНГ согласно [54], классифицируют ПНГ на тощий газ (содержание $C_{3+} \leq$ 100 г/м^3), средний (C_{3+} = 101-200), жирный (C_{3+} = 201-350) и особо жирный ($C_{3+} \geq$ 351). Виды ПНГ по содержанию механических примесей: чистый газ (мех.

примеси < 0.0005 г/м^3), слабозагрязненный (0,0005-0,001), загрязненный (0,001-0,0025), сильнозагрязненный (> 0,0025). Негорючие компоненты попутного нефтяного газа подразделяют ПНГ на группы согласно их содержания: безбалластный ПНГ – содержание негорючих компонентов < 0.01 мол.%, малобалластный (0,01 – 7,0), среднебалластный (7,01 - 15,00), высокобалластный (≥ 15,01). Негорючие компоненты ПНГ, такие как азот, диоксид углерода, кислород и др. не должны оказывать существенного влияния на процесс горения ПНГ. Основное внимание в УПТГ, в зависимости от архитектуры энергетического комплекса, должно быть уделено очистке ПНГ от серы, тяжелых углеводородов, капельной жидкости и механических твердых примесей. Однако, совместное наличие в ПНГ CO_2 и H_2S усиливает его коррозионную агрессивность и влияет на химико-технологические процессы очистки газа от серы. Существуют требования производителей основных типов силовых установок (газовых поршневых двигателей, газовых турбин), которые могут быть применены в составе автономного энергетического комплекса, к содержанию и составу топливного газа. Состав УПТГ, наиболее вероятно, будет зависеть от двух основных факторов: состава исходного попутного нефтяного газа, полученного после первой ступени дегазации нефти и выбранной архитектуры энергетического комплекса. Назовем здесь и далее попутный нефтяной газ, подаваемый на вход УПТГ – исходным попутным нефтяным газом (И-ПНГ), газ на выходе из УПТГ – топливным попутным нефтяным газом (Т-ПНГ).



а



б

Рисунок 3 – Схемы использования ПНГ в автономной энергетической установке кустовой буровой площадки:
а - прямое использование продуктов сгорания ПНГ в качестве рабочего тела газовой турбины; б - раздельное использование рабочих тел

Рассмотрим две основные архитектуры АЭУ к применению на буровых кустовых площадках (рис. 3):

1. С прямым использованием продуктов сгорания Т-ПНГкак рабочего тела для силовых агрегатов (рис. 3, а);

2. С раздельным использованием рабочих тел (рис. 3, б). В этом случае продукты сгорания Т-ПНГ применяют только для нагрева «чистого» рабочего тела для двигателей. Например, для генерации пара и дальнейшего его использования в паровой турбине. Парогенератор использует для нагрева и испарения воды продукты сгорания топливного ПНГ.

Очевидно, что требования к составу ПНГ по степени его негативного влияния на оборудование энергетического комплекса во втором случае гораздо ниже, чем в первом.

Таким образом, можно сделать вывод, что ПНГ не может непосредственно использоваться в автономных энерогоустановках. Его использование приводит к снижению ресурса установки до 25% от заявленных заводом изготовителем, а так же к ускоренной коррозии элементов конструкции агрегатов и засорению форсунок. Для использования ПНГ его необходимо подготавливать до требований фирм производителей энергетических установок. Каждая фирма сама регламентирует содержание серы, метана, число Вобби и ряд других показателей для своей техники. Представленная схема подготовки ПНГ отличается от существующих установок, работающих на очистку только от одного компонента, возможностью комплексной подготовки ПНГ на месторождении и адаптации к ПНГ различного состава.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Картамышева Н.С., Вахрушин И.А., Перевада М.Н. Трескова Ю.В.* Проблема добычи нефти и газа в условиях Крайнего Севера / Молодой ученый, 2015. №13 (93). С.8 45-848.
2. Крупный проект Новый Порт. ООО «Газпромнефть-Ямал», 30.05.2016 г. - 12 с.
3. Степанов С.В. Комплекс вычислительных технологий для повышения качества моделирования разработки нефтяных и газонефтяных месторождений. 05.13.18 математическое моделирование, численные методы и комплексы программ / Автореферат д.т.н. – Тюмень: ООО «Тюменский нефтяной научный центр», 2016. - 43 с.
4. *Серов Н.Н.* PROконцепт. Модуль 1. Бурение для неспециалистов. Газпром нефть. Центр профессионального роста. 09.07.2015. – 10 с.
5. *Лебедев В.А., Леушева Е.Л., МореновВ.А.* Комплексное энергоснабжение при бурении скважин в осложненных климатических условиях / Записки горного института, 2015. Т.213.
6. *Лимитовский А.М.* Электро– и теплоснабжение геологоразведочных работ / А.М. Лимитовский, А.Ю .Марков, М.В. Меркулов. - М.: Недра, 1988. - 150 с.
7. *Пыстина Н.Б., Попадько Н.В.* Наилучшие доступные технологии. Утилизация ПНГ / Neftegaz.ru., 2017. №9. С. 86-93.
8. www.geaenergy.ru
9. *Аджиев А.Ю., Пуртов П.А.* Подготовка и переработка попутного нефтяного газа в России: в 2 ч. Ч. 2 /А.Ю.Аджиев, П.А.Пуртов. – Краснодар: ЭДВИ, 2014. – 504 с.

УДК 621.314.57

ЛЕ ВАН ТУНГ
Санкт-Петербургский горный университет

ПРЯМОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С МЕТОДОМ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. Исследование преобразователей частоты с использованием активного выпрямителя с методом прямого управления мощностью для обеспечения синусоидального входного тока, коэффициента мощности (Км), равного 1, стабильностью постоянного напряжения DC на выходе, обменной мощностью в двух направлениях между нагрузкой и сети. Прямое управление мощностью, основанное на оценке напряжения сетью, затем прямое управление активной и реактивной мощностью цепи, обеспечение реактивной мощности q = 0. В статье анализируются преимущества метода прямого управления мощностью в цепи активного выпрямителя с высокой мощностью в качестве источника питания нескольких инверторов - трехфазных асинхронных двигателей. В методе прямого управления моментом с использованием пространственно-векторной модуляции используется PI-регулятор потока и регулятор момента для замены регулятора реле задержки в методе классического управления моментом. Обеспечение точного регулирования амплитуды потока и момента обеспечивается объединением питания по схеме активного выпрямителя: несколько инверторов, несколько двигателей и нагрузка - образуют целостную систему электропривода с повышенной эффективностью работы. Результаты исследования были подтверждены программным обеспечением Matlab & Simulink.

Ключевые слова: прямое управление мощностью; прямое управление моментом DTC; трехфазный инвертор; многодвигательный асинхронный электропривод; Matlab & Simulink.

LE VAN TUNG
St. Petersburg Mining University

DIRECT POWER CONTROL OF AN ACTIVE RECTIFIER WITH DIRECT TORQUE CONTROL METHOD OF INDUCTION MOTOR DRIVES

Research of frequency converters use active rectifier with direct power control method to make sure sine-shaped input current, power factor equal to 1, DC direct voltage at the stable output, energy is exchanged in two directions between load and grid. Direct power control based on grid voltage estimation will then directly control the active and reactive power of the circuit, ensuring reactive power q = 0. The paper analyses the advantages of the direct power control method in active rectifier circuit with high-capacity as the main power source for many inverters - three-phase asynchronous motors working in the mining industry. The method of direct control of the moment using space-vector modulation. Use PI-type regulators to control the torque and magnetic flux instead of the delay relay regulators, ensuring continuous adjustment of the flux amplitude and the torque. Combining power - active rectifier circuit - multiple inverter circuits - multiple motors - load into a complete multi-motor electric drive system with improved working efficiency. The research results were verified by Matlab & Simulink software.

Keywords: direct power control; torque control DTC; three-phase inverter; Multi-motor electric drives; Matlab & Simulink.

Метод управления активным выпрямителем оценивает напряжение сети и затем прямое управление активной и реактивной мощность (DPC - Direct Power Control). Преимущество этого метода управления заключается в управлении реактивной мощностью q = 0 на входе выпрямителя для обеспечения Км = 1. Оценка изменения гармонического содержания улучшает коэффициент мощности и эффективность управления [1, 2].

В настоящее время распространенная система электропривода имеет преобразователь частоты - асинхронный двигатель. Однако, когда в таком случае работает группа двигателей или требуется расширить диапазон мощности, это приводит к увеличению мощности и размерам двигателя, механической трансмиссии и необходимости замены преобразователя частоты на более мощный. Для устранения этих недостатков исследуется и разрабатывается структурная схема системы электропривода, состоящей из выпрямителя - нескольких инверторов и нескольких двигателей, показанных на рис. 1 [3, 4].

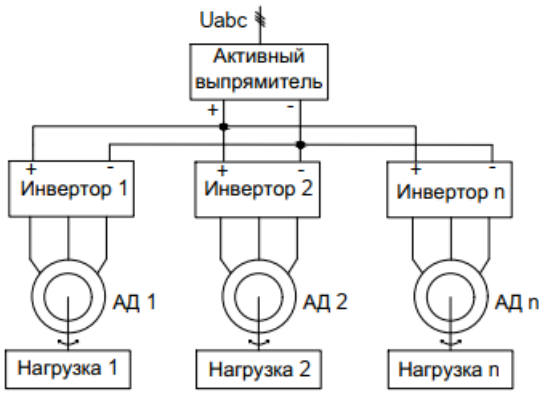


Рисунок 1 - Структура активного выпрямителя с несколькими инверторами

Как показано на рис. 1, используйте выпрямитель для питания многих инверторов. Использование инверторов для подачи питания на каждый двигатель не только расширяет диапазон мощности, но и создает гибкую систему управления энергетическим процессом, а также синхронно регулирует скорость приводной системы. Двигатели могут работать с отдельными нагрузками или с одинаковой нагрузкой, например, длинные конвейеры используют несколько двигателей.

Исследование [5], доказывает, что на схеме, приведенной на рис. 1, общая мощность инвертора может быть в 4 раза выше, чем мощность активного выпрямителя. Это снижает стоимость при проектировании схемы выпрямителя.

Структура управления DPC (рис. 2) основана на схемах, которые управляют мгновенной активной и мгновенной реактивной мощностью. В структуре DPC состояния переключения преобразователя выбираются на основе разницы между вычисленным значением и регулируемым значением активной мощности (p) и реактивной мощности (q) [4]. Следовательно, метод DPC требует быстрой и точной оценки мощности p и q.

На рис. 2 H-нагрузка (инверторы и двигатели); PI-регулятор напряжения постоянного тока; PWM-активный выпрямитель (IGBT), L-реактивное сопротивление; ТП-таблица переключения; γ_{UL}-фазовый угол между вектором напряжения и осью α.

PI-регулятор напряжения поддерживает постоянное напряжение U_{dc} на конденсаторе C в соответствии с желаемой предустановкой. Это регулирует поток активной мощности, протекающий к конденсатору C. Необходимо проверять, чтобы выходное напряжение выпрямителя было равно значению U_{dcref}, установленному при изменении нагрузки.

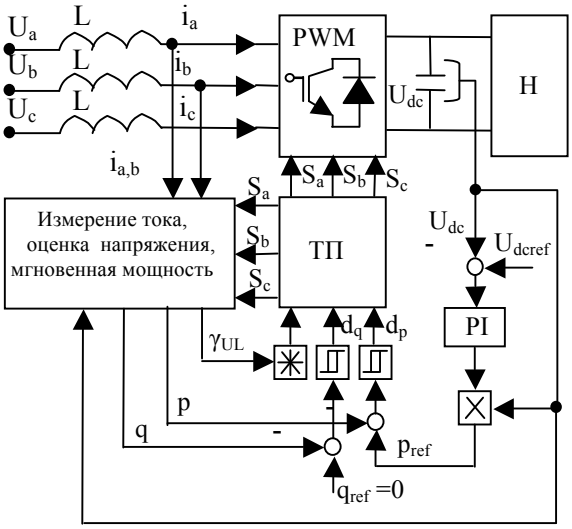


Рисунок 2 - Структура активного выпрямителя DPC

Метод прямого управления моментом DTC (Direct Torque Control) имеет множество преимуществ при работе в режимах с малой скоростью, резко изменяющимся моментом нагрузки, при низких пульсация низкого крутящего момента, стабильности частоты переключения [6]. Базовая схема управления DTC использует секторную таблицу переключения для выбора вектора управляющего напряжения с такими преимуществами, как простая структура, отсутствие изменения координат, отсутствие непосредственного контура управления. Однако базовый метод DTC имеет недостатки, такие как частота коммутационного элемента высокие пульсации момента, искажения потока и тока с изменением положения вектора потока статора, высокой частоты дискретизации [6].

В статье используется метод DTC-SVM (Space Vector Modulation) вместо классического метода DTC, чтобы продемонстрировать преимущества PI- регулятора и преимущества пространственно-векторной модуляции (ПВМ). Этот метод преодолевает ограничения базового метода DTC. Метод DTC-SVM работает с постоянной частотой переключения, поэтому он оптимален по потерям на переключение [7, 8].

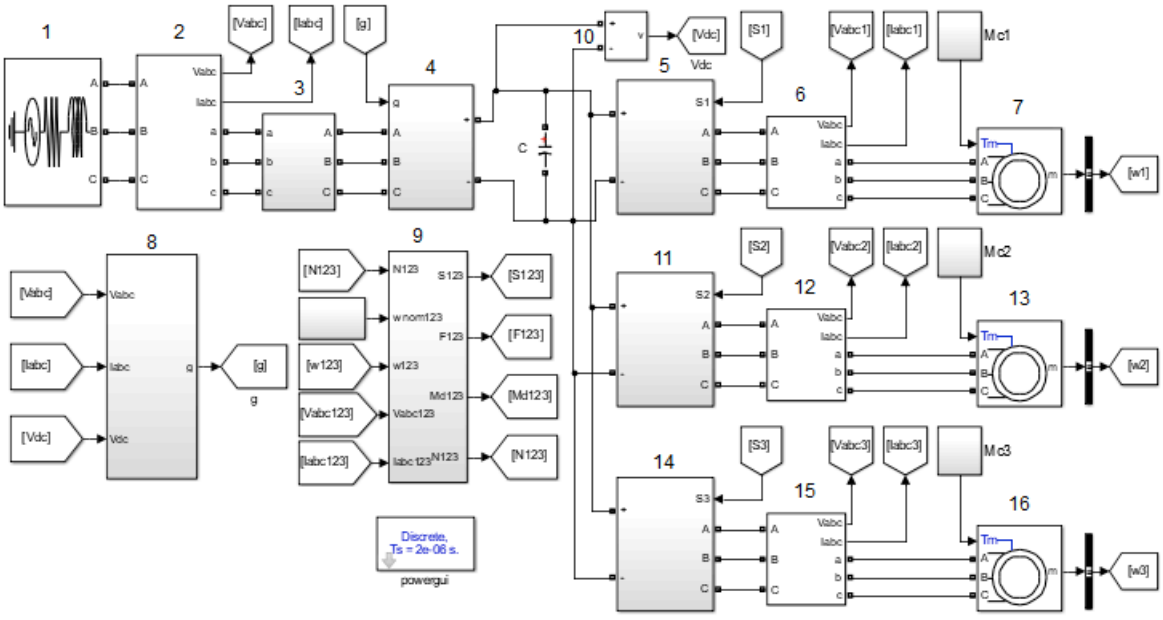


Рисунок 3 - Схема управления DTC-SVM с активным выпрямителем

Результаты моделирования в схеме выпрямителя представлены на рис. 4-12.

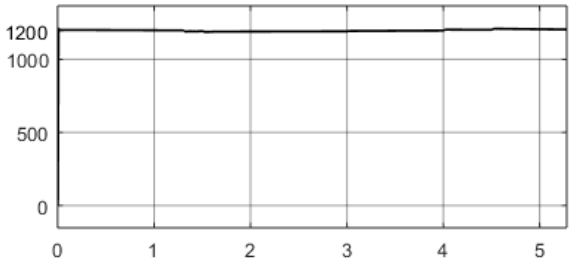


Рисунок 4 - Постоянное напряжение на выходе АВН

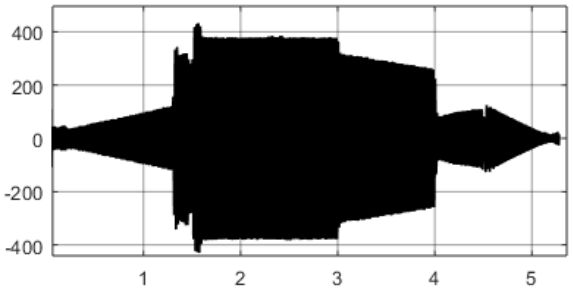


Рисунок 5 - Ток на входе АВН

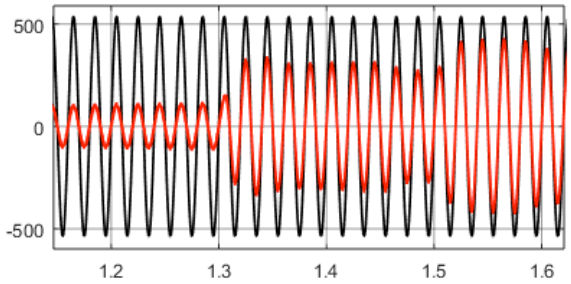


Рисунок 6 - Характеристика тока на входе выпрямителя при запуске двигателей и при моменте нагрузки

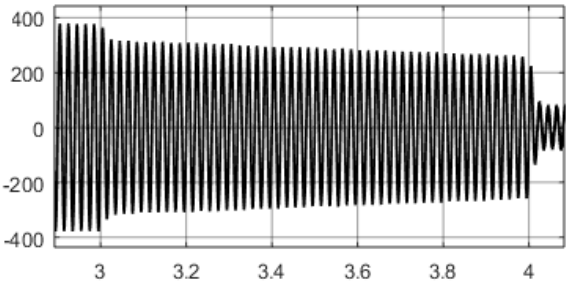


Рисунок 7 - Характеристики входного тока, когда скорость вращения двигателей снижается, а у третьего двигателя обратный момент нагрузки

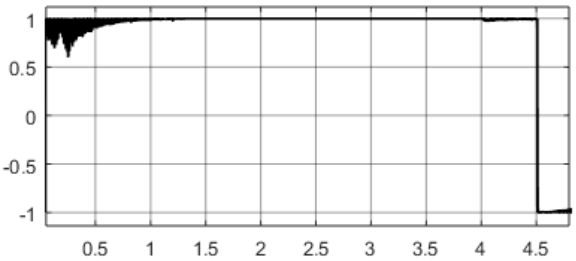


Рисунок 8 - Характеристика коэффициента мощности $К_м$

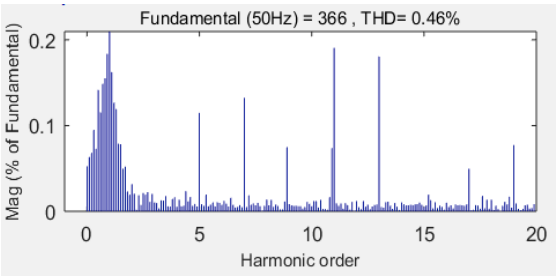


Рисунок 9 - Коэффициент искажения тока на входе (TDH = 0,46%)

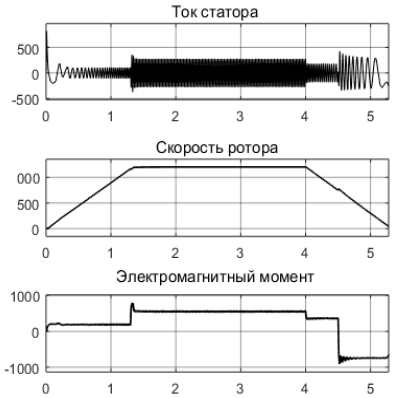


Рисунок 10 - Характеристики первого двигателя

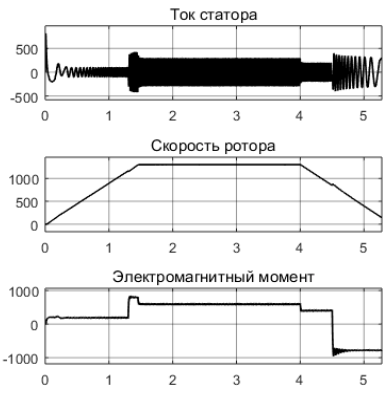


Рисунок 11 - Характеристики второго двигателя

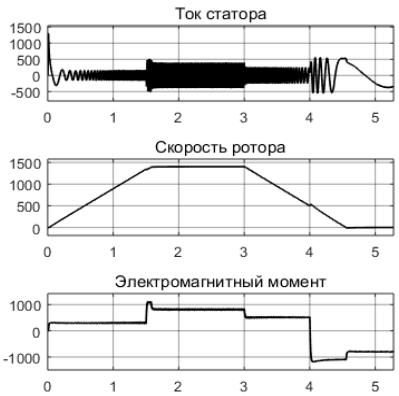


Рисунок 12 - Характеристики третьего двигателя

Теоретический анализ и результаты моделирования показывают, что система электропривода состоящая из активного выпрямителя, нескольких инверторов, нескольких двигателей, имеет хорошие рабочие характеристики. Обмен энергии в двух направлениях подходит для режимов работы двигателей с частым торможением и обратной скоростью вращения. Система имеет высокий коэффициент мощности и синусоидальный ток. Метод управления моментом DTC-SVM подходит для двигателей большой мощности, характеризующихся плавной скоростью при запуске и останове. Система обеспечивает стабильную скорость двигателя с изменением момента нагрузки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Antobiewitcz P, Kazmierokowski M.P*. 2006 Predictive direct power control of threephase boost rectifier *Bulletin of the polish academy o sciences* 3(54) 12-18.
2. *Malinowski M.* Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers / Ph.D. Thesis. Warsaw. 2011. 1-128 p.
3. *Kozyaruk A.E., Albert M.K*. 2019 Improving the Energy Efficiency of the Electromechanical Transmission of an Open-pit Dump Truck *Journal of Mining Institute* 239 576-582.
4. *Поликашов С.А., Васильев Б.Ю.* Преобразователь частоты многодвигательного электропривода с активной коррекцией коэффициента мощности и энергосберегающей системой управления / Вестник Череповецкого государственного университета. Технические науки, 2015. №4. С. 37-41.
5. Schneider Electric Power Drives (08/2010), «Активный выпрямитель напряжения, обеспечивающий возврат энергии торможения в сеть».
https://electroautomatica.ru/img/documentation/ATV_%20AFE_4Q_ru.pdf.
6. *Bogdan Y., Le Van Tung.* 2018 Research on the Switching Algorithm of Voltage Vectors in the Direct Torque Control System *IEEE Trans. Rus. 2018* 80-87.
7. *Idir Abdelhakim, Kidouche Madjid.* 2011 A Comparative Study between DTC, SVM-DTC and SVM-DTC with PI Controller of Induction Motor *The International Conference on Electronics & Oil* 94-97.
8. *Kozaruk A.E.* 2016 Energy-efficient electromechanical complexes of mining and transport vehicles *Journal of Mining Institute* 218 261-269.

УДК 622.276.6

МАЛАРЕВ В.И.,
КОПТЕВА А.В.,
ГОЦУЛ Ю.Д.
Санкт-Петербургский Горный университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТОВ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ С ПОМОЩЬЮ СКВАЖИННЫХ ЭЛЕКТРОПАРОГЕНЕРАТОРОВ

Аннотация. В работе представлена информация о скважинном электротермическом оборудовании, позволяющим улучшить качество тепловой обработки призабойной зоны пласта высоковязкой нефти за счет сепарации пара в электропарогенераторе и увеличении его сухости, при этом тепловая энергия в нефтепластовой среде оказывает влияние на все ее компоненты и радикально изменяет связи и фильтрационные условия, что выражается в уменьшении вязкости нефти, увеличении ее подвижности, ослаблении структурно-механических свойств, улучшении условий для капиллярной пропитки и, как следствие, увеличении коэффициента вытеснения и конечной нефтеотдачи.

Ключевые слова: повышение нефтеотдачи, высоковязкая нефть, скважинный электропарогенератор, энергоэффективность, сепарация пара.

MALAREV V.I.,
KOPTEVA A.V.,
GOTSUL JU.D.
Saint-Petersburg Mining University

IMPROVING THE EFFICIENCY OF STEAM-HEAT TREATMENT OF HIGH-VISCOSITY OIL RESERVOIRS USING BOREHOLE ELECTRIC STEAM GENERATORS

Abstract. The article presents information on the borehole electrothermal equipment, allowing to improve the quality of heat treatment of bottom-hole formation zone of heavy oil through steam separation in the steam generators and increasing its dryness, the thermal energy in nepaprastai environment has an impact on all its components and radically changing communication and the filtration conditions, resulting in the reduction of oil viscosity and increasing its mobility, the weakening of the structural-mechanical properties, improve the conditions for capillary impregnation and, as a consequence, increasing the displacement coefficient and final oil recovery.

Keywords: enhanced oil recovery, high-viscosity oil, borehole electric steam generator, energy efficiency, steam separation.

К недостаткам современных термических методов добычи высоковязкой нефти (ВВН) можно отнести высокие материало- и капиталоёмкость теплоэнергетического оборудования, потери тепловой энергии в распределительной трубопроводной системе и в скважине, а также снижение эффективности процесса из-за сжигания части добытой нефти или газа в парогенераторах и значительное ухудшение экологической обстановки в районах нефтедобычи [1-9].

Одним из перспективных направлений развития термических методов добычи является разработка забойных парогенераторов [10]. Предложенные ранее методы

теплового воздействия на пласт с помощью скважинного электродного нагревателя имеют ряд недостатков с точки зрения эффективности, т.к. не позволяли повысить качество вырабатываемого пара (сухость), что приводило к снижению эффекта от термодинамического воздействия на продуктивный пласт.

Целью данной работы является разработка конструкции забойного электропарогенератора-сепаратора и расчет его конструктивных и режимных параметров с целью увеличения сухости пара при паротепловой обработки продуктивных пластов высоковязкой нефти.

Конструкция устройства тепловой обработки призабойной зоны скважин, размещённого в зоне продуктивного пласта внутри эксплуатационной колонны 1, включает в себя скважинный электропарогенератор (рис.1), который закреплен на конце колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) 18. Электропарогенератор состоит из металлического корпуса 2, выполненного в форме цилиндра и являющегося нулевым электродом 14. Центральный токовод 3, имеющий термостойкую изоляционную оболочку 4, закреплён в верхней части корпуса 2 через проходной изолятор 19, на внутренней поверхности корпуса расположены в виде стальных колец отбойные конденсатосъемники 5. Внутри корпуса 2 на тоководе 3 через равные промежутки, разделенные трубчатыми термостойкими изоляторами 4, установлены по высоте один над другим фазные электроды 6, каждый фазный электрод выполнен в виде многозаходного винта с углом атаки лопастей (20-30°), применяемых для закручивания потока вокруг оси с целью получения тангенциальной составляющей скорости и сепарации пара.

Межэлектродное расстояние определяется мощностью устройства, питающим напряжением, поверхностной плотностью тока и удельным сопротивлением токопроводящей жидкости. Каждый фазный электрод помещен во фторопластовый керамический стакан, имеющий боковую стенку 7 и токопроводящие окна 8.

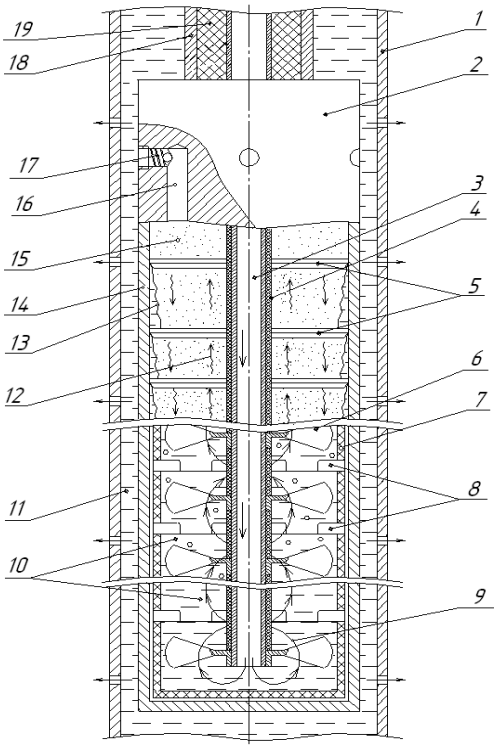


Рисунок 1 – Конструкция устройства тепловой обработки призабойной зоны скважин

Верхняя часть корпуса, свободная от фазных электродов и образующая паровую зону 15 электронагревателя, содержит паровыводящий канал 16 с клапаном 17.

За счет протекания электрического тока между фазными электродами и корпусом происходит разогрев рабочей жидкости, кипение и образование пара 12, который в процессе движения в вертикальном направлении приобретает тангенциальную составляющую скорости, что приводит к закручиванию пароводяной смеси с помощью фазных электродов 6 вокруг центральной оси электропарогенератора, сепарации пара и его выбросу через паровыводящие каналы 16 с клапаном 17 в зону 11, заполненную внутрискважинной жидкостью, при этом конденсат 13, возникающий в результате конденсации и сепарации паровоздушной смеси, оседающий на внутренней поверхности корпуса 2 электропарогенератора, задерживается конденсатосъёмниками 5 и стекает обратно в зону кипения. Кипение и образование пара приводит к теплообмену между стенкой 14 корпуса 2 предложенного устройства и внутрискважинной жидкостью15, при этом осуществляется подпитка котловой

жидкостью через центральный токовод 3.

Основное преимущество предложенного электропарогенератора-сепаратора проявляется в повышении сухости вырабатываемого пара, при этом тепловая энергия в нефтепластовой среде оказывает влияние на все ее компоненты и радикально изменяет связи и фильтрационные условия, что выражается в уменьшении вязкости нефти, увеличении ее подвижности, ослаблении структурно-механических свойств, улучшении условий для капиллярной пропитки и, как следствие, увеличении коэффициента вытеснения и конечной нефтеотдачи.

Скважинный электропарогенератор-сепаратор напряжением питания 6 кВ, частотой 50 Гц позволяет получать тепловую мощность до 1 МВт и за счет более качественной паротепловой обработки обеспечивает восстановление гидравлической связи пласта со скважиной, увеличение нефтеотдачи пластов с высоковязкой нефтью и дебита скважин, а также возобновление эксплуатации нерентабельных скважин на нефть, природный газ, на пресные, минеральные и термальные воды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антониади Д.Г.* Настольная книга по термическим методам добычи нефти / Д.Г. Антониади, А.Р. Гарушев, В.Г. Ишханов. - Краснодар: Советская Кубань, 2000. – 462 с.
2. *Сучков Б.М.* Температурные режимы работающих скважин и тепловые методы добычи нефти / АНО «Ижевский институт компьютерных исследований», 2007. - 406 с.
3. *Кадырбекова Ю.Д.* Ведение технологического процесса при всех способах добычи нефти, газа и газового конденсата / Ю.Д. Кадырбекова, Ю.Ю. Королева // Издательский центр «Академия», 2015. - 320 с.
4. *Абрамович Б.Н.* Проблемы обеспечения энергетической безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев // Записки Горного института, 2016. Т. 217. С. 132-139.
5. *Линник Ю.Н.* Прошлое, настоящее и будущее технологий добычи и переработки углеводородов / Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник. - Изд. КноРус, 2019. - 350 с.
6. *Гильманов А.Я.* Физико-математическое моделирование парогравитационного дренажа месторождений тяжелой нефти на основе метода материального баланса / А.Я. Гильманов, А.П. Шевелев // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2017. Т.3. №3. С. 52-69.
7. *Собота И.* Расчет теплопроводности нефтенасыщенных песчаных грунтов / И. Собота, В.И. Маларев, А.В. Коптева // Записки Горного института, 2019. Т.238, С. 443-449.
8. *Алексеев А.Д.* Изучение трудноизвлекаемых и нетрадиционных объектов согласно принципу «фабрика коллектора в пласте» / А.Д. Алексеев, В.В. Жуков, К.В. Стрижнев, С.А. Черевко // Записки Горного института, 2017. Т.228. С. 695-704
9. *Хисамов Р.С.* Анализ эффективности выработки запасов сверхвязкой битуминозной нефти при парогравитационном воздействии // Нефтяное хозяйство, 2014. №7. С. 24-27.
10. *Загривный Э.А.* Экологические и экономические перспективы применения электротермических комплексов для добычи высоковязкой нефти / Э.А. Загривный, В.И. Маларев, О.Б. Лакота, В.О. Зырин // Нефтяное хозяйство, 2012. № 11. С. 118-121.
11. *Загривный Э.А.* Автоматизация электротермического комплекса с забойным парогенератором для повышения нефтеотдачи пластов с высоковязкой нефтью/ Э.А. Загривный, В.И. Маларев, В.О. Зырин // Записки Горного института, 2011. Т.192. С. 125-130.
12. *Malarev V.I., Kopteva A.V.* 2017 Borehole electric steam generator electro-thermal calculation for high-viscosity oil productive layers development *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. St. Petersburg. 16-19 May.*

13. *Загривный Э.А*. Влияние работы забойных электротермических комплексов на качество электрической энергии / Э.А. Загривный, В.И. Маларев, Д.А. Устинов, В.О. Зырин // Электротехника, 2011. № 10. С. 27-31.
14. Пат.№2282018. Устройство для тепловой обработки призабойной зоны скважины /В.С. Литвиненко, Э.А. Загривный, А.Е. Козярук, Г.Н. Соловьев; от 15.09.06.
15. Пат. .№2368760. Устройство тепловой обработки призабойной зоны скважины / Э.А. Загривный, В.И. Маларев, Е.Е. Мельникова; от 09.27.2009.
16. *Frolov, V., Petrov, G., Yushin, B., (...), Churkin, I., Ivanov, D.* Research and development of plasma technologies of spraying of coatings, 18th Symposium on Physics of Switching Arc, FSO 2009, с. 162-165.
17. *Obraztsov, N.V., Frolov, V.Y.* A two-dimensional axisymmetric model of an AC arc // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, с. 430-432.
18. *Frolov, V.Y., Kvashnin, A.O., Murashov, I.V.* Nonstationary mathematical model of a magnetic arc blast system. Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus.
19. *Korotkov, A., Frolov, V.* Experimental studies of electrical load schedules of residential electricity consumers in urban distributive power grids, 2015 Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved), 60(4), с. 337-346.
20. *Kozakov, R., Khakpour, A., Gorchakov, S., (...), Podporkin, G., Frolov, V.* Investigation of a multi-chamber system for lightning protection at overhead power lines, 21st Symposium on Physics of Switching Arc 2015, FSO 2015, с. 150-154.
21. *Obraztsov, N.V., Subbotin, D.I., Popov, V.E., Frolov, V.Y., Surov, A.V.* Modelling of heat-ing of plasma-chemical reactor in Comsol Multiphysics // 2018 Journal of Physics: Conference Series, 1038(1), 012137.

УДК. 621.313.333.2

МАЛЬКОВА Я.М.,
ВАСИЛЬЕВ Б.Ю.
Санкт-Петербургский горный университет

РАЗРАОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЬНОГО МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В СОСТАВЕ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Аннотация. Представлены результаты исследования модульного многоуровневого инвертора при разных алгоритмах модуляции: синусоидальной ШИМ, сдвинутой по амплитуде, синусоидальной ШИМ, сдвинутой по фазе. Применение преобразователя частоты на основе модульной многоуровневой структуры обосновано, исходя из сформулированных критериев выбора.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, модульный многоуровневый преобразователь, алгоритмы ШИМ, шаровая мельница.

MALKOVA Y.M.,
VASILEV B.U.
Saint-Petersburg Mining University

DEVELOPMENT OF THE CONTROL SYSTEM OF THE MODULAR MULTI-LEVEL FREQUENCY CONVERTER IN THE COMPOSITION OF A TWO-MOTOR BALL MILL ELECTRIC DRIVE

Abstract. The results of a research of modular multilevel inverter with different modulation algorithms are presented: a sinusoidal PWM shifted in amplitude, a sinusoidal PWM shifted in phase. The use of a converter based on a modular multi-level structure is justified on the basis of formulated selection criteria.

Keywords: automated electric drive, modular multilevel converter, PWM algorithms, ball mill.

На сегодняшний день современные промышленные предприятия должны обеспечивать не только качество и высокую производительность продукции, но и эффективно использовать энергетические ресурсы.

Существующие российские производства, как правило, не могут обеспечить минимальное энергопотребление, так как используют высоковольтные преобразователи частоты на основе двухзвенных схем. С помощью активных преобразователей таких, как модульный многоуровневый преобразователь, возможно не только оптимизировать потребление электрической энергии, но и улучшить эксплуатационные характеристики производства и обеспечить повышенные показатели электромагнитной и энергетической совместимости [1]. Однако широкое использование модульных многоуровневых преобразователей требует проведения исследований и усовершенствования существующих алгоритмов управления. Таким образом, целью работы является повышение энергоэффективности промышленного предприятия за счет автоматизации механизма вращения шаровой мельницы с помощью автоматизированного электропривода. Для достижения цели был поставлен ряд задач:

- анализ токов и напряжений модульного многоуровневого инвертора с синусоидальной ШИМ, сдвинутой по амплитуде при частоте модуляции 1 кГц;

- исследование напряжения на выходе модульного многоуровневого инвертора с синусоидальной ШИМ, сдвинутой по амплитуде, при разной частоте и форме несущих сигналов;

- анализ токов и напряжений модульного многоуровневого инвертора с синусоидальной ШИМ, сдвинутой по фазе при частоте модуляции 1 кГц;

- исследование напряжения на выходе модульного многоуровневого инвертора с синусоидальной ШИМ, сдвинутой по фазе, при разной частоте и форме несущих сигналов.

Выбор модульной многоуровневой структуры обоснован особенностями объекта управления, требованиями, которые предъявляются к современным электроприводам и предпочтительной для использования топологией преобразователя частоты с общей шиной постоянного тока.

Особенностями объекта управления – шаровой мельницы являются:

- большая мощность более 1 МВт;
- высокое напряжение 6 или 10 кВ;
- самый мощный потребитель на ГОК.

Требования, предъявляемые к современным электроприводам:

- высокие требования к электромагнитной совместимости;
- высокие требования по надежности;
- высокие требования по энергетическим характеристикам;
- высокие требования по массогабаритным характеристикам.

АНАЛИЗ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ МОДУЛЬНОГО МНОГОУРОВНЕГО ИНВЕРТОРА

Исследовались напряжения на выходе инвертора, токи в плечах инвертора и напряжения на конденсаторах, находящихся в составе модулей инвертора при разных видах ШИМ. Полученные осциллограммы в результате исследований преобразователя с синусоидальной ШИМ, сдвинутой по амплитуде представлены на рис. 1, при исследовании с синусоидальной ШИМ, сдвинутой по фазе представлены на рис. 2.

Таким образом, при использовании синусоидальной ШИМ, сдвинутой по фазе достигается больший коэффициент использования по напряжению, наблюдается выравнивание токов в плечах фаз инвертора и одинаковые значения напряжений на всех конденсаторах.

При использовании ШИМ со сдвинутыми по амплитуде несущими сигналами рекомендуется использовать алгоритмы векторной модуляции с целью повышения коэффициента использования по напряжению. Для выравнивания напряжений на конденсаторах необходимо дополнение модуляционной системы управления алгоритмами выравнивания напряжений.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫХОДЕ МОДУЛЬНОГО МНОГОУРОВНЕГО ИНВЕРТОРА

Получены зависимости гармонического состава напряжения на выходе инвертора от частоты и формы несущих сигналов. Исследования проводились при частоте модуляции 0,5 кГц, 1 кГц и 2 кГц; при форме несущих сигналов: треугольной, с задним и передним фронтами. Результаты исследований с ШИМ, со сдвинутой по амплитуде представлены на рис. 3, а со сдвинутой по фазе - на рис. 4.

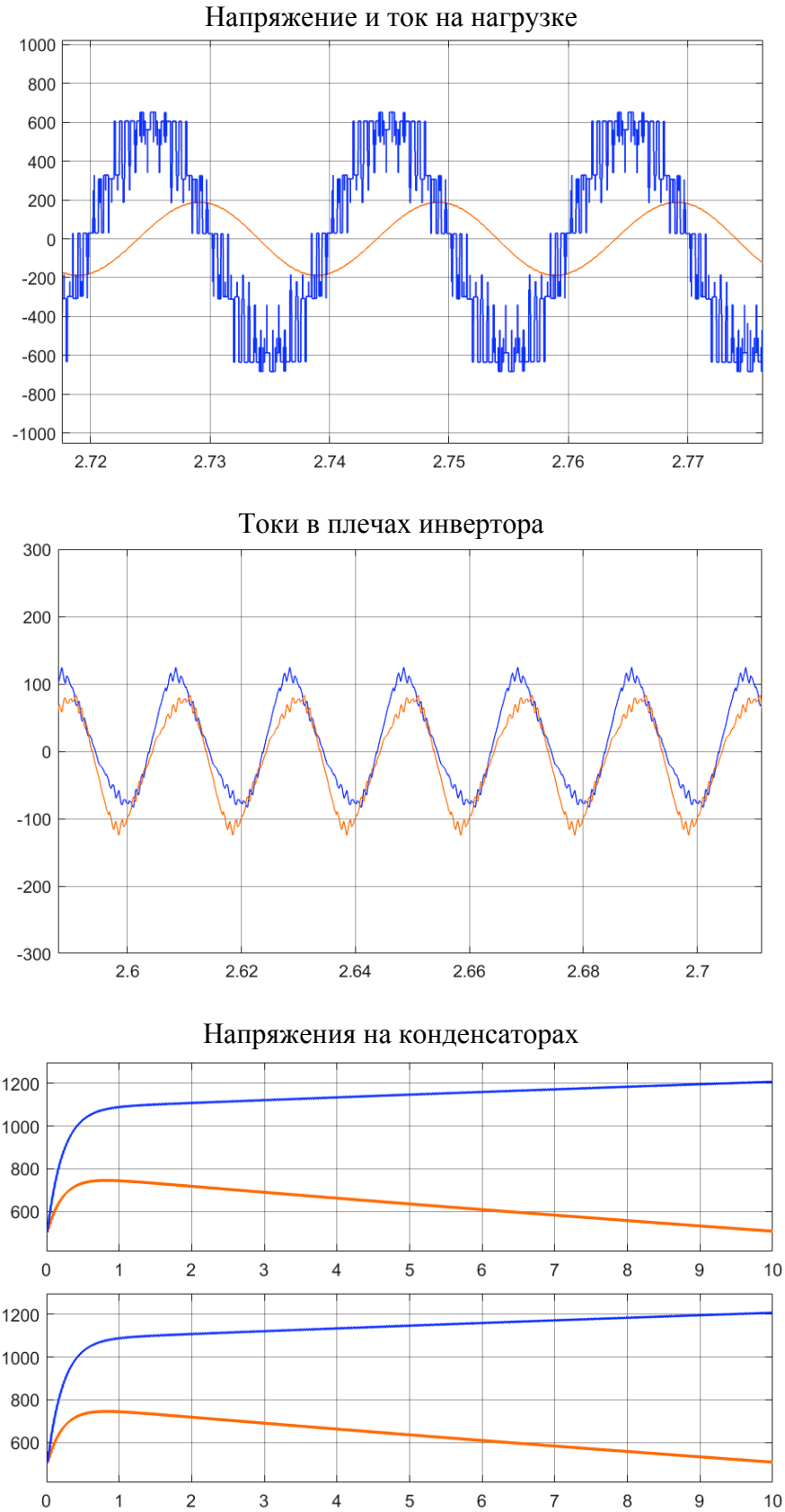


Рисунок 1 - Характеристики токов и напряжений при сдвинутой по амплитуде ШИМ

Напряжение и ток на нагрузке

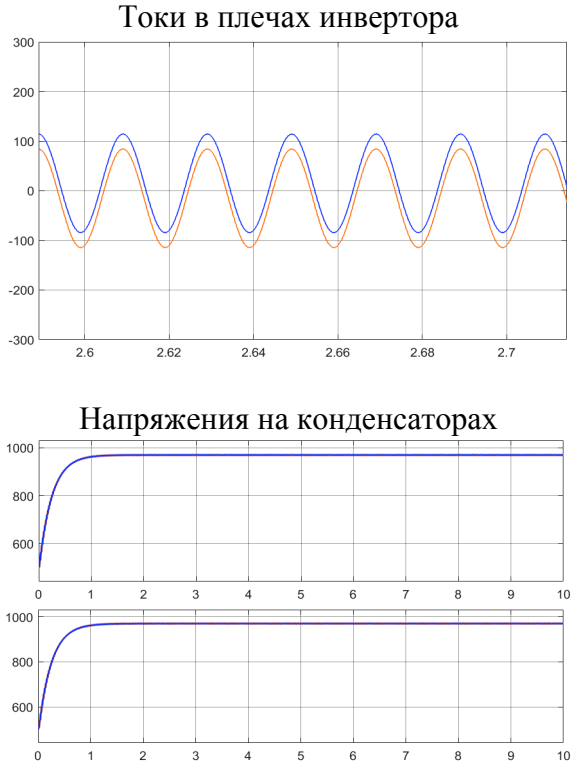
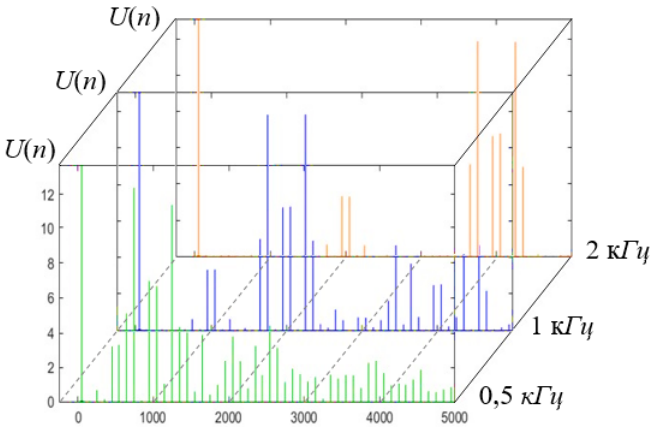


Рисунок 2 - Характеристики токов и напряжений при сдвинутой по фазе ШИМ

Зависимость гармонического состава от частоты несущих сигналов



Зависимость гармонического состава от формы несущих сигналов

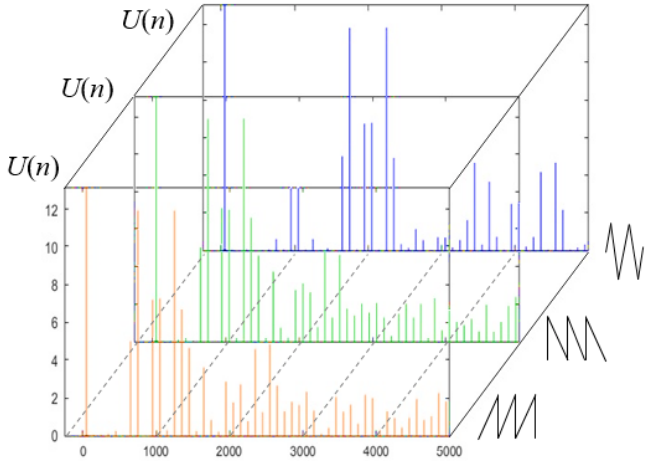
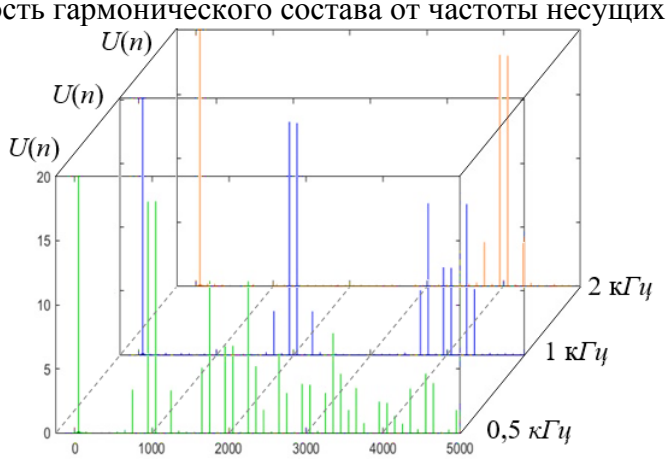


Рисунок 3 - Гармонический состав напряжения на нагрузке при сдвинутой по амплитуде ШИМ

Зависимость гармонического состава от частоты несущих сигналов



Зависимость гармонического состава от формы несущих сигналов

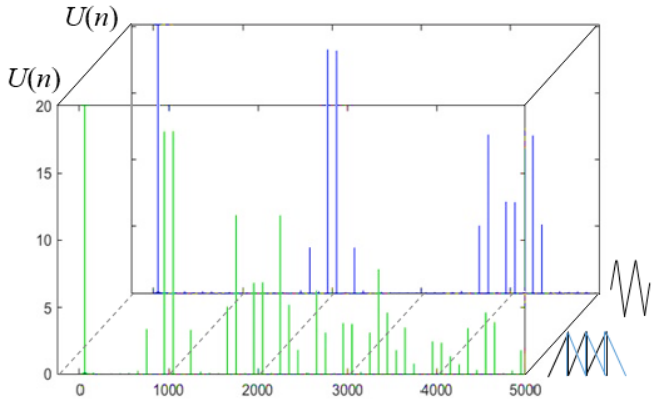


Рисунок 4 - Гармонический состав напряжения на нагрузке при сдвинутой по амплитуде ШИМ

При использовании ШИМ, сдвинутой по фазе на частоте 2 кГц, формирование пакетов гармонических составляющих происходит только, начиная с частоты 4 кГц. В обоих случаях повышение частоты модуляции приводит к снижению искажения формы выходного напряжения. Исследования форм несущих сигналов, выявили значительные преимущества треугольной формы перед другими. Однако, амплитуды гармонических составляющих при использовании ШИМ по амплитуде составляют не более 12 % от основной гармоники, а при использовании ШИМ по фазе - 18 % [2, 3].

Проведены исследования модульного многоуровневого преобразователя частоты с двумя видами синусоидальной ШИМ. В ходе исследований определено, что предпочтительнее использование синусоидальной ШИМ, сдвинутой по фазе. Повышенное значение гармонических составляющих возможно скомпенсировать с помощью выходных согласующих устройств или с помощью повышения частоты модуляции.

СПИОСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефимов А.А*. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / А.А. Ефимов, Р.Т. Шрейнер. – Новоуральск: Изд-во НГТУ, 2001. – 250 с.
2. *Perez M.A., Bernet S., Rodriguez J., Kouro S., Lizana R.* 2015 Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*
3. *Perez M.A., Rodriguez J., Fuentes E.J., Kammerer F.* 2012 Predictive control of a AC-AC modular multilevel converters *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRISL ELECTRONICS*

4. *Obraztsov, N.V., Frolov, V.Y.* A two-dimensional axisymmetric model of an AC arc // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, c. 430-432.
5. *Korotkov, A., Frolov, V.* Methods of determination the electrical load schedules on areas in urban distributive power grids, Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW 2016, 7448254, c. 601-603.
6. *Frolov, V.Ya., Ivanov, D.V.* Calculation of a plasma composition and its thermo-physical properties in cases of maintaining or quenching of electric arcs 2018. Journal of Phys-ics: Conference Series, 1058(1), 012040.
7. *Vostrov, K., Frolov, V., Safonov, E.* Development of current limiting device for short and autonomous networks // 22nd Symposium on Physics of Switching Arc, 2017-September, c. 182-185.

УДК 621.316.925.1

МИНАКОВА Т. Е.,
ШИШКИН С.И.
Санкт-Петербургский горный университет

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация. Предложен новый алгоритм работы устройств местной автоматики (повторного включения, частотной разгрузки, автоматического ввода резерва) совместно с системой релейной защиты подстанции. Повышение надежности и бесперебойности электроснабжения электроустановок горнодобывающего комплекса обеспечивается за счет использования признаков и алгоритмов выявления аварийных ситуаций, а также совместной работы системы релейной защиты и автоматики подстанции. Введен признак идентификации уровня снижения напряжения на шинах распределительного устройства с автоматическим вводом резерва, а также вида релейной защиты, отключившей оборудование в аварийном режиме. Предложены метод и расчетные выражения уставок параметров срабатывания автоматического ввода резерва.

Ключевые слова: микропроцессорная релейная защита; признаки аварийного режима; устройство автоматического ввода резерва; интеграция действия релейной защиты и автоматики; алгоритм работы автоматики.

MINAKOVA T.E.,
SHISHKIN S.I.
Saint-Petersburg Mining University

IMPROVING RELIABILITY OF OPERATION OF ELECTRICAL SYSTEMS OF MINERAL-RAW MATERIAL COMPLEX

Abstract. A new algorithm of operation of local automatics devices (autoreclosing, underfrequency load shedding, automatic reserve entry) together with the relay protection system of the substation is proposed. Improvement of reliability and continuity of power supply of electric installations of mining complex is provided due to use of signs and algorithms of emergency situation detection, as well as joint operation of relay protection system and substation automatics. The sign of identification of the level of voltage reduction on the buses of the switchgear with automatic reserve entry, as well as the type of relay protection, which disconnected the equipment in emergency mode, is introduced. Method and calculated expressions of setpoints of parameters of automatic reserve input actuation are proposed.

Keywords: microprocessor relay protection; signs of emergency operation; device of automatic input of a reserve; integration of action of relay protection and automatic equipment; automatic equipment operation algorithm.

ВВЕДЕНИЕ

Как показали события марта 2020 года на рынках нефти и минеральных ресурсов, несбалансированность их добычи и потребления приводит к обвалам цен, дефолтам национальных экономик (Ливан), обвалу американского индекса Dow Jones и других фондовых рынков. В таких условиях проблема бесперебойности и надежности деятельности предприятий, добывающих и использующих топливные ресурсы

приобретает особую важность.

Основными устройствами релейной защиты электротехнических комплексов в настоящее время являются микропроцессорные релейные защиты (МУРЗ) [1]. Релейная защита на базе микропроцессорной техники позволяет использовать признаки и алгоритмы выявления аварийных ситуаций, которые были теоретически обоснованы, но не получили практического применения [4, 5, 6].

Следовательно, актуальной становится разработка и совершенствование новых средств релейной защиты и автоматики электрических сетей и систем электроснабжения [7]. До настоящего времени недостаточно эффективными остаются устройства местной автоматики [8]. В этой связи целесообразным становится использование МУРЗ [9] для широко распространенных устройств автоматического ввода резерва (АВР) и автоматического повторного включения (АПВ).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Стандартная схема электроснабжения предприятия горнодобывающей промышленности имеет два ввода (источника питания), распределительные устройства низкого напряжения 6-10 кВ, которые предполагает раздельную работу секций (систем) шин. В качестве устройств местной автоматики предполагается установка АВР на секционном (*Q*5) выключатели и АПВ на вводах (Q1 и Q2), также на отходящих линиях (L1 - L10) (рис. 1) [10, 11]. Для такой схемы возможны следующие варианты аварийных режимов:

1. КЗ на питающем трансформаторе, отключение трансформатора основной защитой - продольной дифференциальной, без выдержки времени.
2. КЗ на питающем трансформаторе, без отключения трансформатора быстродействующей защитой.
3. КЗ на шинах – запускается МТЗ с выдержкой времени или резервная защита от внешних сверхтоков.
4. КЗ на отходящих линиях. В этом случае КЗ должно отключаться соответствующей защитой отходящей линии, как правило, с относительной селективностью, и с выдержкой времени.
5. КЗ на ВЛ вводов – ввод отключается быстродействующей защитой либо защитой с выдержкой времени (при допустимости защиты с выдержкой времени.

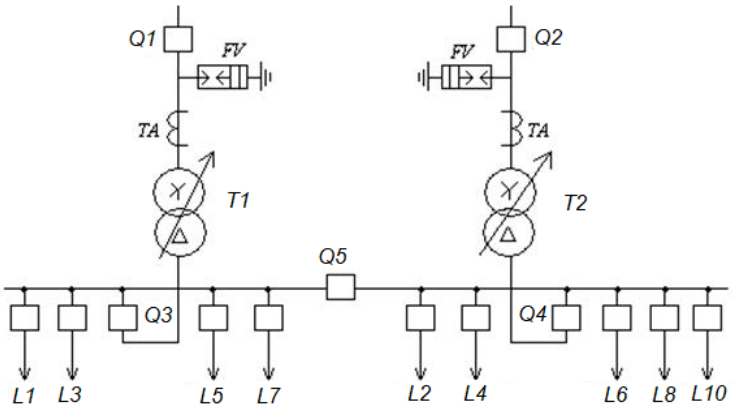


Рисунок 1 - Схема двухтрансформаторной подстанции 110/10 кВ

АВР должно отрабатывать в 1-м, 2-м и 5-м случаях, включая резервный источник питания после отключения основного (поврежденного) трансформатора [12, 13]. В первом аварийном режиме сигналом к срабатыванию АВР может быть отключение трансформатора дифференциальной защитой. В этом случае время срабатывания АВР может отстраиваться со ступенью селективности от времени срабатывания быстродействующей защиты трансформатора и приниматься приблизительно $t_{С.З} = 0{,}3$ с.

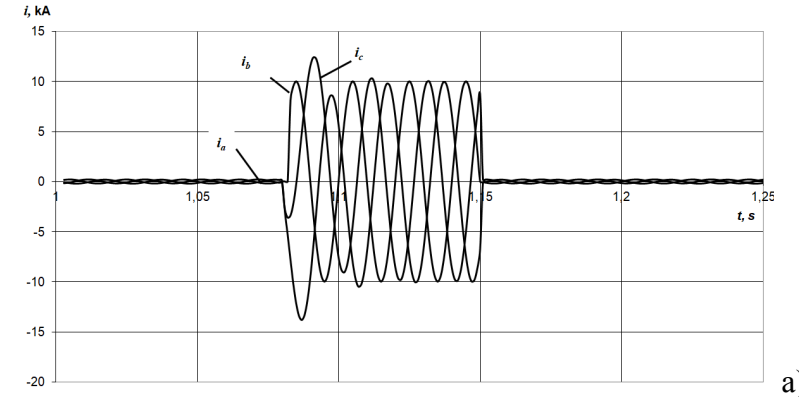
Сигнал о срабатывании быстродействующей защиты трансформатора может быть идентификационным признаком необходимости включения секционного выключателя (разрешении срабатывания АВР) после подтверждающих сигналов о наличии напряжения на резервном источнике (втором трансформаторе), контроле напряжения параллельных вводов и включении режима «Отходящая линия».

Во втором и пятом случае критерием наличия повреждения именно в трансформаторе (то есть после вводного выключателя) может служить критическое снижение напряжения хотя бы в одной из фаз при одновременном увеличении тока фазы (рис. 2). Предварительно уставку по напряжению можно задать, отстраиваясь от снижения напряжения при внешних КЗ (то есть на шинах или отходящих линиях). На практике напряжение в таком режиме задается в пределах $U_{мин} = (0,2 – 0,4)\ U_{ном}=U_{С.З.1}$. В случае КЗ в цепи трансформатора напряжение на шинах НН будет еще более низким, так как будет отсутствовать подпитка напряжения со стороны источника питания (силового трансформатора). Поэтому для первоначальной уставки можно предложить формулу (1):

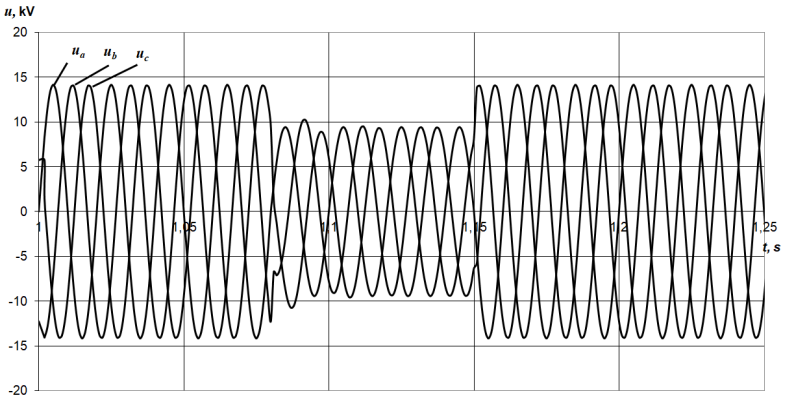
$$U_{С.З.2} = (0,2 – 0,4) \cdot U_{ном} / K_{н}, \qquad (1)$$

где $K_{н}$ – коэффициент надежности.

В этом случае сигналом к срабатыванию АВР (то есть включению секционного выключателя) может быть сигнал блок–контакта секционного выключателя (при отключении). Время срабатывания АВР в этом случае будет $t_{с.з} = t_{отк\ ввод\ выкл}$, и это время является минимально возможным, так как включение на параллельную работу поврежденного основного источника и резервного источника недопустимо.



а)



б)

Рисунок 2 - Двухфазное КЗ на шинах РУ 10 кВ

В 3-м и 4-м вариантах развития событий и срабатывание АВР должно быть блокировано, так как при КЗ на шинах и неотключенном КЗ на отходящий линии основной источник питания не является поврежденным и не требует подключения резервного источника. АВР следует запретить даже в случае отключения КЗ на

присоединении и шинах выключателем на вводе трансформатора (основного источника питания). Идентификационным критерием такого варианта развития событий является меньшее снижение напряжения по сравнению с напряжением $U_{С.З.}$, так как в этих случаях напряжение поддерживается ЭДС нагрузки 6 (10) кВ, особенно двигательной нагрузки (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Реализация алгоритма можно рассмотрена на примере МУРЗ второго поколения, имеющего гибкую логику, что позволяет задавать требуемую для конкретного защищаемого объекта последовательность действий [9].

Описанный алгоритм реализуется схемой, представленной на рис. 3.

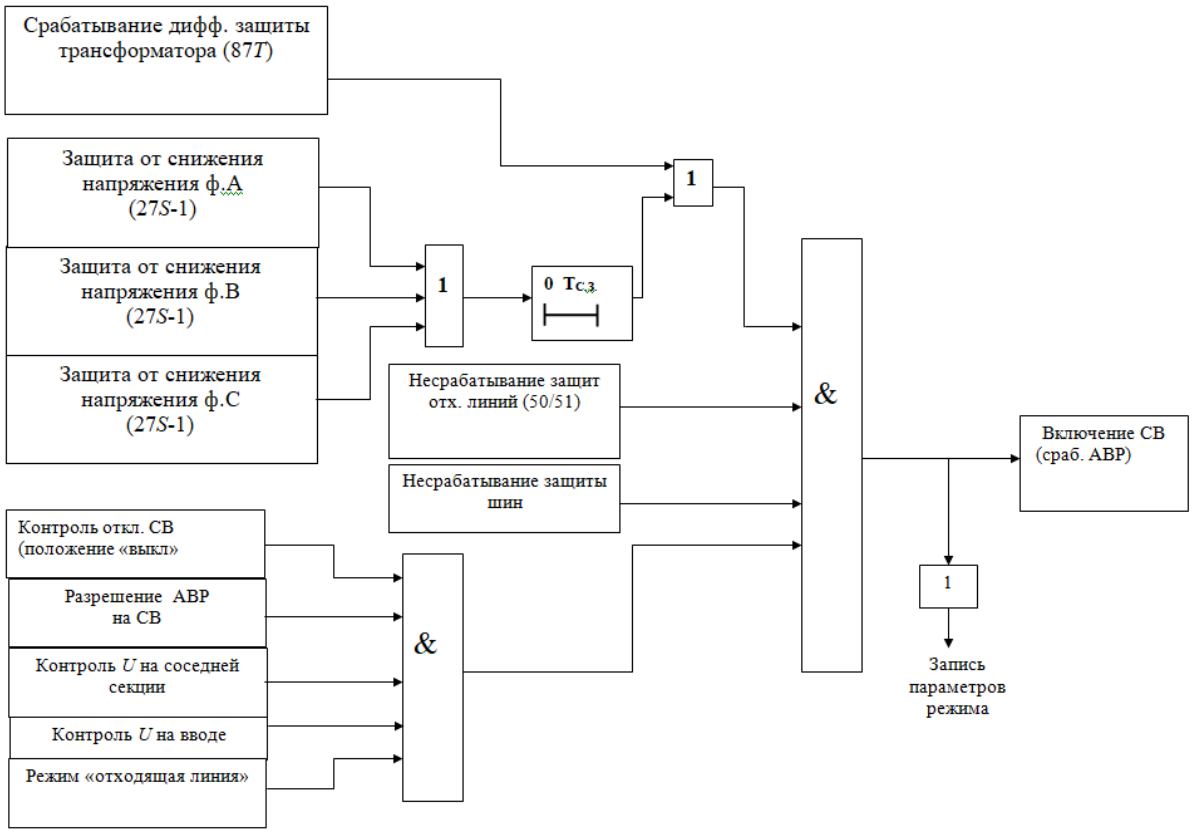


Рисунок 3 - Разработанный алгоритм действия

ВЫВОДЫ

МУРЗ используют многокритериальные признаки и алгоритмы выявления аварийных ситуаций и тем самым обеспечивать селективное действие релейных защит. Переход к подобным алгоритмам позволит уменьшить количество излишних срабатываний систем релейной защиты и автоматики, повысить чувствительность и быстродействие систем релейной защиты. Предложенный алгоритм действия АВР снижает время перерыва электроснабжения потребителей, что приводит к повышению надежности электроснабжения. Переход к учету взаимовлияния и взаимодействия разных видов защит и автоматики является началом перехода к самоадаптивным смарт-системам релейной защиты, не требующей постоянного контроля со стороны обслуживающего персонала и обеспечивающий более надежное электроснабжение, минимальное время перерыва подачи электроэнергии и максимальные чувствительность и быстродействие.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kostin V.N.*, *Minakova T.E.* 2017 Protective and control relays as coal-mine power-supply ACS subsystem *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies"* 032017.
2. *Belsky A.A., Korolyov I.A.* 2018 Thermal oil recovery method using self-contained windelectric sets *Journal of Physics: Conference Series "International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 - Techniques and Technologies of the Automated Mechanical Engineering"* 3.
3. *Abramovich B.N., Sychev Y.A.* 2017 The structure selection of hybrid correction device for centralized and distributed electrical networks *11th International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Dynamics 2017 Proceedings* 1-6.
4. *Minakov V.F., Lobanov O.S., Makarchuk T.A., Minakova T.E., Leonova N.M.* 2017 Dynamic management model of innovations generations *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM* 849-852.
5. *Gulkov Y.V., Ustinov D.A.* 2017 Electric power quality distortions influencing oil processing plant parameters and characteristics *International Journal of Applied Engineering Research* 12(9) 1127-1130.
6. *Belsky A.A.*, *Dobush V.S.* 2017 Autonomous electrical heating facility supplied by wind turbine for elimination of oil wellbore paraffin deposits *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017* 8076256.
7. *Ustinov D.A.*, *Baburin S.V.* 2016 Synthesis procedure of the power supply systems topology at mineral resource enterprises based on logical-probabilistic assessments *International Journal of Applied Engineering Research* 11(9) 6402-6406.
8. *Kostin V.N., Minakova T.E., Kopteva A.V.* 2018 Urban substations transformers allowed loading *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus* 692-695.
9. *Minakov V.F., Minakova T.E., Galstyan A.Sh., Shiyanova A.A.* 2015 Time constant of innovation effects doubling *Mediterranean Journal of Social Sciences* 6 36.
10. *Abramovich B.N., Sychev Y.A., Prokhorova V.B.* 2017 Electrical complex of combined power supply on the base of renewables and hybrid correction device *Conference of Open Innovation Association, FRUCT 20. Сер. "Proceedings of the 20th Conference of Open Innovations Association, FRUCT 2017"* 3-9.
11. *Minakov V.F.*, *Minakova T.E., Lobanov O.S., Kostin V.N., Makarchuk T.A.* 2017 The Expansion of Time Series Innovations in a Series of Sigmoid *International Journal of Applied Business and Economic Research* 15 311-319.
12. *Lobanov O.S., Minakov V.F.* 2018 The hierarchy model of telecommunication needs in geoinformation resources *18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM* 781-788.
13. *Minakov V.F.*, *Lobanov O.S., Minakova T.E., Makarchuk T.A., Kostin V.N.* 2017 The law of diminishing marginal productivity in the model of pure discounted income of innovations *International Journal of Economic Research* 14(14) 435-441.
14. *Минаков В.Ф.* Смарт-инновации в индустрии 4.0. / Сборник научных статей международной научно-практической конференции «Интеллектуальные и информационные технологии в формировании цифрового общества». - СПб.: СПбГЭУ, 2017. С. 69-73.
15. *Bozhkov M.I.*, *Kostin V.N.* 2016 Technocenological approach to managing power supplying substation loads *International Journal of Applied Engineering Research* 11(9) 6736-673916.
16. *Murashov, I., Frolov, V., Kadyrov, A.* Development of the arc plasma torch operation mathematical model for spheroidization of fine-dispersed powders, 2018. Journal of Physics:

Conference Series, 1058(1), 012024.
17. *Frolov, V.Y., Kvashnin, A.O., Murashov, I.V.* Nonstationary mathematical model of a magnetic arc blast system. Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus.
18. *Vostrov, K., Frolov, V., Safonov, E.* Development of current limiting device for short and autonomous networks // 22nd Symposium on Physics of Switching Arc, 2017-September, с. 182-185.
19. *Frolov, V.Y., Neelov, A.A., Zhiligotov, R.I., Bystrov, A.V.* Identification of the protection parameters of the local electrical network taking into account the detuning of the inrush current Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, с. 626-628.

УДК 621.311:621.316

НЕПША Ф.С.,
ВОРОНИН В.А.
Кузбасский государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева

К ВОПРОСУ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Аннотация. Угольные шахты характеризуются значительной установленной мощностью потребителей, сложной и разветвленной структурой электрических сетей, резкопеременным характером нагрузки. В связи с этим, затраты на электроэнергию на угольных шахтах могут достигать до 25% от себестоимости добычи угля, что обуславливает необходимость разработки мероприятий по снижению потерь электроэнергии. В статье рассматриваются вопросы компенсации реактивной мощности (КРМ) в системах электроснабжения (СЭС) угольных шахт. С появлением компенсирующих устройств взрывозащищенного исполнения (УКРВ) стало возможным выполнение индивидуальной и групповой КРМ, что требует решения задачи оптимизации. Авторами выявлено, что УКРВ могут быть подключены к любой точке шахтовой сети и иметь различную комплектацию. Выявлено, что выбор комплектации УКРВ требует комплексного подхода, учитывающего особенности режимов работы горно-шахтного оборудования. Предварительная оценка технико-экономического эффекта от КРМ с использованием УКРВ показала, что задача оптимизации их размещения и комплектации является важнейшей научно-технической задачей, решение которой необходимо для повышения энергоэффективности существующих и проектируемых СЭС угольных шахт.

Ключевые слова: угольные шахты, оптимизация, повышение энергоэффективности, компенсация реактивной мощности, методы оптимизации, УКРВ

NEPSHAF.S.
VORONIN V.A.
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

THE PROBLEM OF THE OPTIMUM PLACEMENT OF EXPLOSIVE PROTECTED DEVICES FOR COMPENSATION OF REACTIVE CAPACITY ON COAL MINES

Abstract: Coal mines are characterized by a significant installed capacity of consumers, a complex and branched structure of electric networks, and a sharply changing load pattern. In this regard, the cost of electricity in coal mines can reach up to 25% of the cost of coal production, which necessitates the development of measures to reduce electricity losses. The article deals with the issues of reactive power compensation (RPC) in power supply systems of coal mines. With the advent of Mine condenser explosion-protected device it became possible to perform individual and group RPC, which requires solving the optimization problem. The authors found that the Mine condenser explosion-protected device can be connected to any point of the mine network and have a different configuration. It was revealed that the choice of the configuration of the Mine condenser explosion-protected device requires a comprehensive approach that takes into account the features of the operating modes of mining equipment. Preliminary assessment of the technical and economic effect of RPCwith the use of Mine condenser explosion-protected device showed that the task of optimizing their location and equipment is the most important

scientific and technical task, the solution of which is necessary to improve the energy efficiency of existing and planned the power supply systems of coal mines.

Keywords: coal mines, optimization, energy efficiency improvement, reactive power compensation, optimization methods, explosion-proof reactive power compensation devices.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых №МК-236.2020.8 по теме «Исследование и разработка энергоэффективных схем электроснабжения выемочных участков угольных шахт с применением технологий интеллектуального управления потоками электроэнергии и мощности».

Значительное влияние на формирование величины потерь электроэнергии в системах электроснабжения (СЭС) угольных шахт оказывают перетоки реактивной мощности. Для их уменьшения и снижения потерь электроэнергии должны проводиться мероприятия по компенсации реактивной мощности, заключающиеся в установке батарей статических конденсаторов (БСК).

Как отмечается в работе [1] в настоящее время в СЭС угольных шахт БСК устанавливаются централизовано на шинах ГПП, что не позволяет полностью использовать потенциал БСК в области снижения потерь активной мощности.

В настоящее время на рынке появились устройства КРМ, производимые во взрывозащищенном исполнении. Современные технологии позволяют изготавливать комплектные устройства с использованием БСК, т.н. установки конденсаторные рудничные взрывобезопасного типа (УКРВ). Такие установки можно размещать на распределительных подземных пунктах (РПП) и передвижных участковых подстанциях (ПУПП) [2].

Появление подобных устройств обуславливает необходимость оценки эффективности их использования в сети угольных шахт, поиск оптимального размещения, как отмечается в работе [3, 15], данный вопрос остается актуальным в настоящее время. Решения задачи разработки алгоритма определения оптимального места размещения компенсирующих устройств были предложены в таких работах, как [4, 5, 10-14], однако в данных работах не учитывались особенности эксплуатации оборудования в угледобывающих шахтах.

Для определения характеристик УКРВ была изучена техническая документация от производителей таких установок, таких как ЗАО «Шахтинский завод горно-шахтного оборудования», ООО «Корпорация «РудЭнергоМаш», а также группа компаний Energy X Components. Проведенный анализ технической документации УКРВ позволил установить следующее:

− УКРВ могут быть выполнены на любой уровень напряжения шахтовой сети (0,66 кВ, 1,14 кВ, 3,3 кВ, 6 кВ);

− УКРВ может иметь любую конфигурацию и включать ступени регулирования любой мощности;

− УКРВ размещается непосредственно в составе энергопоезда;

− УКРВ управляются согласно заданному алгоритму (при изменении tg φ, напряжения, в составе системы регулирования напряжения в СЭС угольной шахты).

УКРВ могут быть использованы для централизованной, групповой, индивидуальной и комбинированной компенсации реактивной мощности. На данный момент отсутствует методика по выбору мест размещения УКРВ, инструкция по эксплуатации УКРВ также не содержит каких-либо указаний по выбору оптимально места установки [6].

Авторы считают, что при оптимизации размещения и комплектации УКРВ в СЭС угольных шахт необходимо учитывать следующие факторы:

1. Наличие свободного места в лаве. Учитывая значительные габариты УКРВ, необходимо учитывать фактор наличия свободного пространства в лаве, который может быть учтен в качестве граничного условия при решении задачи оптимизации размещения и комплектации УКРВ. Отметим, что места размещения УКРВ должны удовлетворять требованиям [7, 8].

2. Особенности режима работы шахтового оборудовании. Учитывая резкопеременный характер нагрузки, затрудненные условия пуска шахтовых электродвигателей необходимо определить оптимальные моменты времени для включения (отключения) УКРВ в процессе эксплуатации.

3. Влияние мощности КУ на режим сети посредством изменения напряжения. Регулирование напряжение является одним из способов снижения потерь активной мощности [8, 9], следовательно, наряду с оптимизацией размещения БСК целесообразно рассматривать вопрос оптимизации уровня напряжения.

4. Влияние высших гармоник. С появлением частотных преобразователей в СЭС угольных шахт, задача оптимизации конфигурации БСК усложняется из-за высших гармоник т.к. при оценке эффективности компенсации реактивной мощности необходимо учитывать фактор увеличения потерь из-за наличия высших гармоник, генерируемых частотными преобразователями

Исходя из условий возможного размещения электрооборудования в сети лавы шахты – в составе энергопоездов, наиболее подходящим местом установки УКРВ является место после ПУПП. Как правило, в сети лавы имеется 5-10 ПУПП, поэтому выбор места размещения УКРВ рационально начинать исходя и предположения размещения УКРВ у каждой ПУПП.

Пример оптимального размещения УКРВ рассмотрен на участке № 2 лавы 24-59 одной из угольных шахт Кузбасса. Данный участок работ запитан от трёх ПУПП. От ПУПП-1 запитан шахтный комбайн «JOY7LS20», с расчетной мощностью 1074 кВт, от ПУПП-2 запитан ленточный конвейер для транспортировки угля номинальной мощностью 2000 кВт, от ПУПП-3 запитана насосная станция 1200 кВт.

Для моделирования процессов, происходящих в сети участка лавы, был использован программно-вычислительный комплекс (ПВК) MATLAB с установленными пакетами Simulink и SimPowerSystem. На основании разработанной модели был проведен расчет индивидуальных вкладов в потери каждой ПУПП. Основной вклад в потери активной мощности вносят потребители ПУПП-2 их вклад составляет 62,7 %. Потребители ПУПП-3 вносят наименьший вклад в общие потери и составляет всего 13,7 %. Потери, вносимые потребителями от ПУПП-1 и ПУПП-2 суммарно составляют 86,3%.

Для выбора мест расположения и номинальной мощности УКРВ использован метод покоординатного спуска. Основанием для выбора данного метода оптимизации служит малая вариативность мест размещения УКРВ в лаве и простота расчетов. Поиск оптимального размещения УКРВ представляет собой итерационный процесс. На первом шаге итерации УКРВ размещаются на каждой ПУПП со стороны НН, а их номинальная мощности выбирается из условия полной компенсации реактивной мощности. Затем номинальные мощности УКРВ уменьшаются на выбранный шаг и рассчитываются значения cos φ, потери мощности и отклонения напряжения. Граничным параметром для окончания итераций служит минимальное значение коэффициента мощности, заданное условиями технологического присоединения к электросетевой организации. Далее аналогично рассматривается вариант с размещением УКРВ только на тех ПУПП, которые вносят наибольший вклад в общие потери мощности, а также вариант групповой компенсации при размещении УКРВ на РПП-6 кВ. Для определения ПУПП, вносящих наибольший вклад в общие потери, используется диаграмма Парето. Метод оптимизации Парето позволяет определить минимальный и достаточный набор УКРВ при их максимальном влиянии на потери мощности. Согласно принципу Парето, необходимо компенсировать лишь то количество потребителей, которые создают большую часть

потерь активной мощности [4]. Обоснованием выбора данного метода является простота его применения.

На рис. 1 представлена зависимость уровня снижения потерь от номинальной мощности установленных УКРВ на одном графике. По графикам видно, что самым эффективным вариантом снижения потерь активной мощности является установка УКРВ только на 1 и 2 ПУПП.

Оценка экономической эффективности рассмотренных мероприятий была проведена по критерию максимума чистого дисконтированного дохода (ЧДД). На рис. 2 графически представлены ЧДД и сроки окупаемости с учетом дисконтирования различных вариантов.

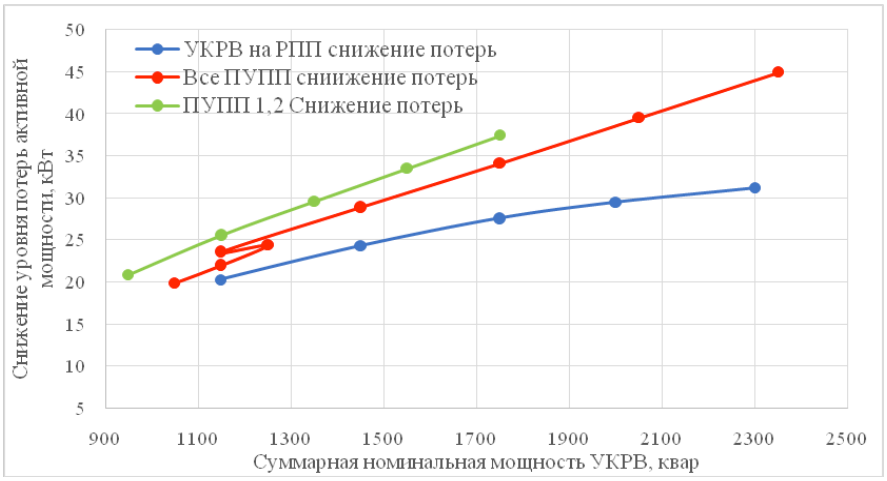


Рисунок 1 - Зависимость снижения потерь активной мощности от суммарной номинальной мощности УКРВ, все варианты

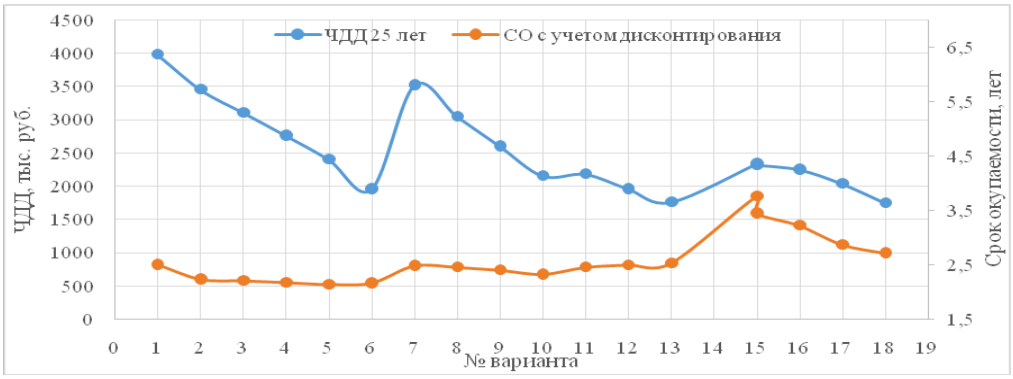


Рисунок 2 - ЧДД и срок окупаемости различных вариантов

Согласно полученным зависимостям (рис. 2) наибольший ЧДД имеет вариант 1 (размещение УКРВ на всех ПУПП). Варианты размещения УКРВ на ПУПП в соответствии с распределением Парето имеют сопоставимые значения ЧДД и незначительно меньшие сроки окупаемости. Заметно меньшую эффективность показало размещение УКРВ на РПП-6 кВ.

Выводы:

1. Определено, что применение УКРВ на выемочных участках угольных шахт экономически оправдано. Установка УКРВ на ПУПП позволяет снизить потери активной мощности в сети на 12,5 % при сроке окупаемости УКРВ 2-2,5 года. Групповая компенсация с УКРВ показала меньшую эффективность: срок окупаемости возрастает до 3-4 лет, при снижении потерь в сети на 7%.

2. Было предложено решение по оптимальному размещению УКРВ на участке лавы действующей шахты. Предложенное решение позволило сократить потери в исследуемой сети на 34,1 кВт, что обеспечивает экономию в год 540 тыс. рублей при сроке окупаемости в 2,45 года и ЧДД за 10 лет 1,94 млн. рублей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефременко В.М.* Особенности регулирования уровня напряжения в системах электроснабжения угольных шахт Кузбасса / В.М. Ефременко, Ф.С. Непша // Промышленная энергетика, 2017. № 11. С. 16–22.
2. Установка конденсаторная рудничная взрывозащищенная (УКРВ). Каталог продукции / Заводы-изготовители горно-шахтного оборудования ЗАО "ЕХС".
URL: http://oaoex.ru/upload/docs/ukrv-a-63-500-uhl5-specifications.pdf.
3. *Непша Ф.С.* Повышение энергоэффективности систем электроснабжения угольных шахт при оптимизации регулирования напряжения: дис. канд. техн. наук. КузГТУ, Кемерово, 2018.
4. *Замятин Е.О.* Компенсация высших гармоник и реактивной мощности с учетом топологии и параметров распределительной сети электротехнического комплекса предприятий: дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербургский горный университет. – СПб., 2018.
5. *Третьяков, Е.А.* Оптимизация структуры компенсирующих устройств / Е.А. Третьяков, Н.Н. Малышева, А.В. Краузе // Известия Транссиба, 2010. №4(4).
6. Установка конденсаторная рудничная взрывобезопасного исполнения типа УКРВ-Р3-6-700-УХЛ5. Руководство по эксплуатации.
7. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» (с изменениями на 8 августа 2017 года)
8. Правила устройства электроустановок; 7 изд. – М.: НТЦПБ, 2012. – 584 с.
9. *Непша Ф.С.* Разработка алгоритма оптимизации уровня напряжения в системе электроснабжения угольных шахт по критерию минимума потребления активной мощности / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко / Сборник статей по материалам II Всероссийской молодежной научно-практической конференция «Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения» (21-22 декабря 2017 г.). – Кемерово: ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева»; редкол.: С.Г. Костюк (отв. ред.) [и др.], 2017.
10. *Ефременко,В.М.* Расчет оптимального размещения компенсирующих устройств методом множителей Лагранжа / В.М. Ефременко, Р.В. Беляевский // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2012. № 6 (94). С. 138-141
11. *ÁguilaTéllez A., López G., Isaac I., González J.W.* 2018 Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review *Heliyon* 4(8)
12. *Ayalew F., Hussen S., Pasam G.* 2019 Reactive power compensation: a review *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology* 3(11) 1-7.
13. *Stanelyte D., Radziukynas V.* 2020 Review of Voltage and Reactive Power Control Algorithms in Electrical Distribution Networks *Energies* 13 58.
14. *Zhang W., Li F., Tolbert L.M.* 2007 Review of Reactive Power Planning: Objectives, Constraints, and Algorithms *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS* 22 4.
15. *Nepsha F., Belyaevsky R., Efremenko V., Varnavskiy K.* 2019 Modern Problems of Increasing Coal Mines Power Supply Efficiency *E3S Web Conf.* 10.

УДК 621.311

ПЕЛЕНЕВ Д.Н.,
АБРАМОВИЧ Б.Н.,
БАБЫРЬ К.В.
Санкт-Петербургский горный университет

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. В статье приведены результаты применения мероприятий, направленных на обеспечение селективного действия защиты от однофазных замыканий на землю для электрической сети среднего класса напряжения горного предприятия. Выполнен расчет ёмкостных токов, протекающих в отходящих присоединениях электрической сети 6 кВ режиме однофазного замыкания на землю, с использованием различных существующих методик. В результате опыта однофазного замыкания на землю в рассматриваемой распределительной электрической сети установлены фактические значения ёмкостных токов линий. На основе полученных расчетным и экспериментальным путем электрических параметров выполнен сравнительный анализ точности существующих способов определения тока однофазного замыкания. Определены критерии применимости существующих методик расчета емкостных токов для выбора уставок защит от однофазных замыканий на землю, функционирующих в условиях нестационарности параметров электрических сетей горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова:электрическая сеть, однофазное замыкание на землю, селективность действия, нестационарность параметров, методика расчета, ёмкостной ток относительно земли.

PELENEV D.N.,
ABRAMOVICH B.N.,
BABYR' K.V.
Saint-Petersburg Mining University

PROVIDING SELECTIVE PROTECTION AGAINST SINGLE-PHASE GROUND FAULTS IN CONDITIONS OF NON-STATIONARY PARAMETERS OF ELECTRIC NETWORKS MINING ENTERPRISES

Abstract. The article presents the results of the application of measures aimed at ensuring the selective action of protection against single-phase ground faults for the medium-voltage electrical network of a mining enterprise. The calculation of capacitive currents flowing in the outgoing connections of the 6 kV electric network in the mode of single-phase ground fault is performed using various existing methods. As a result of the experience of single-phase ground fault in the considered distribution network, the actual values of the capacitive currents of the lines are established. Based on the calculated and experimental electrical parameters, a comparative analysis of the accuracy of existing methods for determining the single-phase short-circuit current is performed. The criteria for the applicability of existing methods for calculating capacitance currents for selecting setpoints for protection against single-phase ground faults that operate under conditions of non-stationary parameters of electric networks of mining enterprises are determined.

Keywords: electrical network, single-phase ground fault, selectivity of action, non-stationary parameters, calculation method, capacitive current relative to the ground.

Эффективность функционирования добывающих комплексов на горных предприятиях напрямую зависит от надежной и бесперебойной работы распределительных сетей среднего класса напряжения. Одними из наиболее частых повреждений в сетях 6–10 кВ являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), количество которых достигает 70–80% от общего числа аварийных случаев. По этой причине для снижения ущербов от ОЗЗ необходимо применять устройства релейной защиты и автоматики, позволяющие селективно выявлять поврежденное присоединение и обеспечивать своевременную локализацию данного аварийного режима.

На горнодобывающем предприятии АО «Шахта «Полосухинская» была проведена модернизация центрального распределительного пункта ЦРП-1, в ходе которой были произведены работы по замене ячеек типа КСО-272 с релейными устройствами защит на ячейки типа КСО-190 ИВА с микропроцессорными терминалами защит компании ООО НТЦ «Механотроника». В процессе выполненной модернизации для обеспечения селективного действия защиты от ОЗЗнеобходимо было выполнить расчет и выбор уставок защиты.

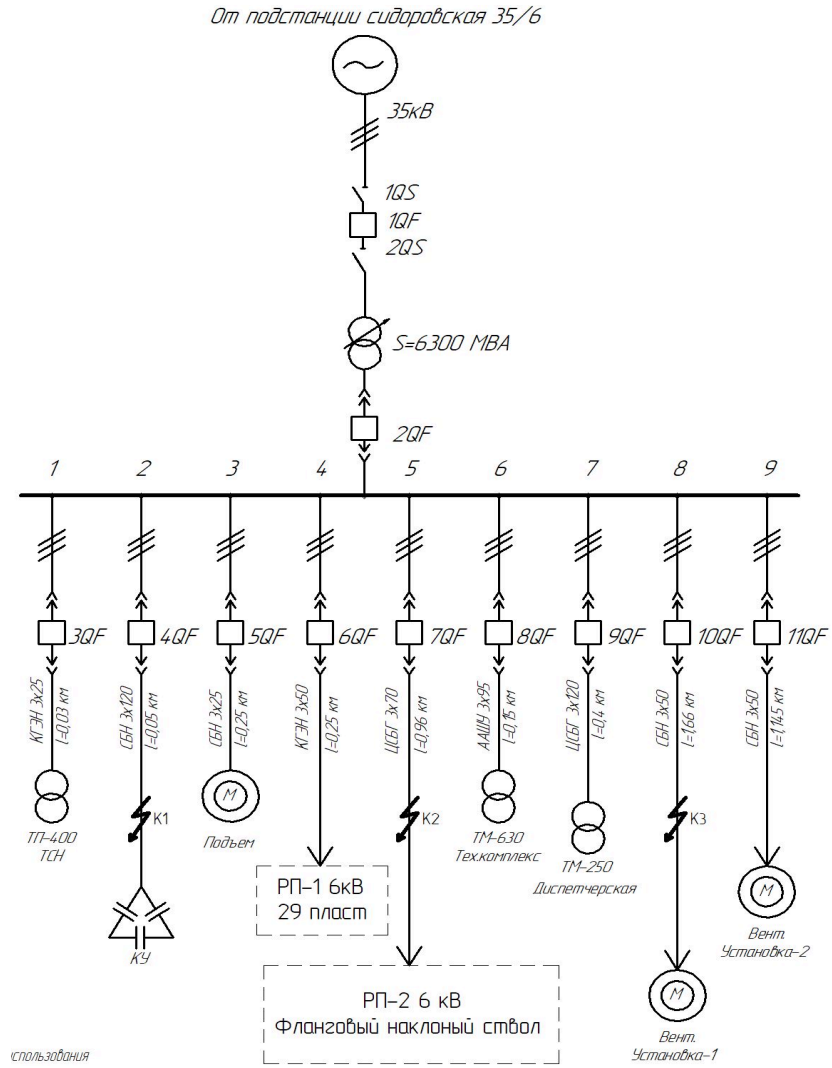


Рисунок 1 - Принципиальная схема распределительной сети 6 кВ АО «Шахта «Полосухинская»

С использованием принципиальной схемы распределительной электрической сети 6 кВ, представленной на рис. 1, и справочных данных, приведенных в [1, 2] были определены параметры линий сети, значения которых приведены в табл. 1.

Для расчета и выбора уставок защиты от ОЗЗ на сегодняшний день существуют следующие методики определения ёмкостных токов относительно земли:

1. Методика, основанная на учете ёмкостей фаз относительно земли [1]:

$$I_C = U_\phi \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_\Sigma \text{, кА,}$$

где U_ϕ – фазное напряжение сети, кВ; ω – угловая частота напряжения, рад/с; $C_\Sigma = c_i \cdot l_i$, – суммарная ёмкость фаз линий сети относительно земли, Ф; c_i – удельная ёмкость на фазу *i*-ой линии, Ф/км; l_i – длина *i*-ой линии, км.

Таблица 1.

Параметры распределительной сети АО «Шахта «Полосухинская»

№ линии	$S_{к.л.}$, мм^2	l_i, км	c_i, мкФ/км	$I_{уд.}$, А/км
1	25	0,030	0,137	0,5
2	120	0,050	0,418	1
3	25	0,250	0,137	0,5
4	50	0,405	0,292	0,68
5	70	0,960	0,331	0,8
6	95	0,150	0,382	0,9
7	120	0,400	0,418	1
8	50	1,660	0,292	0,68
9	50	1,145	0,292	0,68

2. Методика, предполагающая определение ёмкостных токов относительно земли посредством эмпирических зависимостей [2]:

$$I_C = \frac{U_л \cdot l_i}{10} \text{, А,}$$

где $U_л$ – линейное напряжение сети, кВ.

3. Методика, учитывающая удельное значение ёмкостного тока [3]:

$$I_C = I_{уд.i.} \cdot l_i \text{, А,}$$

где $I_{уд.i}$ – удельное значение ёмкостного тока*i*-ой линии, А/км.

4. Методика, учитывающая значение поперечного сечения кабельных линий [4]:

$$I_C = 0,6 \cdot l_i \cdot \sqrt{\frac{S_{к.л.i.}}{50}} \text{, А,}$$

где $S_{к.л.i.}$ – сечение *i*-ой кабельнойлинии, мм^2.

Результаты расчета ёмкостных токов линий распределительной сети (рис. 1) по вышеприведенным методикам сведены в табл. 2.

Значительные расхождения полученных результатов расчета по существующим методикам обусловили необходимость выполнения опытов однофазного замыкания на землю в распределительной сети 6 кВ ЦРП-1 предприятия АО «Шахта «Полосухинская», результаты которых позволили экспериментальным путем установить значения ёмкостных токов относительно земли отходящих присоединений рассматриваемой распределительной сети.

Экспериментальные исследования проводились следующим образом. Первый опыт ОЗЗ проводился на отходящей линии №2 (рис. 1, т. К1), путем соединения в отсеке кабельных присоединений ячейки КСО-190 ИВА фазы Сс шиной внутреннего контура заземления (рис. 2) через перемычку сечением 1,5 мм^2 длинной 1 м. Второй опыт был проведен на отходящей линии №5 (рис. 1, т. К2) путем соединения одной из фаз двигателя и заземляющего контура. Третий опыт был проведен на отходящей линии №8 (рис. 1, т. К3)

в блоке расключения начала обмоток двигателя путем соединения одной из фаз с заземляющей шпилькой.

Таблица 2.

Результаты расчета ёмкостного тока линии электрической сети 6 кВ

№ линии	I_C, А				Разница полученных результатов, %
	1	2	3	4	
1	0,015	0,021	0,017	0,014	33,3
2	0,098	0,098	0,098	0,098	0,0
3	0,052	0,069	0,055	0,047	31,9
4	0,446	0,281	0,303	0,267	40,1
5	1,198	0,665	0,845	0,750	44,5
6	0,215	0,104	0,149	0,136	36,7
7	0,630	0,277	0,440	0,409	56,0
8	1,827	1,150	1,242	1,096	40,0
9	1,428	0,793	0,856	0,756	47,1

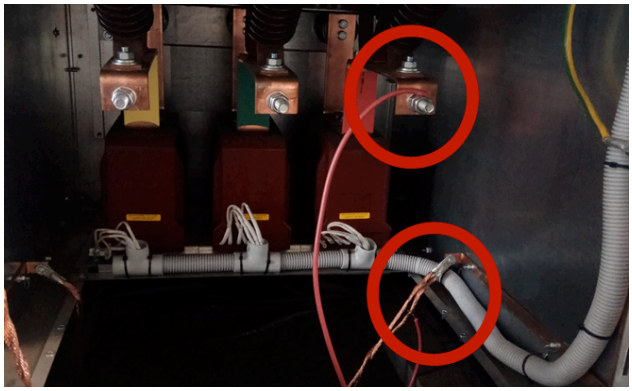


Рисунок 2 - Опыт однофазного замыкания на землю в распределительной сети 6 кВ предприятия АО «Шахта «Полосухинская»

По результатам экспериментальных исследований был выполнен сравнительный анализ полученных значений ёмкостных токов с вычисленными значениями, что позволило определить погрешность каждой из методики расчета.

На рис.3 представлен график погрешностей каждой методики расчета.

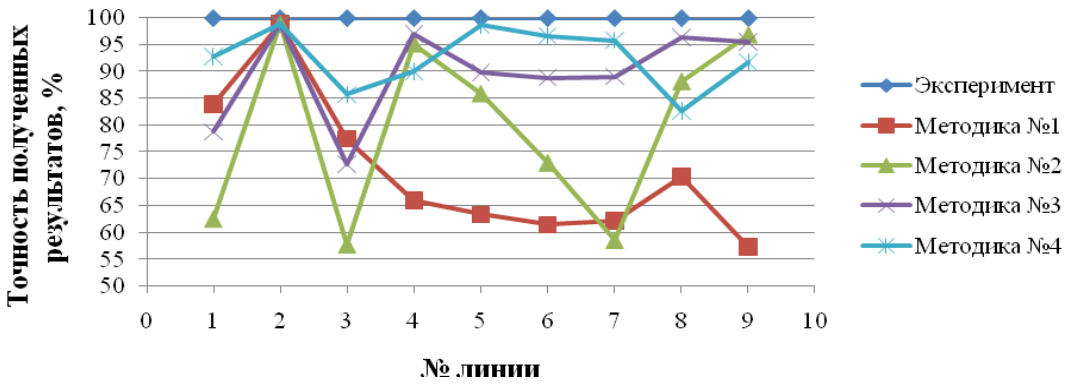


Рисунок 3 - График погрешности методик расчета емкостных токов

Из рис. 3 следует, чтонаименьшую погрешность определения ёмкостного тока относительно земли имеет методика расчета №4 по той причине, что используемая аналитическая зависимость была установлена эмпирическим путем. В этой связи для

расчета уставок токовой защиты от ОЗЗ распределительной сети ЦРП-1 была принята к использованию методика расчета №4.

В результате проведенных исследований был выбран наиболее точный способ определения ёмкостного тока линий относительно земли, применимый для сети электроснабжения горнодобывающего предприятия АО «Шахта «Полосухинская», имеющей разветвленную и неоднородную структуру.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бухтояров В.Ф., Маврицын А.М.* Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров. – М.: Недра, 1986. – 184 с.
2. *Шабад М.А.* Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
3. *Шабад М.А.* Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: – 6-е издание. – СПб.: ПЭИПК, 2017. – 141 с.
4. *Эрнст А.Д., Матвиенко П.Н., Матвиенко Т.П.* Вопросы компенсации емкостного тока замыкания. – Омский научный вестник, 2013. №2. 227.

УДК 621.3

ПТИЦЫН Д.В.,
ПТИЦЫНА Е.В.
Омский государственный технический университет
КУВАЛДИН А.Б.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕМНЫХ И СВЕТЛЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРИ ПИТАНИИ ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Аннотация. Коэффициент мощности - важный показатель эффективности работы установок со светлыми и темными инфракрасными излучателями, их индивидуальных показателей. Эффективность работы установок существенно зависит от электрического режима с использованием тока сложной формы (ТСФ). В работе объектом и предметом исследования являются инфракрасные керамические лампы для обогрева, элементы нагревательные гибкие ленточные для систем электрообогрева, светлые инфракрасные излучатели и режимы их работы при ТСФ. Целью работы является исследование индивидуальных характеристик инфракрасных излучателей при изменении амплитуды и частоты питающего напряжения для выработки рекомендаций по выбору эффективных режимов.
В работе необходимо было решить задачи:
- разработать метод исследования физических моделей инфракрасных излучателей;
- разработать рекомендации по выбору эффективных режимов работы нагрузки по результатам измерений энергетических параметров.
Индивидуальные показатели в обычном и новом режимах: коэффициент мощности керамической лампы и светлого излучателя – 0,97, элемента нагревательного гибкого ленточного – 0,83. Доказано, в новом режиме гармонический состав питающего напряжения не ухудшался.

Ключевые слова. Ток сложной формы, светлые и темные инфракрасные излучатели, режим работы.

PTITSYN D.V.,
PTITSYNA E.V.
Omsk State Technical University
KUVALDIN A.B.
National Research University
“Moscow Power Engineering Institute”

INDIVIDUAL CHARACTERISTICS OF DARK AND LIGHT RADIATORS POWERED COMPLEX WAVEFORM CURRENT

Abstract. The power factor is an important indicator of the installations efficiency with light and dark infrared radiators, their individual indicators. The installations efficiency significantly depends on the electrical mode using complex waveform current (CWC). In this work, the object and subject of research are infrared ceramic lamps for heating, flexible heating tapes for electric heating systems, light infrared radiators and their operation modes when using CWC. The purpose of this paper is research the individual characteristics of infrared radiators when changing the amplitude and frequency of the supply voltage for making recommendations on the choice of effective modes.
The authors solved the following tasks:

- develop a method for researching physical models of infrared radiators;
- develop recommendations for selecting effective load operating modes based on the results of energy parameters measurements.
The individual parameters in the normal and new modes: the power factor of the ceramic lamp and light radiator - 0.97, the flexible heating tape - 0.83. The authors proved that the harmonic composition of the supply voltage did not deteriorate in the new mode

Keywords. Complex waveform current, light and dark infrared radiators, operation mode.

Актуальность. В металле могут распространяться электромагнитные волны низкой частоты [1], а в газоразрядной плазме - возбуждаться ленгмюровские колебания частотой от 16 до 2000 Гц [2]. Изменение энергоэффективности возможно по-разному. В установках, использующих сверхвысокие частоты (СВЧ), разрабатываются методики моделирования с учетом динамики изменений свойств диэлектриков и взаимосвязи физических процессов при воздействии на них гармонических СВЧ электромагнитных колебаний. Математическая модель самосогласованной задачи электродинамики и тепломассопереноса при СВЧ термообработке капиллярно-пористых диэлектриков впервые сформулирована Ю.С. Архангельским в трехмерной постановке и в последующих работах для СВЧ установок с камерами бегущей волны и лучевого типа апериодического и методического действия [3, 4]. Нагрев диэлектриков в высокочастотных полях обеспечивает высокую скорость нагрева, экологичность, простоту управления температурой [5, 6]. Однако есть проблема неравномерности температурного поля, снижения качества продукции, сложность оборудования. В [7] установлено повышение эффективности газоразрядных излучателей низкого давления при низкочастотном внешнем воздействии: уменьшаются анодно-катодное падение потенциала и анодно-катодные потери мощности, растет световая отдача столба при частоте 200-400 Гц. В работах Г. Меккера и В. Филькенбурга установлено влияние частоты тока на излучение газового разряда [8]. В работах О.А. Попова, С.А. Свитнева установлено [9] повышение эффективности источников ультрафиолетового излучения на основе разряда низкого давления. Трубчатые бесферритные индукционные ультрафиолетовые лампы используют для обеззараживания воды, воздуха. Эффективно воздействующими частотами для инфракрасных излучателей являются частоты 102-103 Гц [10]. В [11] доказано применение инфракрасного нагрева для повышения качества сварных соединений. На предприятиях также используются электронагреватели, а для сельского хозяйства – системы обогрева. Применение стержневых индукторов и индукторно-резистивных систем нагрева потребовало разработки методик расчета мощности потерь [12]. Другим направлением повышения энергоэффективности инфракрасных излучателей является применение ТСФ. Однако в литературе не нашло отражение влияние ТСФ на эффективность работы устройств с темными и светлыми излучателями.

Таблица 1.

Показатели работы установки со светлым инфракрасным излучателем (мощностью 100 Вт)

Наименование электрического режима	Мощность из сети			Коэффициент мощности	Напряжение в узле питания, В
	Активная, P, кВт	Реактивная Q, квар	Полная, S, кВА		
1. Обычный режим: переменный ток 50 Гц	0.047	0.106	0.116	0.405	115.0
2. Новый режим: ТСФ без постоянной состав	0.037	0.042	0.0198	0.880	115.0

Показатели работы в обычном и новом электрических режимах для светлых и темных излучателей даны в табл. 1-3. Индивидуальные показатели работы излучателей в исследуемых режимах следующие: коэффициент мощности светлого излучателя - 0,97; инфракрасной керамической лампы - 0,97; элемента нагревательного гибкого ленточного – 0,83. Доказано, гармонический состав напряжения в питающей сети не ухудшается.

Таблица 2.

Показатели работы установки с инфракрасной керамической лампой для систем обогрева (мощностью 150 Вт)

Наименование электрического режима	Мощность из сети			Коэффициент мощности	Напряжение в узле питания, В
	Активная, P, кВт	Реактивная Q, квар	Полная, S, кВА		
1. Обычный режим: переменный ток 50 Гц	0.053	0.105	0.118	0.45	115.0
2. Новый режим: ТСФ без постоянной состав	0.044	0.021	0.049	0.90	115.0

Таблица 3.

Показатели работы элемента нагревательного гибкого ленточного (мощностью 60 Вт)

Наименование электрического режима	Мощность из сети			Коэффициент мощности	Напряжение в узле питания, В
	Активная, P, кВт	Реактивная, Q, квар	Полная, S, кВА		
1. Обычный режим: переменный ток 50 Гц	0.027	0.099	0.103	0.26	115.0
2. Новый режим: ТСФ без постоянной состав	0.017	0.0169	0.024	0.708	115.0

Применение ТСФ позволяет получить положительные эффекты: в установках с темными и светлыми излучателями, обеспечить работу установок на более низкой ступени ПБВ (РПН) трансформатора, с высоким значением коэффициента мощности при снижении индуктивности обмоток; в светлых излучателях – изменять спектр излучения; в темных - регулировать скорость подъема температуры [13 - 17]. Индивидуальные показатели работы установок с темными и светлыми излучателями не ухудшаются при ТСФ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Крэкнелл А., Уонг К.* Поверхность Ферми. / Англия, 1973. пер. с англ. Под ред. В.Я. Кравченко. – М.: Атомиздат, 1977. – 352 с.
2. *Грановский В.Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток / В.Л. Грановский, под ред. Л.А. Сена и В.Е. Голанта. – М.: Изд-во Наука, 1971. – 543 с.
3. *Kalganova S., Trigorly S., Zakharov V.* 2018 Computer Simulation of Microwave Heat Treatment of Dielectrics *2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (INFORINO) / MPEI. – Moscow* 1–5.
4. *Trigorly S., Zakharov V.* 2018 Mathematical Modeling of the Processes of Microwave Thermal Processing of Ex tended Dieiectrics with the Use of Mobile Radiation Systems *2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE) / SSTU. – Saratov* 125-131.

5. *Качанов А.Н.* Моделирование процесса высокочастотного нагрева влажной древесины в вакуумно-диэлектрической сушильной камере / А.Н. Качанов, Д.А. Коренков // Вестник КрасГАУ, 2016. 9(120). С. 113–121.
6. *Качанов А.Н.* Описание электромагнитного поля в плоском конденсаторе при высокочастотном нагреве длинномерных диэлектриков / А.Н. Качанов, Д.А. Коренков // Промышленная энергетика, 2016. № 9. С. 23–27.
7. *Рохлин Г.Н.* Разрядные источники света: - 2-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – С. 48, С. 442-445.
8. *Финкельбург В.* Электрические дуги и термическая плазма / В. Филькенбург, Г. Меккер. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961.
9. Svitnev S.A., Popov O.A. 2011 Plasma parametrs spatial distribution of low pressure ferrite-free inductive discharge *Light and Engineering* 1 79-82.
10. *Птицына Е.В.* Влияние электромагнитной составляющей на процессы в темных и светлых инфракрасных излучателях / Е.В. Птицына, Д.В. Птицын, А.Б. Кувалдин // Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования). XXVII Междунар конф.: материалы: - М.: МЭИ, 2019. С. 494–504.
11. А. с. 1682101 SU, МКП В23К 37/00. Инфракрасный нагреватель для сварных соединений. / В.М. Борзаковский, Н.С. Кирпач, заявл. 31.05.89; опубл. 07.10.1991. Бюл. №37.
12. *Птицына Е.В.* Элементы нагревательные гибкие ленточные в режиме с питанием током сложной формы / Е.В. Птицына, Д.В. Птицын, А.Б. Кувалдин // Омский научный вестник, 2019. №2(164). С. 36 – 44.
13. *Птицына Е.В.* Исследование режимов работы установок с темными и светлыми излучателями при питании током сложной формы / Е.В. Птицына, Д.В. Птицын, А.Б. Кувалдин // Промышленная энергетика, 2019. №12. С. 50–56.
14. *Птицына Е.В.* Режимы работы силовой и технологической нагрузки / Е.В. Птицына, Д.В. Птицын, А.Б. Кувалдин // Энерго- ресурсосбережение XXI век: материалы междунар. науч.–практ. конф. (2-4 декабря 2019). – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2019. С. 93–99.
15. *Птицына Е.В.* Режимы совместной работы темных инфракрасных излучателей, элементов нагревательных гибких ленточных и силовой нагрузки / Е.В. Птицына, Д.В. Птицын, А.Б. Кувалдин // I юбилейные чтения Бойко Ф.К.: материалы междунар. науч.-техн. конф. (21 февраля 2020). – Павлодар: С. Торайгырова ун-т, 2020. Т.1. С. 413-420.
16. *Ptitsyn D., Kuvaldin A., Ptitsyna E.* 2017 Процессы в темных излучателях при питании током сложной формы *Electrotechnologies for material processing: XVIII International UIE-Conqress. – Hannover (Germany), June 6-9, 2017* 497- 502.
17. *Ptitsyna E.V., Kuvaldin A.B. and Ptitsyn D.V.* 2016 Procecdinqs – 2016 11th Jnternational Forum on Strateqic Technoloqy, IFOST 2016 7884341.

УДК 621.316.06

САФОНОВ Е.П.,
ФРОЛОВ В.Я.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА УСЛОВИЯ ОТКЛЮЧЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ГЕНЕРАТОРНЫМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ

Аннотация. Рассмотрены проблемы явления длительной задержки нуля тока в сетях генераторного напряжения при коротком замыкании. Рассмотрены теоретические предпосылки возникновения данного явления, касающиеся условий работы генератора непосредственно перед коротким замыканием и параметров внешней энергосистемы. Дана численная оценка данного явления.

Ключевые слова: генераторный выключатель, короткое замыкание, задержка нуля тока.

SAFONOV E.P.,
FROLOV V.Y.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

THE INFLUENCE OF POWER SYSTEM PARAMETERS ON BREAKS OF FAULT CURRENTS IN GENERATOR CIRCUIT-BREAKER

Abstract. The phenomenon of delayed current zeros after the short circuits in generator network is considered. Thegenerator operating conditionsandvarious parameters of power system influencing the delay of the delayed current zeros time are analyzed and discussed.The results of modeling of this phenomenon are demonstrated.

Keywords: generatorcircuit-breaker, fault currents, delayed current zeros.

Одной из главных особенностей эксплуатации генераторныхвыключателей является длительная задержка нуля тока при короткихзамыканиях (КЗ) на генераторном напряжении. Эта длительная задержка нуля тока, или, другими словами, длительное неотключение токов КЗ, нежелательна по нескольким причинам. Самая серьезная - длительное горение дуги в генераторном выключателе(ГВ) может привести к сильной деградации материала его контактов или даже к взрывному разрушение самого ГВ. С одной стороны, эта проблема достаточно легко решается задержкой на отключения ГВ, пока апериодическая составляющая КЗ не затухнет, но с другой стороны сопротивление электрической дуги может значительно ускорить процесс затухания апериодической составляющей тока КЗ [1, 2].

Другая причина - весьма быстрое отключение КЗ является решительным средством улучшения динамической устойчивости энергосистемы. Также быстрое отключение КЗ может предотвратитьразвитие аварии переход однофазного КЗ в двухфазное и трехфазное КЗ и уменьшить последствия [3].

Рассмотрим случаи на генерирующей подстанции без ГВ, где в результате возникновения КЗ могут возникнуть нежелательные аварийные ситуации [4]. При возникновении КЗ непосредственно на генераторе (точка $К_1$ на рис. 1) время отключения КЗ будет определяться только временем срабатывания автомата гашения поля (АГП).Так как время срабатывания АГП составляет несколько секунда, что на порядок выше предельного времени отключения КЗ генератора, то генератор выпадает из синхронизма и

его невозможно включить сразу после устранения КЗ. Здесь опасных воздействий токов КЗ на трансформатор возникать не должно т.к. ток КЗ трансформатора обеспечивается внешней энергосистемой, от которой трансформатор отключается выключателем ВВ.

При возникновении КЗ в точке $К_2$ (рис. 1) необходимо рассмотреть два случая – случай КЗ на шинах между ГВ и трансформатором и случай межобмоточного КЗ на стороне низкого напряжения трансформатора. В первом случае опасного режима для трансформатора не возникает – аналогично со случаем КЗ в точке $К_1$. Во втором случае опасное воздействие на трансформатор оказывает как токи КЗ со стороны энергосистемы, так и со стороны генератора. Здесь срабатывание выключателя ВВ может не предотвратить аварию трансформатора, а срабатывание АГП не достаточно быстрое. Это одна из ситуаций, когда отсутствие ГВ может привести к аварии трансформатора.

Случай КЗ между трансформатором и выключателем ВВ (точка $К_3$, рис. 1) также опасны для трансформатора без ГВ по аналогичным причинам как для случая КЗ в точке $К_2$.

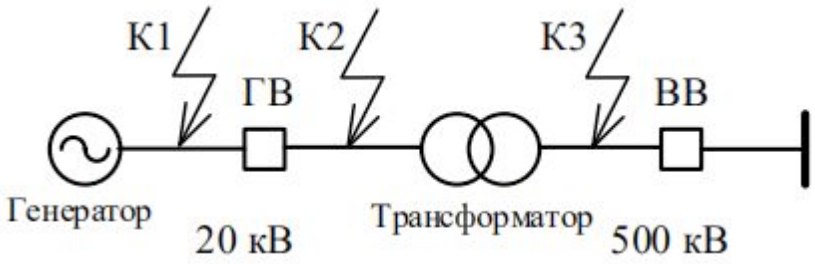


Рисунок 1 - Короткие замыкания на генерирующей подстанции

На длительность задержки нуля тока оказывает серьезное влияние условия работы генератора непосредственно перед возникновением КЗ, а именно как много он потреблял или генерировал реактивной мощности. Особенность зависимости величина апериодической составляющей от потребляемой генератором реактивной мощности заключается в продольной намагничивающей реакции якоря. Чем больше генератор потребляет реактивной мощности – тем больше апериодическая составляющая токов КЗ генератора.

Для пояснения механизма данного явления на время предположим, что сопротивление обмотки возбуждения, якоря и демпфирующей обмотки (роль демпфирующей обмотки СГ выполняет массивное тело ротора) равно нулю. Согласно теореме о постоянстве потокосцеплений, потокосцепление между упомянутыми обмотками должно оставаться неизменным после возникновения КЗ на генераторе [5]. Следовательно, для поддержания постоянства потокосцепления после КЗ, в фазах обмотки должны возникать постоянные токи(или апериодические, если сопротивление обмоток не равно нулю). Одним из условий для сохранения постоянства потокосцеплений как раз является совпадение магнитных потоков ротора и статорапри намагничивающей реакции якоря.

В свою очередь потребление и генерация реактивной мощности генератором зависит от условий загрузки высоковольтных линий электропередач (ВЛЭП) и параметров нагрузки потребителей или, иными словами, от параметров энергосистемы [6]. На рис. 2 показана характеристика генерации (+) или потребления (-) реактивной мощности ВЛЭП в зависимости от ее загруженности (1 – натуральная мощность ВЛЭП) и от длины линии ($l_1 < l_2 < l_3$).

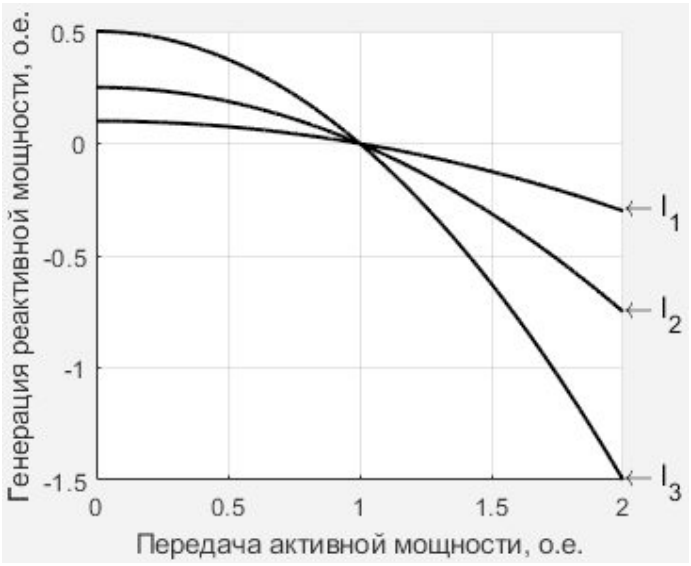


Рисунок 2 - Зависимость генерации/потребления реактивной мощности ВЛЭП от ее загруженности и длины ($l_1 < l_2 < l_3$)

При недогруженной ВЛЭП, она является источником реактивной мощности и чем длиннее эта линия, тем большее количество этой мощности она генерирует. Одна часть этой мощности потребляется СГ, другая – энергосистемой. Здесь уже оказывает влияние соотношение реактивного сопротивления генерирующей подстанции и потребителя. Если реактивное сопротивление потребителей сильно ниже реактивного сопротивления генерирующей станции, то избыток реактивной мощности линий будет потребляться внешней энергосистемой, и наоборот.

Для изучения описанных явлений в MatlabSimulinkбыла построена имитационная модель генерирующей подстанции (рис. 3). Такая блочная топология используется на Курской и Смоленской АЭС (РУ 500 кВ) и на Ленинградской АЭС (РУ 330 кВ). Генераторы ТВВ-500 моделируются блоками «Synchronous Machine». Трансформаторы ТЦ-630000/500 моделируются блоками «Three-Phase Transformer (Two Windings)». Энергосистема моделируется трехфазными источниками напряжения «Three-Phase Source». Нагрузка моделируется активным сопротивлением 0.1 Ом и индуктивностью, которая будет варьироваться – 100 мГн, 10 мГн и 1 мГн. ВЛЭП 500 кВ моделируется блоками «PI SectionLine». Длина линии в рамках исследования будет варьироваться от 100 до 400 км. Параметры для этих блоков были взяты из справочных материалов [7].

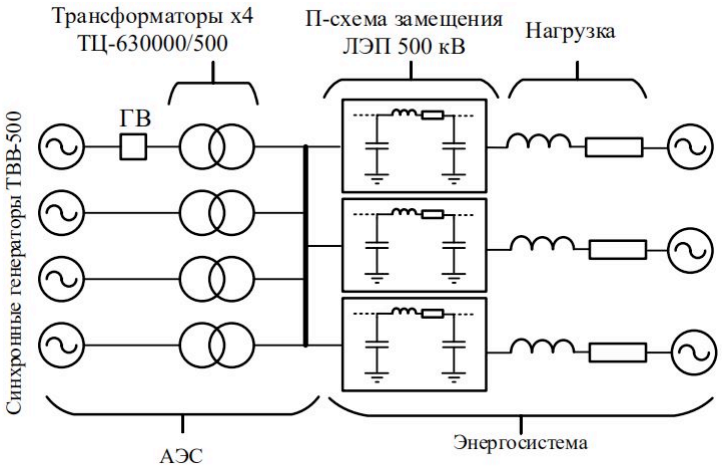


Рисунок 3 - Исследуемая схема

Такая компоновка (рис. 3) была выбрана для того, что именно здесь мы будем наблюдать генерацию реактивной мощности ВЛЭП 500 кВ:

Натуральная мощность каждой линии 3хАС400/51 будет составлять:

$$P_{нат} = U^2 \cdot \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} = 500000^2 \cdot \sqrt{\frac{1.153 \cdot 10^{-3}}{0.974 \cdot 10^{-3}}} = 860\ MBm$$

4 генератора ТВВ-500 с коэффициентом мощности 0.85 на каждую из трех линий выдают 560 МВт – следовательно, линия недогружена.

Трехфазное КЗ в генераторной цепи осуществлялось при наихудших условиях – при нуле напряжения одной из фаз (в нашем случае выбрана фаза А). Результаты моделирования представлены на рис. 4-6.

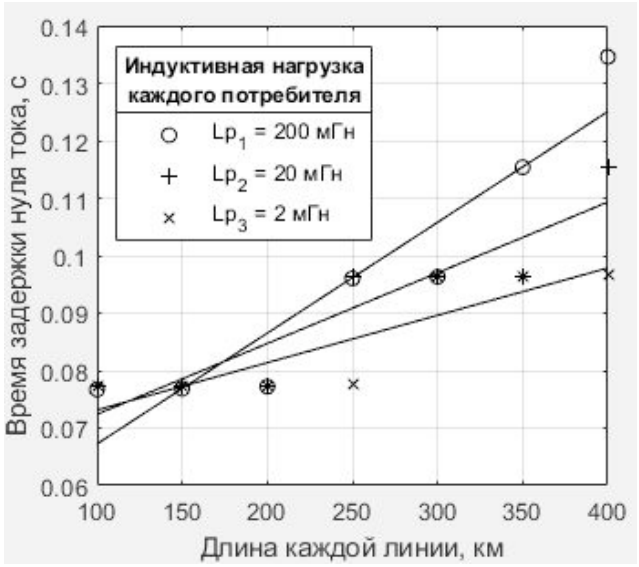


Рисунок 4 - Зависимость задержки нуля тока КЗ СГ от индуктивной нагрузки каждого потребителя и длины каждой линии

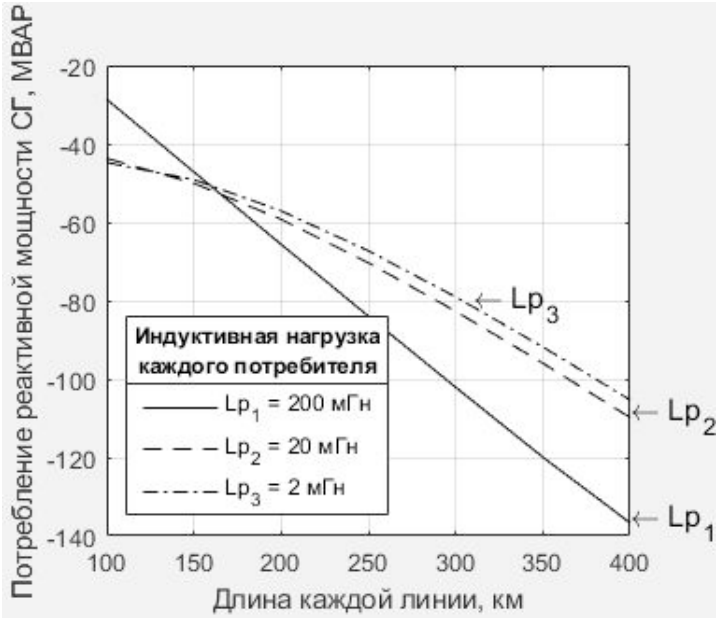


Рисунок 5 - Зависимость потребляемой реактивной мощности СГ непосредственно перед КЗ от индуктивной нагрузки каждого потребителя и длины каждой линии

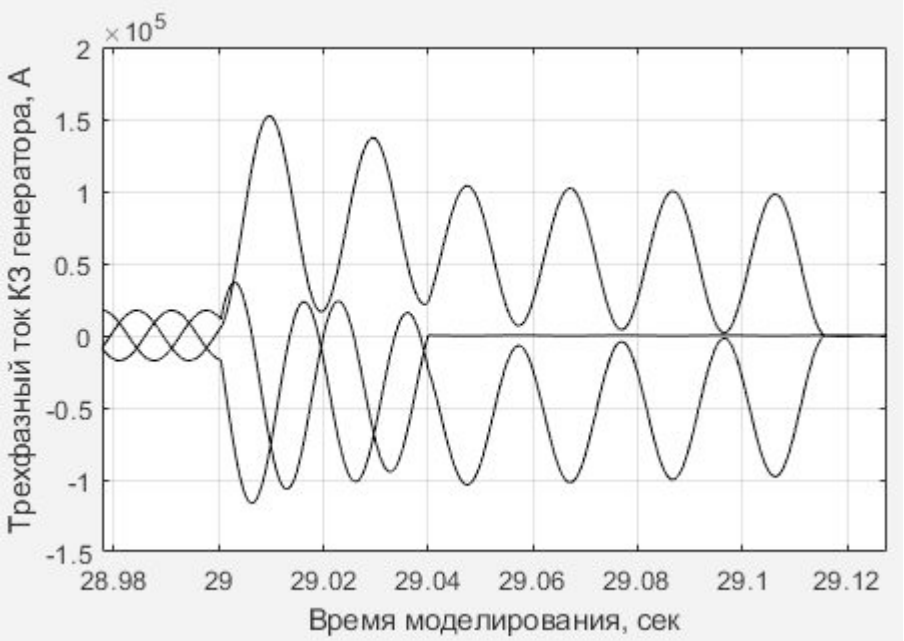


Рисунок 6 - Пример результатов моделирования задержки нуля токов при КЗ между ГВ и трансформатором

Результаты на рис. 4 и на рис. 5 численно интерпретируют описанную выше теорию. Из них можно сделать следующие выводы: длина недогруженной ВЛЭП определяет количество генерируемой ею реактивной мощности, которую в свою очередь потребляют генерирующая подстанция и энергосистема. Чем больше реактивное сопротивление потребителя, тем больше этой реактивной мощности потребляет генератор – усиливается продольная намагничивающая реакция якоря синхронной машины, из-за чего увеличивается апериодическая составляющая КЗ генератора. Увеличение времени задержки нуля тока может повредить выключатель, трансформатор и отрицательно сказаться на устойчивости энергосистемы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Palazzo M., Braun D., Delfanti M.* 2011 Investigation on the occurrence of delayed current zeros phenomena in power stations and related stress imposed on generator circuit-breakers *International Conference on Power Systems Transients IPST 2011*.
2. *Palazzo M., Delfanti M.* 2013 New requirements for the application of generator circuit-breakers *International Conference on Power Systems Transients (IPST2013)*.
3. *Жданов П.С.* Вопросы устойчивости электрических систем. - М.: Энергия, 1979. - 456 с.
4. *Зорин Л.М., Подъячев В.Н., Шлейфман И.Л.* Генераторные выключатели в цепи мощных энергоблоков и требования, предъявляемые к ним / Электротехника, 2003. №.11. С. 34-39.
5. *Вольдек А.И., Вольдек А.И.* Электрические машины. Машины переменного тока: по направлению подгот. «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и «Электроэнергетика». – Издательский дом «Питер», 2008.
6. *Александров Г.Н. и др.* Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения. - Л.: Энергоатомиздат. – 1983.
7. *Карапетян И., Файбисович Д., Шапиро И.* Справочник по проектированию электрических сетей. – Litres, 2018.
8. *Kozjaruk A.E., Vasilev B.U., Shtop S.A., Serdukov N.A.* Currents in bearings of induction motors of electric drives with semiconductor converter // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives. 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341707.

9. *Ivanchenko D., Smirnov A.* Identification of interturn faults in power transformers by means of generalized symmetrical components analysis // E3S Web Conf., 140 (2019) 04007. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914004007.
10. *Bardanov A.I., Pudkova T. V.* Application of power theory for electricity metering in presence of distortion // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing, 2019. Vol. 643, № 1. P. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012011.
11. *Lutonin, A., Shklyarskiy, A., Shklyarskiy, Y.* Operation modes and control algorithms of anisotropic permanent magnet synchronous motor (IPMSM) // E3S Web of Conferences, 2019, 140, 10006.
12. *Kozjaruk A.E., Vasilev B.U., Shtop S.A., Serdukov N.A.* Currents in bearings of induction motors of electric drives with semiconductor converter // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives. 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341707.
13. *Ptitsyna E.V., Ptitsyn D.V., Kuvaldin A.B.* To the question of effective modes mixed load with the complex waveform current supply. Journal of Physics: Conference Series 2019.
14. *Abdallah W.J.* Studies of voltage stabilization and balancing systems in energy storage modules based on supercapacitors // Journal of Physics: Conference Series. 2019, Vol. 1333(6), 062001. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062001.

УДК 62-50

СДВИЖКОВ А.В.,
СИНЮКОВ А.В.,
СИНЮКОВА Т.В.
Липецкий государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕКТОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ КОНВЕЙЕРА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА

Аннотация. В работе рассмотрена возможность использования векторно-адаптивных систем управления электроприводом конвейера ленточного служащего для транспортировки железорудного концентрата. Произведено моделирование в Matlab и анализ систем с наблюдателями скорости и датчиками скорости, установленными на валу двигателя.

Ключевые слова: электропривод; моделирование; векторная система; наблюдатели.

SDVIZHKOV A.V.,
SINYUKOV A.V.,
SINYUKOVA T.V.
Lipetsk State Technical University

RESEARCH OF VECTOR CONTROL SYSTEMS ASYNCHRONOUS CONVEYOR MOTOR FOR TRANSPORTATION IRON ORE CONCENTRATE

Abstract. The paper considers the possibility of using vector-adaptive control systems for the electric drive of a belt conveyor for transporting iron ore concentrate. Matlab simulations and analysis of systems with speed monitors and speed sensors mounted on the engine shaft were performed.

Keywords: electric drive; modeling; vector system; observers.

К системам управления объектов разного назначения в настоящее время предъявляются повышенные требования с позиций надежности и безаварийной работы в течение максимально возможного времени эксплуатации оборудования. Разного рода исследования направлены на изучение возможных вариантов обеспечения данных требований без потери качества работы механизма [1-5].

Конвейеры нашли применение на предприятиях разного профиля. Рассматриваемый конвейер эксплуатируется на Михайловском горно-обогатительном комбинате в цехе по производству высококачественного концентрата и отгрузки готовой продукции в здании склада концентрата. Конвейер приводится в движение от асинхронного электродвигателя по следующей цепи: привод – быстроходная муфта – редуктор – тихоходная муфта – барабан. Для облегчения вращения ленты с противоположной стороны имеется неприводной барабан. Натяжение ленты регулируется натяжной станцией. Используемая на действующем объекте система управления – скалярная. При функционировании конвейера из-за наличия в системе такого показателя, как упругость ленты, возникают колебания транспортируемой продукции, что приводит к износу подшипников и сказывается на работе всей системы в целом. Для борьбы с данным явлением предлагается произвести замену имеющейся системы управления на векторную

систему с установкой дополнительных блоков, содержащих поправочные коэффициенты. Датчики скорости, имеющиеся в системах такого вида как скалярная, также снижают ее надежность, так как они имеют свой ресурс и нуждаются в постоянном обслуживании, поэтому предлагается использовать в новой системе наблюдатель. Также значительным недостатком скалярных систем является отсутствие возможности регулирования момента на валу двигателя [6-15].

На первоначальном этапе были получены графики переходных процессов по скорости и моменту в векторной системе управления с датчиком скорости. Далее проводилось исследование систем при использовании разных типов наблюдателей и сравнение полученных результатов и векторной системой с датчиком скорости, полученные результаты представлены на рис. 1-6.

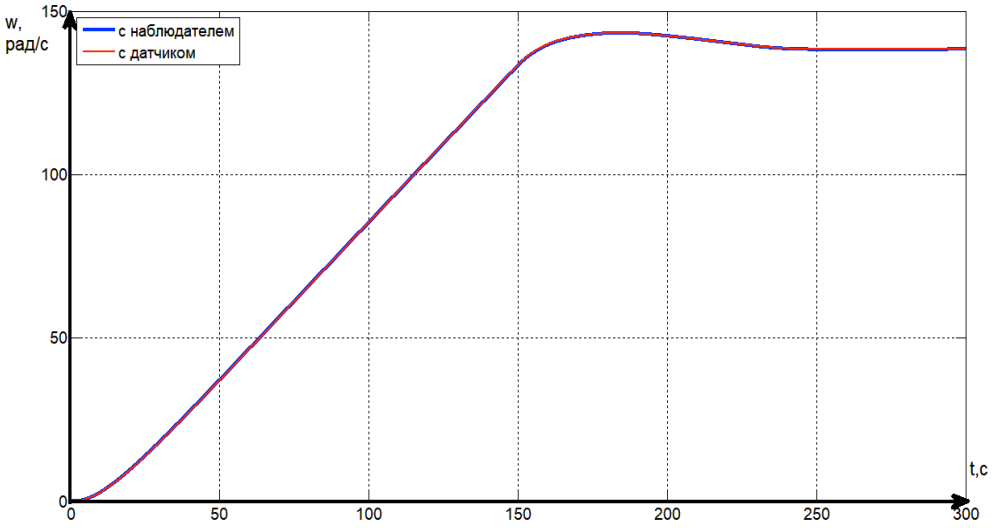


Рисунок 1 - Характеристика скорости при использовании адаптивного наблюдателя по потокосцеплению ротора

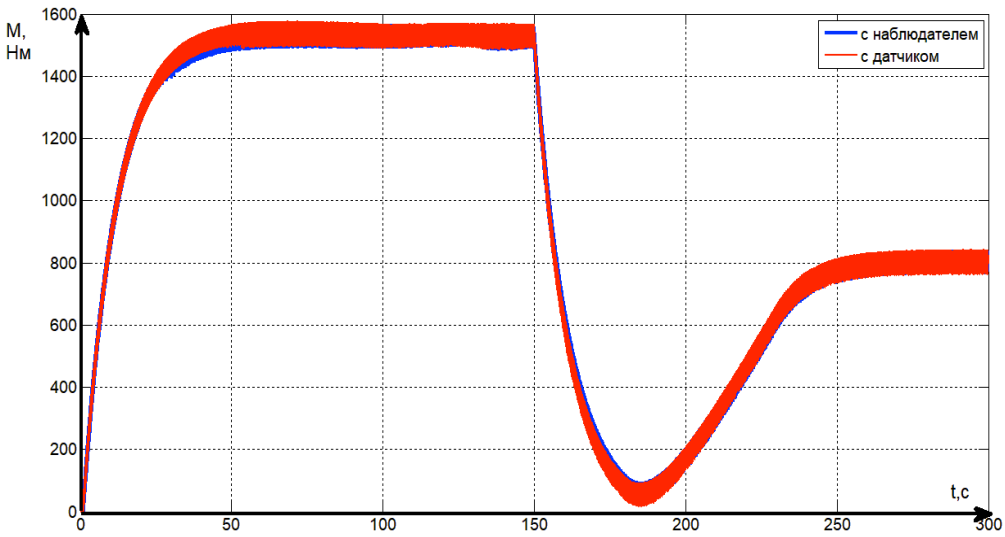


Рисунок 2 - Характеристика момента при использовании адаптивного наблюдателя по потокосцеплению ротора

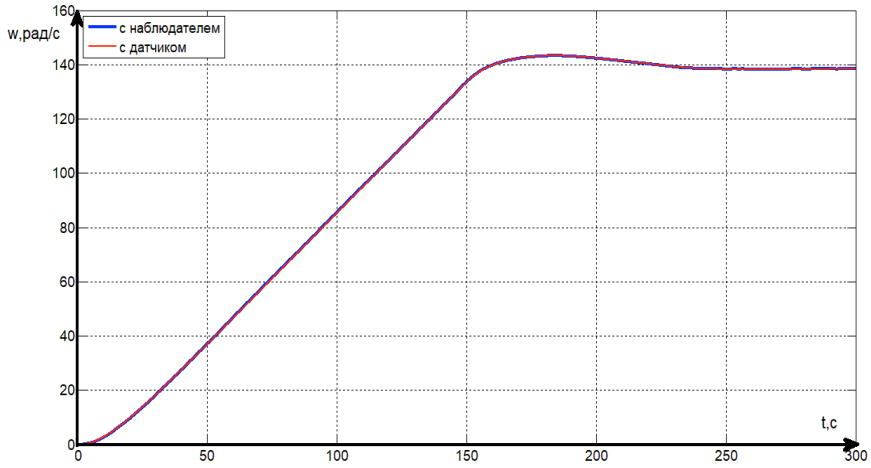


Рисунок 3 - Характеристика скорости при использовании адаптивного наблюдателя по току статора

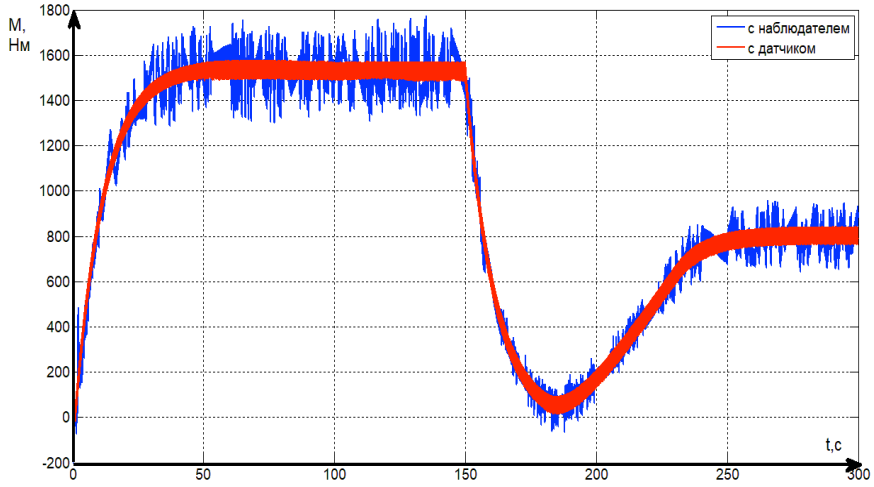


Рисунок 4 - Характеристика момента при использовании адаптивного наблюдателя по току статора

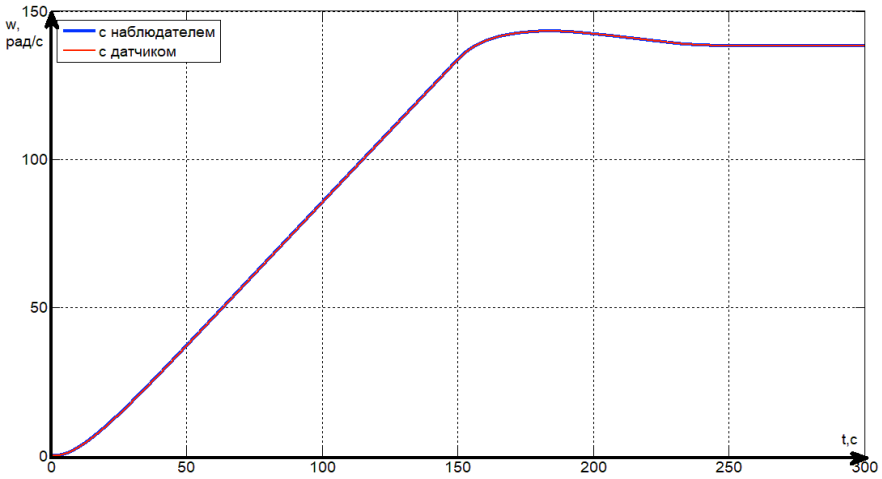


Рисунок 5 - Характеристика скорости при использовании наблюдателя полного порядка

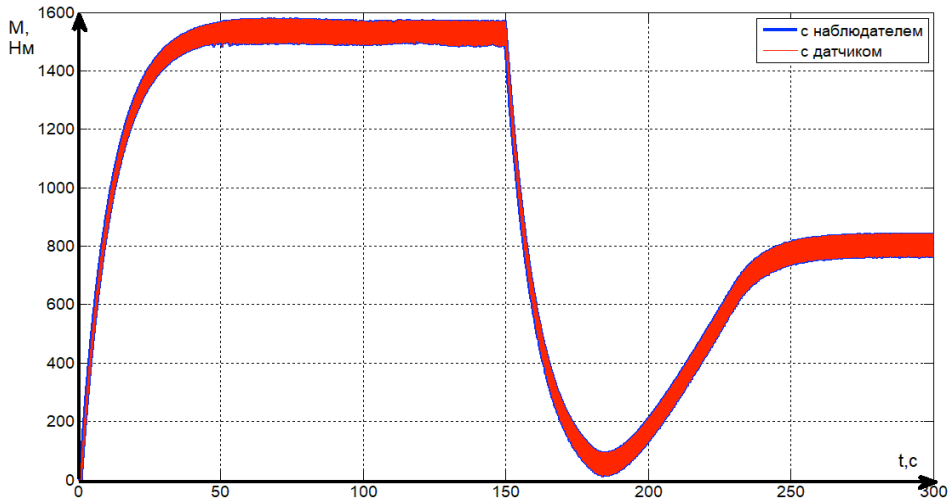


Рисунок 6 - Характеристика момента при использовании наблюдателя полного порядка

По результатам исследования видно, что набольшей робастностью на всем исследуемом диапазоне обладает наблюдатель полного порядка, значение статической ошибки является самыми малыми. Такие результаты у наблюдателя полного порядка получились из-за полного вычисления всех электромагнитных параметров двигателя в ходе своей работы, что позволяет с минимальной ошибкой определять требуемое значение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Синюкова Т.В.* Неадаптивные наблюдатели в системах управления электроприводами / Т.В. Синюкова, А.В. Синюков // Управление большими системами. Сборник трудов XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых. В 2-х томах, 2018. С. 103-109.
2. *Синюков А.В.* Модернизация систем управления промышленных механизмов металлургических предприятий / А.В. Синюков, Т.В. Синюкова // Школа молодых ученых по проблемам технических наук. Сборник материалов областного профильного семинара, 2018. С. 267-269.
3. *Алексеев В.В.* Анализ динамических режимов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе при различных структурах и алгоритмах управления / В.В. Алексеев, А.П. Емельянов, А.Е. Козярук // Электротехника, 2016. №4. С. 2-9.
4. *Алексеев В.В.* Сравнительный анализ моделей систем автоматизированного асинхронного электропривода с векторным управлением / В.В. Алексеев, А.Е. Козярук // Электротехника, 2013. №12. С. 47-51.
5. *Шклярский Я.Э.* Управление активным выпрямителем напряжения в составе частотно-регулируемого привода при провалах напряжения / Я.Э. Шклярский, А.И. Барданов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. № 4. С. 414-425.
6. *Алексеев В.В.* Выбор системы координат при реализации алгоритма векторного управления асинхронным электроприводом / В.В. Алексеев, А.Е. Козярук, В.В. Рудаков, В.Н. Язев // Электротехника, 2010. №12. С. 2-9.
7. *Синюков А.В.* Нечеткие регуляторы в системах управления металлургических предприятий / А.В. Синюков, Т.В. Синюкова // Актуальные проблемы энергетик. Сборник научно-технических статей, 2019. С. 129-133.
8. *Скамьин А.Н.* Схема замещения асинхронного двигателя при наличии высших гармоник / А.Н. Скамьин, А.Я. Шклярский, С.В. Соловьев, А.И. Барданов // Научный обозреватель, 2016. № 3. С. 88-90.

9. *Мещеряков В.Н.* Релейно-векторное управление электромеханическими системами на производственных механизмах / В.Н. Мещеряков, О.В. Крюков // Великие реки 2019. Труды научного конгресса: 3-томах, 2019. С. 42-44.
10. *Трегубова К.А.* Обзор существующих наблюдателей состояния в векторном электроприводе / К.А. Трегубова, Т.В. Синюкова // Автоматизация и информатика. Тенденции развития современной науки. Материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета, 2018. С. 152-154.
11. *Мещеряков В.Н.* Коррекция векторной системы управления асинхронным электроприводом для повышения энергоэффективности / В.Н. Мещеряков, О.В. Данилова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт, 2019. №1(42). С. 24-29.
12. *Маклаков А.С.* Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удаление выделенных гармоник / Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: Энергетика, 2018. Т.18. № 1. С. 92-100.
13. *Синюков А.В.* Синтез нейроконтроллера NORMA-L-2 / А.В. Синюков, Т.В. Синюкова // Школа молодых ученых. Материалы областного профильного семинара, 2019. С. 170-175.
14. *Мещеряков В.Н.* Модель асинхронного двигателя с преобразователем частоты / В.Н. Мещеряков, Т.В. Синюкова // Управление большими системами. Материалы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых, 2012. С. 168-169.
15. *Синюкова Т.В.* Синтез индентификаторов частоты вращения ротора асинхронного двигателя, основанных на концепции NN / Т.В. Синюкова, Е.В. Сенцов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2019. № 9. С. 13-20.
16. *Синюкова Т.В.* Применение адаптивных наблюдателей в системе управления электроприводом механизма передвижения / Т.В.Синюкова, А.В. Синюков, А.А. Синюкова // Управление большими системами. Сборник трудов XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых. В 2-х томах, 2018. С. 110-115.

УДК 621.316

СЕМЕНЮК А.В.,
ЖУКОВСКИЙ Ю.Л.
Санкт-Петербургский горный университет

РОЛЬ ПЛАТФОРМЕННЫХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ «ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ» В УПРАВЛЕНИИ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Аннотация. Целью исследования является исследование роли облачных платформ для управления спросом на электроэнергию в интеллектуальных электрических сетях. Проанализированы факторы, оказывающие влияние на изменения в структуре и подходах динамического управления в электроэнергетике. Проведен обзор применения технологии «интернет вещей» в управлении электротехническими комплексами и системами. Рассмотрены архитектуры и методологии управления спросом на стороне потребителя. Предложена структура платформы и алгоритм взаимодействия для управления спросом с целью снижения затрат на инфраструктуру и потребления энергии.Представленная система, ориентированная на исследованиепроцессов, связанных с оценкой и прогнозом потребления, что позволит, исключить нерациональное потребление и повысить эффективность использования сетевых ресурсов.

Ключевые слова.Цифровые технологии; интернет вещей; управление спросом; информационная система; интеллектуальна энергетика.

SEMENYUK A.V.,
ZHUKOVSKIY Y.L.
Saint-Petersburg Mining University

THE ROLE OF PLATFORM SOLUTIONS BASED ON THE “INTERNET OF THINGS” IN DEMAND SIDE MANAGEMENT OF ELECTRICITY

Abstract. The aim of the study is to investigate the role of cloud platforms in managing demand for electricity in smart grids. The factors influencing changes in the structure and approaches of dynamic control in the electric power industry are analyzed. A review of the use of the Internet of Things technology in the management of electrical complexes and systems is carried out. The architectures and methodologies of demand management on the consumer side are considered. The structure of the platform and the interaction algorithm for managing demand in order to reduce infrastructure costs and energy consumption are proposed. The presented system is focused on the study of processes associated with the assessment and forecast of consumption, which will allow to eliminate irrational consumption and increase the efficiency of use of network resources.

Key words. Digital technology; internet of things; demand management; Information system; intelligent energy.

Глобальные энергетические вызовы, стоящие перед мировым сообществом, требуют комплексного и неинерционного подхода к прогнозированию энергетического будущего планеты, который учитывает всю совокупность факторов, влияющих на него [1]: от социально-экономических трендов до технологических инноваций как в системе производства, транспорта и распределения энергии, так и в сфере ее конечного потребления.

К существующим вызовам энергетического сектора можно отнести: развитие возобновляемой энергетики и распределенный сетей - потребители всё активнее уходят с централизованного рынка электроэнергии, устанавливая у себя местные возобновляемые источники энергии, которые могут не только обеспечивать электроэнергией самого потребителя, но и выдавать её избытки в сеть на продажу [2]; активное проникновение цифровыхтехнологий, масштабное развитие интеллектуальных сетей передачи электроэнергии (smartgrid) [3]; рост энегопотребления, и рост требований потребителей в отношении доступности, надежности и качества электроэнергии [4]; развитие корпоративной и бытовой культуры ресурсосбережения - рациональное управление природными топливно-энергетическими ресурсами; декарбонизация и борьба с глобальным изменением климата.

На сегодняшний день современные технологии, такие как «Интернет вещей» (IoT) [5], предлагают широкий спектр возможностей применения в области энергоснабжения, передачи и распределения энергии и спроса. IoT позволит решить вопрос повышения энергоэффективности, увеличения доли возобновляемых источников энергии и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Ведущие компании уже занимаются разработкой новых моделей и продуктов на базе цифровых систем [6]. Комплексные решения по цифровизации объектов электросетевого хозяйства разрабатывают такие компании, как Schneider Electric, ABB, Siemens, Legrand, Microsoft, Oracle, Cisco, IBM, SAP. Анализируя пул проектных решений данных компаний, сразу выделяются те решения, что пользуются популярностью у крупных заказчиков: IoT, облачные вычисления, мониторинг сети передачи данных, управление производительностью ИТ-инфраструктуры, анализ больших данных, искусственный интеллект, магазин приложений [7]. При этом большинство реализованных проектов с 2016 г. по текущее время приходится на IoT, так как без своевременной, актуальной и достоверной информации невозможна цифровизация в компании [8].

Одной из базовых компонент программ повышения энергетической эффективности во всех странах мира является управление спросом на электропотребление (DSM). В течение ближайшего десятилетия прогнозируется дальнейшее развитие концепции управления спросом, обусловленное появлением новых бизнес- моделей, технологий и программного обеспечения, таких как «bring your own device» («принеси свое устройство») для участия в программах автоматизированного дистанционного управления нагрузкой(вовлечение потребителей в управление спросом с помощью средств коммуникациии использование расширенных данных о для оптимизации). Развитие управления спросом розничных потребителей во многом связано с такими технологиями как интернет вещей, умный дом, что повышает экономическую эффективность внедрения этих технологий [9].

На сегодняшний день в литературе существует большое число работ, посвященных работеобеспечения управления спросом в интеллектуальной сети с применением IoT технологии.

Авторы в [10] предлагают новую архитектуру смарт-сети. В данной работе авторыобосновывают потребность в интеллектуальной сети на основе IoT с участием клиентов. Основными аспектами, обсуждаемыми в этой работе, являются последовательная интеграция сети с приложениями, встроенными с помощью интеллектуального счетчика, имеющего ту же инфраструктуру. Другим аспектом является сбор данных из различных протоколов связи на основе датчиков.

В работе [11] автор предлагает новую методологию интеллектуального анализа нагрузки с использованием управления непредвиденными обстоятельствами. Эта структура реализуется с помощью подхода IoT-парадигмы. Создана система управления домом на основе потребителей с моделированием управлением спроса в интеллектуальном подходе к планированию нагрузки [12]. В этой работе автор

устанавливает аналогию системного оператора с использованием математического решателя линейных уравнений стохастическим методом для эффективного расчета сокращения нагрузок на каждую шину для решения проблемы непредвиденных обстоятельств. При таком подходе объекты, обслуживающие нагрузку, на основе запроса сокращения нагрузки рассчитывают мощность, необходимую для конечных пользователей, чтобы минимизировать мощность и максимизировать прибыль от коммунальных услуг. Система управления умным домом, основанная на IoT, позволяет потребителю сократить свое ежедневное потребление в зависимости от повседневного взаимодействия с коммунальным центром. Чтобы максимизировать прибыль от коммунальных услуг, используется методика моделирования реакции спроса [12]. Авторы [13] описывают возможность прогнозирования нагрузки на основе IoT. В этой работе новая концепция методов глубокого обучения, основанных на IoT, необходима для того, чтобы получить характеристики данных, собранных со смарт-счетчиков, для дальнейшей оценки и прогнозирования. Авторы в [14] исследовали жизнеспособность интеллектуальной сети с поддержкой IoT с ко-симулятором для крупномасштабного распределения передачи данных. Для мониторинга данных с устройств с поддержкой IoT была построена практически виртуальная сеть [15] путем разработки подходящих алгоритмов управления с двумя тестовыми примерами. Разработка интеллектуального учета нового века имеет широкое видение устройств с поддержкой IoT с ними.

Для реализации вышеописанных технологий необходима грамотно составленная архитектура платформы IoT. В работе предложена структура платформы и алгоритм взаимодействия для управления спросом с целью снижения затрат на инфраструктуру и потребления энергии.

Структура предлагаемой платформы состоит из следующих компонентов:

1. Устройства и датчики, способные фиксировать события, собирать, анализировать данные и передавать их по сети;
2. Средства связи – гетерогенная сетевая инфраструктура, объединяющая разнородные каналы связи – мобильные, спутниковые, беспроводные (Wi-Fi) и фиксированные;
3. Платформы для индустриального IoT от различных IT - поставщиков и промышленных компаний, предназначенные для управления устройствами и связью, приложениями и аналитикой;
4. Приложения и аналитическое ПО – слой программного обеспечения, отвечающий за аналитическую обработку данных, создание предсказательных моделей и интеллектуальное управление устройствами;
5. Решения по безопасности, отвечающие не только за информационную безопасность всех компонентов решения, но и за безопасность операционного процесса.

Задачи, которые ставились перед описываемой платформой:

1. Минимизация затрат на разработку новой архитектуры;
2. Обеспечение надежного энергоснабжения;
3. Управление нагрузочными характеристиками потребителя;
4. Эффективное управление распределенной системы генерации;
5. Прогнозирование;
6. Обеспечение гибкой тарификации;
7. Безопасность;
8. Масштабируемость;
9. Адаптируемость.

Переход к клиентоориентированной энергетике является перспективным в условиях нарастающих вызовов, связанных с износом инфраструктуры,финансовых ограничений, интеллектуализации потребителей и проникновению информационных технологий. Представленная платформа на основе интернета вещей ориентированная на управление спросом способна осуществлять агрегацию нагрузки и управление

потреблением с целью минимизации пикового потребления, повышения энергоэффективности и увеличение жизненного цикла сетевой инфраструктуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhukovskiy Y. & Malov D.* 2018 Concept of Smart Cyberspace for Smart Grid Implementation *Journal of Physics: Conference Series International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 - Enterprise Information Systems* 042067.
2. *Яковлева Э.В., Сизякова Е.В., Иванов П.В., Жуковский Ю.Л., Пудкова Т.В.* Анализ перспектив регионального развития интеллектуальных энергетических систем / Российский экономический интернет-журнал, 2018. № 2. С. 107.
3. *Zhukovskiy Y.L., Starshaia V.V., Batueva D.E., Buldysko A.D.* 2019 Analysis of technological changes in integrated intelligent power supply systems *Innovation - Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects - 11th conference of the Russian-German Raw Materials, 2018 11th*. 249-258.
4. *Крыльцов С.Б., Пудкова Т.В.* Применение свойств пространственного вектора при анализе качества напряжения распределительной сети 6-10 кВ / Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2017. № 12-2. С. 457-471.
5. *Makhovikov A.B., Katuntsov E.V., Kosarev O.V., Tsvetkov P.S.* 2019 Digital transformation in oil and gas extraction Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects *11th conference of the Russian-German Raw Materials* 531-538
6. *Устинов Д.А., Бабанова И.С.* Обоснование выбора ценовой категории оплаты за электроэнергию с учетом потребителей-регуляторов / Промышленная энергетика. - М., 2016. №11. С. 9-16.
7. *Абрамович Б.Н., Бабанова И.С.* Система прогнозирования энергопотребления с применением искусственной нейронной сети / Горные науки и технологии. - М.: МИСиС, 2016. №2. С.66-77
8. *Бабанова И.С., Устинов Д.А.* Разработка модели искусственной нейронной сети с целью управления и прогнозирования режимов энергопотребления предприятий минерально-сырьевого комплекса / Электроэнергетика глазами молодежи - 2016: материалы VII Международной научно-технической конференции, 19 23 сентября 2016 г., Казань. В 3 т. Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 47-50.
9. *Жуковский Ю.Л., Королев Н.А., Бабанова И.С.* Оценка технического состояния и остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем / Горное оборудование и электромеханика.
10. *Spano Elisa et al.* 2015 Last-meter smart grid embedded in an internet-of-things platform *IEEE Trans Smart Grid*.
11. *Ciavarella Stefano et al.* 2016 Managing contingencies in smart grids via the Internet of Things *IEEE Trans Smart Grid*.
12. *Haider H.T., See O.H., Elmenreich W.* 2016 A review of residential demand response ofsmart grid *Renew Sustain Energy Rev.* 59 166–78.
13. *Li L., Ota K., Dong M.* 2017 When weather matters: iot-based electrical load forecasting for smart grid *IEEE Commun Mag* 55(10) 46–51.
14. *Li X., Huang Q., Wu D.* 2017 Distributed large-scale Co-simulation for IoT-aided smartgrid control *IEEE Access*.
15. *Georgiou O., Raza U.* 2017 Low power wide area Network Analysis: can LoRa scale? *IEEE Wirel Commun Lett* 6(2) 162–5.
16. *Murashov, I., Frolov, V., Kadyrov, A.* Development of the arc plasma torch operation mathematical model for spheroidization of fine-dispersed powders // 2018 Journal of Physics: Conference Series, 1058(1), 012024.

17. *Frolov, V.Y., Kvashnin, A.O., Murashov, I.V.* Nonstationary mathematical model of a magnetic arc blast system. Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus.
18. *Vostrov, K., Frolov, V., Safonov, E.* Development of current limiting device for short and autonomous networks // 22nd Symposium on Physics of Switching Arc, 2017-September, с. 182-185.
19. *Frolov, V., Ivanov, D., Shibaev, M.* Mathematical modeling of plasma technology for TiO2 fine powder production, 2014 Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures 9(3), с. 1233-1240.
20. *Obraztsov, N.V., Frolov, V.Y.* A two-dimensional axisymmetric model of an AC arc // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, с. 430-432.
21. *Frolov, V.Y., Neelov, A.A., Zhiligotov, R.I., Bystrov, A.V.* Identification of the protection parameters of the local electrical network taking into account the detuning of the inrush current Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, с. 626-628.

УДК 621.316.722

СКАМЬИН А.Н.,
РАСТВОРОВА Ю.В.
Санкт-Петербургский горный университет

АЛГОРИТМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Аннотация. В работе проведено исследование влияния напряжения на параметры электропотребления при наличии высших гармоник в электрической сети. Исследование проводилось на лабораторном стенде с различными типами нагрузок, устройствами регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности. Было выявлено, что в зависимости от местоположения источника высших гармоник регулирование электропотребления возможно осуществлять путем варьирования напряжения на выходе трансформатора с учетом минимизации искажений в напряжении. На основании проведенных исследований был разработан алгоритм регулирования электропотребления при наличии высших гармоник, позволяющий минимизировать активную, реактивную мощности и мощность искажения при обеспечении нормируемых значений суммарного коэффициента гармонических составляющих в напряжении.

Ключевые слова: высшие гармоники, нелинейная нагрузка, гармонические искажения, качество электрической энергии, регулирование электропотребления.

SKAMYIN A.N.,
RASTVOROVA IU.V.
Saint-Petersburg Mining University

CONSUMED POWER REGULATION ALGOTITHM IN THE PRESENCE OF HIGH HARMONICS

Abstract. The study of the effect of voltage on the parameters of power consumption in the presence of higher harmonics in the electric network was conducted. The research was carried out with various types of loads, voltage regulation devices and reactive power compensation on the laboratory setup. It was found that, taking into account the minimization of voltage distortions, power consumption can be regulated by varying the voltage at the transformer output depending on the location of the source of higher harmonics. Based on the studies, an algorithm for power consumption regulation in the presence of higher harmonics was developed. It allows minimizing the active, reactive power and distortion power while providing standardized values of the total coefficient of harmonic components of the voltage.

Keywords: high harmonics, nonlinear load, harmonic distortion, power quality, power regulation.

В настоящее время на промышленных предприятиях широко применяется электрооборудование, работа которого основана на коммутации силовых полупроводниковых элементов [1-3]. Данный вид потребителей электрической энергии вызывает несинусоидальное падение напряжения, как на самом элементе, так и в системе электроснабжения [4-10]. Вопросом качества электрической энергии при наличии высших гармоник занимается ряд российских и зарубежных ученых [11-17]. В таких условиях возникает дополнительная составляющая мощности, связанная с наличием искажений в напряжении и токе. В соответствии со стандартом IEEE 1459-2010 ее называют полной

мощностью неосновной частоты S_N (nonfundamental apparent power), которая состоит из мощности искажения по току D_I, мощности искажения по напряжению D_I и полной мощности гармоник S_H:

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2.$$

Известно влияние напряжения на активную и реактивную мощности, которое применяется, например, для регулирования потоков мощности с целью поддержания статической устойчивости в энергосистеме. Однако влияние напряжения на составляющую мощности, связанную с наличием высших гармоник в напряжении токе, мало изучено. В связи с этим в работе была поставлена задача определения влияния напряжения на параметры электропотребления при наличии высших гармоник. При этом стоит обратить внимание на такие показатели как суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и тока (THD_U и THD_I) в точке общего присоединения потребителей.

Для этого был разработан и собран лабораторный стенд, включающий в себя трехфазный лабораторный автотрансформатор АТ, асинхронный двигатель с нагрузкой в виде генератора постоянного тока АД, конденсаторную батарею с антигармоническим реактором КБ и управляемый трехфазный выпрямитель с подключенной нагрузкой в виде активного сопротивления ТВ. В ходе экспериментов анализировались 3 режима работы, отличающиеся наличием той или иной нагрузки в электрической схеме. Первому режиму соответствовала подключенная нагрузка в виде ТВ, второму режиму – ТВ и КБ, третьему режиму – ТВ, КБ и АД. В каждом из режимов проводились измерения параметров электропотребления и всех гармоник тока и напряжения в точке общего подключения при помощи прибора Ресурс UF2M. На основании полученных данных были рассчитаны активная и реактивная мощности, полная мощность неосновной частоты, а также THD_U (рис. 1).

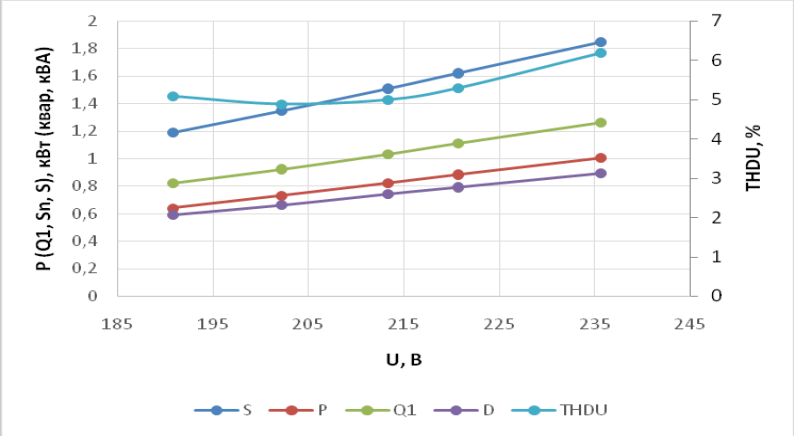


Рисунок 1 - Обработанные данные измерений

Из графика видно, что потребляемые мощности возрастают с увеличением напряжения, в то время как THD_U имеет минимальное значение внутри диапазона регулирования. Изменение полной мощности неосновной частоты при варьировании напряжения в рассматриваемых пределах достигает около 60 %. Стоит отметить, что это характерно для всех трех рассматриваемых режимов. Изменение THD_U связано с изменением сопротивления лабораторного автотрансформатора и, соответственно, сопротивления системы. В данном эксперименте возникновение искажений в напряжении питающей сети связано с работой управляемого тиристорного выпрямителя со стороны нагрузки. Однако, возможно возникновение искажений со стороны сети, при этом важную роль в уровне этих искажений в точке общего присоединения играет сопротивление энергосистемы. В работе [18] отмечено, что увеличение сопротивления системы при возникновении искажений со стороны сети способствует снижению уровня высших

гармоник на рассматриваемом предприятии, но при возникновении искажений со стороны потребителя такое увеличение будет способствовать росту уровня высших гармоник в напряжении в рассматриваемой точке. Стоит отметить, что регулирование активной и реактивной мощности путем изменения напряжения будет соответствовать известным принципам и на их характер местоположение источника высших гармоник влияние не оказывает.

Таким образом, на основании проведенных исследований возможно построить алгоритм, который позволит регулировать (минимизировать) потребляемую мощность при условии обеспечения нормируемых значений суммарного коэффициента гармонических составляющих в напряжении. Алгоритм регулирования и минимизации электропотребления при наличии высших гармоник заключается в следующем:

1. Анализ электрической нагрузки и возможного диапазона изменения напряжения.

2. Построение статических характеристик по напряжению в режиме наибольших и наименьших нагрузок при наличии высших гармоник.

3. Построение зависимости THD_U от напряжения.

4. Анализ закономерностей изменения THD_U при различных параметрах устройства регулирования напряжения.

4.1. При возникновении искажений со стороны нагрузки - уменьшение напряжения (снижение сопротивления системы) в рамках допустимых пределов по отклонению напряжения по критерию минимума THD_U, что приводит к уменьшению потребления активной, реактивной мощности и полной мощности неосновной частоты.

4.2. При возникновении искажений со стороны сети - уменьшение напряжения (снижение сопротивления устройства) в рамках допустимых пределов по отклонению напряжения по критерию минимума потребления активной и реактивной мощности. В данном случае исходя из [18] THD_U будет возрастать, поэтому необходимо контролировать, чтобы этот параметр и коэффициент перегрузки КБ не превысил нормативных значений.

5. Контроль отклонения напряжения у наиболее дальнего потребителя, которое не должно выходить за пределы нормативных значений.

6. Выбор параметров устройства регулирования напряжения в режиме наибольших и наименьших нагрузок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00127).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanchenko D.I., Salov R.A., Yakovleva E.V.* 2018 Analysis of Z-Source Inverter Control System for Asynchronous Drive for Gas Compressor *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018* 636-640.

2. *Malarev V.I., Kopteva A.V., Koptev V.Y.* 2019 Electric Power Supply System Development for Down-hole Electric Steam Generators to Produce High-viscosity Oil *IEEE Xplore 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)* 1 1-8.

3. *Solovev S.V., Bardanov A.I.* 2018 Efficiency estimation method of three-wired AC to DC line transfer *Journal of Physics: Conference Series* 1015 032137.

4. *Замятин Е.О.* Применение принципа Парето для выбора точек подключения фильтро-компенсирующих устройств / Е.О. Замятин, Р.А. Салов // Энергетика и энергосбережение: теория и практика Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции: электронный сборник, 2018. С. 226.1-226.6.

5. *Смирнов А.И.* Применение волнового анализа для измерения реактивной энергии при нарушении качества электроэнергии / А.И. Смирнов, А.С. Лутонин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. № 4. С. 458-471.
6. *Шклярский Я.Э.* Влияние высших гармоник на измерение реактивной энергии в электрических сетях / Я.Э. Шклярский, О.С. Васильков, Д.Е. Батуева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. № 1. С. 381-389.
7. *Rastvorova I.I. , Denisova O.V. , Belitskiy A.A.* 2018 Nonlinear and Unbalanced Load as a Basic Factor of a Neutral Conductor Current *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018* 570-571.
8. *Добуш В.С.* Анализ влияния источников бесперебойного питания на качество электроэнергии в точке общего подключения потребителей / В.С. Добуш, А.А. Бельский // Промышленная энергетика, 2018. №6. С. 29-34.
9. *Яковлева Э.В.* Анализ перспектив регионального развития интеллектуальных энергетических систем / Э.В. Яковлева, Е.В. Сизякова, П.В. Иванов, Ю.Л. Жуковский, Т.В. Пудкова // Российский экономический интернет-журнал, 2018. № 2. С. 107.
10. *Solovev S.V., Kryltcov S.B., Voytyuk I.N.* 2018 Static Load Characteristics Consideration for Determination of Transmission Line Power Capacity *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2018* 803-806.
11. *Бунтеев Ю.Е.* Анализ методов определения источников высших гармоник в электрических сетях промышленных предприятий / Я.Э. Шклярский, Ю.Е. Бунтеев // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов, 2016. №1(115). С. 88-91.
12. *Гамазин С.И.* Определение фактического вклада потребителя в искажения параметров качества электрической энергии / С.И. Гамазин, В.А. Петрович // Промышленная энергетика, 2003. №1. С. 32-38.
13. *Майер В.Я.* Методика определения долевых вкладов потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии / В.Я. Майер, Зения // Электричество, 1994. №9. С. 19-24.
14. Yang Hong Geng Assessment for harmonic emission level from one particular customer: University of Liege, 1992.
15. *Sasdelli R., Menchetti A., Montanari G.C.* 1993 Considerations on power definitions on nonsinusoidal conditions *IMECO TC-4 5th Int. Symp., Vienna, Austria., Apr. 8-10, 1993*.
16. *Barbaro P.V., Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S.* 2007 A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems *IEEE Transactions on Power Delivery* 22 1782-1788.
17. *Скамьин А.Н.* Способы выявления источников высших гармоник в связанных системах электроснабжения промышленных предприятий / А.Н. Скамьин, Ю.В. Растворова // Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», 2018. С. 262-1–262-3.
18. *Скамьин А.Н.* Влияние сопротивления системы на уровень высших гармоник в сети / А.Н. Скамьин А.Н., Е.О. Замятин // Сборник материалов II Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-практической конференции «Введение в энергетику», 2016. С. 157.
19. *Murashov, I., Frolov, V., Kadyrov, A.* Development of the arc plasma torch operation mathematical model for spheroidization of fine-dispersed powders // 2018 Journal of Physics: Conference Series, 1058(1), 012024.
20. *Korotkov, A., Frolov, V.* Methods of determination the electrical load schedules on areas in urban distributive power grids, Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW 2016, 7448254, с. 601-603.
21. *Obraztsov, N.V., Frolov, V.Y.* A two-dimensional axisymmetric model of an AC arc // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, с. 430-432.

УДК 621.316.91

СМИРНОВ А.И.,
ИВАНЧЕНКО Д.И.,
ВОЙТЮК И.Н.
Санкт-Петербургский Горный университет

ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТОКОВУЮ ЗАЩИТУ ЭЛЕКТРОСЕТИ

Аннотация. Исследуется влияние дополнительных источников энергии на максимальную токовую защиты в зависимости от местоположения блоков генераторов и их мощности. Обнаружен эффект ослепления релейной защиты и получены зависимости его влияния на общую электросеть. Приведена компьютерная модель для исследования в программе Matlab / Simulink.

Ключевые слова: релейная защита, распределительные сети, микросети, возобновляемые источники.

SMIRNOV A.I.,
IVANCHENKO D.I.,
VOYTYUK I.N.
Saint-Petersburg Mining university

INFLUENCE OF THE RELATIVE LOCATION OF DISTRIBUTED ENERGY SOURCES ON THE CURRENT PROTECTION OF THE ELECTRIC NETWORK

Abstract. The effect of distributed energy sources on the maximum current protection depending on the location of the generator blocks and their power is studied. The blinding effect of relay protection was detected and dependences of its influence on the general power supply network were obtained. The computer model for research in the program Matlab/Simulink is given.

Keywords: relay protection, distribution networks, microgrid, renewable sources.

Интеграция распределенной генерации внутри микросетей в распределительные сети электроэнергии требует переосмысления традиционных методов защиты для решения новых задач, возникающих в результате изменений параметров системы. Например, величина тока повреждения и его направление могут измениться, когда генераторы вводится в общую электросеть [1, 2]. Уровень проникновения дополнительных источников энергии и тип схемы сопряжения, то есть, основана ли система на прямом соединении вращающихся машин, таких как синхронные генераторы, или при помощи силового электронного преобразователя, оказывают фундаментальное влияние на схему защиты, которая определяет уровень тока короткого замыкания в системах [3].

Подключение к общей сети одного блока генераторов большой мощности или нескольких блоков меньшей мощности, таких как синхронные или асинхронные генераторы, изменит общий вклад в ток короткого замыкания [4]. Это изменение может нарушить координацию существующей системы токовой защиты. Другой сценарий возникает, когда блоки генераторов энергии подключены к общей сети при помощи инверторов, которые ограничивают ток короткого замыкания. Следовательно, независимое реле не сможет различить нормальную работу и состояние неисправности без связи с инвертором. Это особенно верно в случае больших фотоэлектрических установок, где едва ли наблюдается увеличение тока в случае неисправности или отказа. Поскольку ток повреждения не отличается четко от рабочего тока, некоторые из реле не сработают

или процедура определения займет большее время.

Расположение места короткого замыкания относительно блока дополнительных источников энергии и трансформатора подстанции также влияет на работу системы защиты. Когда сбой происходит за точкой общей связи, основной источник и блок генераторов будут вносить вклад в ток короткого замыкания [8].

Однако реле, расположенное выше по потоку от генератора энергии, будет измерять только ток повреждения, поступающий от источника вверх по потоку. Поскольку это только одна часть фактического тока повреждения, реле, особенно с обратными временными характеристиками, могут работать неправильно, что приводит ошибке селективности системы защиты. Когда неисправность происходит между основным источником и блоком генераторов, то ток повреждения от основного источника не будет существенно меняться. Таким образом, в отношении коротких замыканий включение в общую сеть дополнительных генераторов энергии влияет на амплитуду, направление и длительность токов короткого замыкания.

Для исследования влияния дополнительных источников энергии на ток короткого замыкания и работу схемы защиты была создана компьютерная модель в программе Matlab / Simulink.

Реле максимального тока предполагалось в начале фидера, длина воздушной кабельной линии от реле до нагрузки была постоянной. Расстояние от генератора до места подключения и его мощность изменялись, в результате чего наблюдался эффект ослепления реле токовой защиты, т.е. вклад тока короткого замыкания от сети становился меньше величины тока, при котором срабатывает реле.

По мере увеличения доли генераторов в сети эффект ослепления становиться более доминирующим, кроме того смоделированные результаты показывают, что наиболее серьезный эффект ослепления токовой защиты находиться примерно в середине фидера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barker P P., De Mello R.W.* 2000 Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No. 00CH37134). – IEEE*, *2000* 3 1645-1656.
2. *Maki K., Repo S., Jarventausta P.* 2004 Effect of wind power based distributed generation on protection of distribution network.
3. *Jayawarna N. et al.* 2005 Safety analysis of a microgrid *2005 International Conference on Future Power Systems. – IEEE, 2005* 7 7.
4. *Baran M.E., El-Markaby I.* 2005 Fault analysis on distribution feeders with distributed generators *IEEE transactions on power systems* 20(4) 1757-1764.
5. *Tumilty R.M. et al. 2006* Approaches to network protection for inverter dominated electrical distribution systems.
6. *Morren J., De Haan S.W.H.* 2008 Impact of distributed generation units with power electronic converters on distribution network protection.
7. *Cai J.Y. et al.* 2004 Current status and prospect of wide-area protection (dynamic stability control) technologies *POWER SYSTEM TECHNOLOGY-BEIJING* 28(8) 20-25.
8. *Sun M., Yu J., Deng B.* 2009 Analysis of Impact of DGs on line protection of distribution networks [J] *Power System Technology* 33(8) 104-107.
9. *Choudhary N.K., Mohanty S.R., Singh R.K.* 2014 A review on microgrid protection *2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON). – IEEE, 2014* 1-4.
10. *Bae I.S., Kim J.O.* 2008 Reliability evaluation of customers in a microgrid *IEEE Transactions on Power Systems* 23(3) 1416-1422.
11. *Frolov, V.Y., Ivanov, D.V., Belsky, R.A.* Increasing of operation security and of breaking capacity of surge arresters. Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017, 7910861, c. 1520-1523.

12. *Frolov, V., Petrov, G., Yushin, B., (...), Churkin, I., Ivanov, D.* Research and development of plasma technologies of spraying of coatings, 18th Symposium on Physics of Switching Arc, FSO 2009, c. 162-165.
13. *Chusov, A., Podporkin, G., Pinchuk, M., (...), Murashov, I., Frolov, V.* Development of a physical 2-D model for arc quenching chamber of lightning protection multichamber systems. 2016 33rd International Conference on Lightning Protection, ICLP 2016, 7791509.
14. *Obraztsov, N.V., Frolov, V.Y.* A two-dimensional axisymmetric model of an AC arc // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, c. 430-432.
15. *Frolov, V.Y., Neelov, A.A., Zhiligotov, R.I., Bystrov, A.V.* Identification of the protection parameters of the local electrical network taking into account the detuning of the inrush current Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, c. 626-628.

УДК 621.311.151

СТАРШАЯ В.В.,
БЕЛЬСКИЙ А.А.,
ДОБУШ В.С.
Санкт-Петербургский горный университет

УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ БОРЬБЫ С ПАРАФИНОВЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ В НЕФТЯНЫХ СКВАЖИНАХ

Аннотация. В данном работе был оцененуровеньуглеродного следа электротехнических комплексовс учетом жизненного цикла используемого оборудования, применяемых для борьбы с парафиновыми отложениями в нефтяных скважинах для обеспечения стабильного дебита и безопасной работы объектов добычи нефти. Проанализирован потенциал использования возобновляемых источников энергии, таких как ветер и солнце на территории нефтегазоносных провинций не охваченных централизованной энергосистемой и на основании этого предложен автономный комплекс электротермического прогрева нефтяных скважин с применением греющего кабеля с питанием от малой ветро- и/или фотоэлектрической станции. В ходе проведенного исследования определен состав электротермического комплекса с минимальным углеродным следом.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, возобновляемая энергетика, углеводородный след, парафиновые отложения, тепловое воздействие**.**

STARSHAIA V.V.,
BELSKY A.A.,
DOBUSH V.S.
Saint-Petersburg Mining University

CARBON FOOTPRINT OF ELECTROTECHNICAL COMPLEXES USED FOR CONTROLLING PARAFFIN DEPOSITS IN OIL WELLS

Abstract. The carbon footprint of the lifecycle of electrotechnicalcomplex used for controlling paraffin deposits in oil wells to provide a stable and safe operation flow rate of oil production has been assessed.The potential of using renewable energy sources, such as wind and sun in the oil and gas provincesthat are not covered by a centralized energy system.An autonomous electrotechnical complex for heating oil wells using a heating cable powered by a small wind and/or photovoltaic station is proposed. In the course of the study, a power source for an electrothermal complex with a minimum carbon footprint was determined.

Keywords: electrotechnical complex, renewable energy, carbon footprint, paraffin deposits, thermal effects.

Образование парафиновых отложений является одной из самых крупномасштабных проблем при добыче нефти, вызывает серьезные осложнения в работе скважин, нефтепромыслового оборудования и трубопроводных коммуникаций, повышает риски возникновения разливов углеводородов и ведет к таким проблемам, как:

- остановка процесса добычи нефти;
- снижение производительности системы и эффективности работы насосных установок;

- увеличение затрат на добычу нефти;
- сокращение межремонтного периода работы.

Практика добычи нефти на промыслах показывает, что наиболее интенсивно АСПО откладываются на внутренней поверхности подъёмных труб скважин [1].Около 80% всех нефтяных месторождений по содержанию парафинов являются средне- и высокопарфинистыми. В России большинство парафинистых нефтей находится в Волго-Уральском, Западно-Сибирском и Северо-Кавказском нефтегазоносных бассейнах, обеспечивающих свыше 80% добычи в стране [2, 3].

На сегодняшний день, наиболее эффективными способами борьбы с парафиновыми отложениями, которые плавятся при высоких температурах, являются тепловые методы воздействия на ствол скважины.

Для очистки скважины от накопившихся в процессе добычи нефти ПО применяют передвижные парогенераторные установки (ППГУ), работающие на дизельном топливе и размещаемые на грузовом автомобиле. С их помощью осуществляют периодическую тепловую обработку ствола скважины водяным паром с температурой до 300°С и давлением нагнетания до 10 МПа. За счет термического воздействия пара происходит плавление ПО и их вынос с потоками флюида в промысловую систему сбора и подготовки нефти. График обработки скважины осуществляется в соответствии с межочистным периодом. За время между двумя обработками пропускное сечение НКТ от накопившихся отложений может уменьшаться до двух раз. Устранение образовавшихся парафиновых пробок зачастую сопровождается аварийными разлива нефти и загрязнением почвы рядом со скважиной.

Альтернативой применению ППГУ является электрический греющий кабель, который размещается в НКТ скважины и осуществляет постоянный нагрев флюида на всем диапазоне глубин, где возможно образование ПО. Однако, использование греющего кабеля ограничено, вследствие удаленности мест проведения добычи нефти от централизованной энергосистемы страны, которая охватывает только треть всей территории. Для решения задач энергообеспечения потребителей нефтегазодобычи применяются дизель-генераторные установки (ДГУ). Работа ДГУ, как и работа ППГУ осуществляется за счет сжигания углеводородного топлива, что в значительной мере наносит вред окружающей среде. Повышается риск загрязнение почв пролитыми в ходе транспортировки, хранения и заправки дизельным топливом и маслами. Происходит загрязнение воздуха выхлопными газами и эмиссия парниковых газов (ПГ).

Авторами работы был проанализирован потенциал использования возобновляемых источников энергии, таких как ветер и солнца на территории нефтегазоносных провинций не охваченных централизованной энергосистемой и на основании этого предложен автономный комплекс электротермического прогрева нефтяных скважин с применением греющего кабеля с питанием от малой ветро- и/или фотоэлектрической станции [3, 4, 5].

Целью данной работы является определение уровня парниковых газов в виде эквивалентных значений углекислого газа при тепловых методах воздействия на ПО на стенках НКТ нефтяных скважин для обеспечения стабильного дебита при различных способах термического воздействия с учетом жизненного цикла используемого оборудования, на примере выбранного месторождения (табл. 1).

Схема термического комплекса для борьбы с ПО на стенках НКТ в нефтяной скважине представлена на рис. 1. Обобщённо, комплекс включает в себя: источник энергии (электрический или тепловой), передающую систему (линия электропередачи высокого/среднего/низкого напряжения или паропровод), нагревательный элемент (греющий кабель или пар).

Таблица 1.

Исходные данные для расчетов

Параметр	Единицы измерения	Показатель		
Дебит нефтяной скважины	т./сут.	50		
Концентрация парафина в добываемой нефти	%	4		
Длительность межочистного периода	сут.	10	20	30
Длительность обработки скважины с применений ППГУ	час	4		
Объем электроэнергии, затрачиваемый при применении греющего кабеля	кВт·ч/год	51 000		

Рассмотрим различные способы реализации теплового метода воздействия на ПО на стенках НКТ нефтяных скважин:

1. Паротермический: применение ППГУ для закачки водяного пара в затрубное пространство (между НКТ и обсадной трубой) скважины. В результате происходит периодическое тепловое воздействие и ликвидация накопившихся ПО в скважине. Котельная установка для получения водяного пара работает за счет сжигания дизельного топлива. Пар подается в скважину по паропроводу.

2. Электротермический (on-grid): применение греющего кабеля, размещаемого внутри НКТ. В результате происходит постоянное тепловое воздействие и предотвращение образования ПО в скважине. Подключение организовано от единой энергосистемы (ЕЭС) страны с использованием электросетей различного уровня напряжений (высокого/среднего/низкого).

3. Электротермический (off-grid): применение греющего кабеля, размещаемого внутри НКТ. В результате происходит постоянное тепловое воздействие и предотвращение образования ПО в скважине. Подключение организовано от локальной системы электроснабжения. Источником питания является дизель-генераторная установка (ДГУ) с использованием электросетей различного уровня напряжений (среднего/низкого).

4. Электротермический (wind): применение греющего кабеля, размещаемого внутри НКТ. В результате происходит квазипостоянное тепловое воздействие, направленное как на предотвращение образования ПО в скважине, так и на ликвидация уже накопившихся ПО. Подключение организовано от автономной системы электроснабжения. Источником питания является ветроэлектрическая установка (ВЭУ) с использованием низковольтных электросетей.

5. Электротермический (PV): применение греющего кабеля, размещаемого внутри НКТ. В результате происходит квазипериодическое тепловое воздействие, направленное как на предотвращение образования ПО в скважине, так и на ликвидация уже накопившихся ПО. Подключение организовано от автономной системы электроснабжения. Источником питания является солнечная фотоэлектрическая установка (ФЭУ) с использованием низковольтных электросетей.

Результаты расчетов для оценки эмиссия парниковых газов (ПГ) с учетом жизненного цикла используемого оборудования (в виде эквивалентных значений CO2) при различных способах термического воздействия на парафиновые отложения на стенках НКТ нефтяных скважин представлены на рис. 2 [6, 7].

Таким образом в ходе проведенного исследования показано, что в случае использования ВЭУ и ФЭУ в качестве источников питания для электротермического комплекса эмиссия парниковых газов с учетом жизненного цикла используемого оборудования будет минимальна. Наибольшую эмиссию парниковых газов можно наблюдать при использовании ДГУ в качестве источника питания или ППГУ, когда длительность межочистного периода не превышает 10 дней.

Авторами получен патент на изобретение № RU 2703040 «Автономный гибридный комплекс для борьбы с асфальто-смоло-парафиновыми отложениями в нефтяной

скважине», дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 19.06.2019 г.

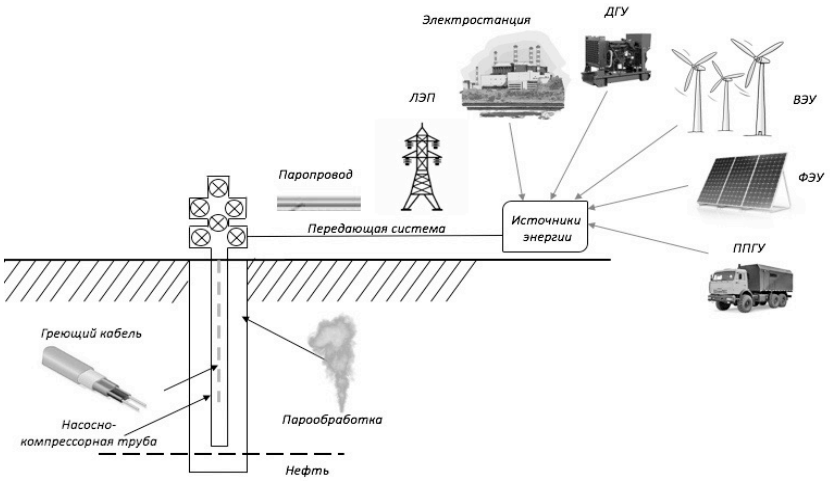


Рисунок 1 – Схема термического комплекса для борьбы с ПО на стенках НКТ в нефтяной скважине

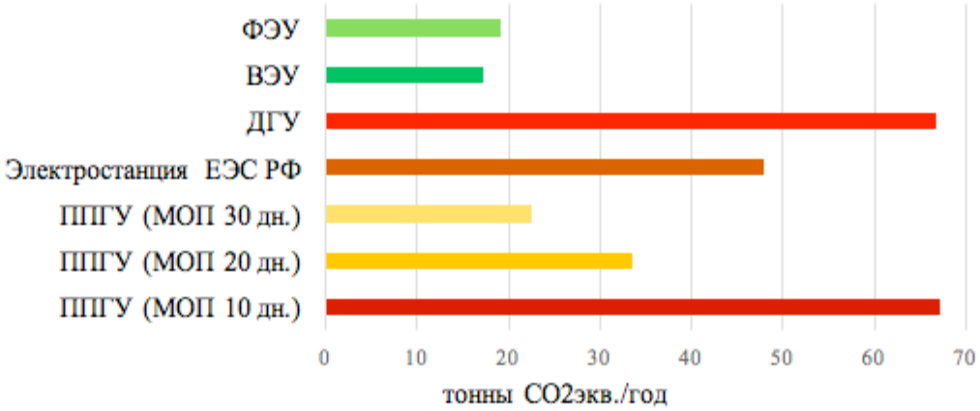


Рисунок 2 – Углеродный след электротехнических комплексов, применяемых для борьбы с парафиновыми отложениями в нефтяных скважинах

Данное исследование было профинансировано РФФИ в соответствии с исследовательским проектом №18-38-00530.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Глушенко В.Н., Силин В.Н.* Предупреждение и устранение асфальтено-смолопарафиновых отложений. Нефтепромысловая химия. - М.: Интерконтракт Наука, 2009. - 475 с.
2. *Ященко И.Г., Полищук Ю.М.* Статистический анализ качества трудноизвлекаемых нефтей / Известия Томского политехнического университета, 2015. Т.326, №4. С. 56–66.
3. *Соловьев С.В., Барданов А.И., Шклярский Я.Э.* Обзор способов электрификации районов со слаборазвитой электроэнергетической инфраструктурой / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017. Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. Научные редакторы В.В. Максаров, В.В. Габов, 2017. С. 215-218.
4. *Соболева Е.В.* Анализ условий образования и методы борьбы с асфальтеносмолопарафиновыми отложениями в скважинах при добыче нефти на

месторождениях Верхнего Прикамья / Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2013. №8. С. 71–77.
5. *Belsky A.A., Dobush V.S., Morenov V.A., Sandyga M.S.* 2018 The use of a wind-driven power unit for supplying the heating cable assembly of an oil well, complicated by the formation of asphalt-resin-paraffin deposits *Journal of Physics: Conference Series* 1111 012052.
6. *Belsky A.A., Korolyov I.A.* 2018 Thermal oil recovery method using self-contained wind electric sets *Journal of Physics: Conference Series* 1015 052001.
7. *Radal H.L., Gagnon L., Modahl I.S., Hanssen O.J.* 2011 Lifecycle GHG emissions from generation of wind and hydropower *Renewable an asustainable Energy Reviews* 15 3417–3422.

УДК: 620.98

УСТИНОВ Д.А.,
АБРАМОВИЧ Б.Н.,
АБДАЛЛА В.
Санкт-Петербургский горный университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПИТАНИЯ С НАГРУЗКОЙ СОИЗМЕРИМОЙ МОЩНОСТИ

Аннотация. Эффективность функционированиясистем автономного электроснабжения зависит от типа и режима работы нагрузки. Особенно сильно эта зависимость проявляется в системах ограниченной мощности, в которых колебания нагрузки могут привести к колебаниям питающего напряжения и частоты.В статье описывается моделирование автономной электромеханической энергосистемы, состоящей из дизельной электростанции и системы накопления энергии на основе суперконденсаторов с нагрузкой, сопоставимой мощности дизельного двигателя.

Ключевые слова: дизельная электростанция; суперконденсатор; асинхронный двигатель; моделирование; потеря напряжения; автономное питание.

USTINOV D.A.,
ABRAMOVICH B.N.,
ABDALLAH W.
Saint-Petersburg mining university

PARAMETERS' OPTIMIZATION OF AUTONOMOUS ELECTROMECHANICAL POWER SUPPLIES WITH A COMPARABLE POWER LOAD

Annotation. Nowadays, diesel power plants (DPS) are widely used as sources of primary, backup or emergency power supply for various facilities. Mathematical modeling and optimization techniques are widely used for studies in order to improve energy and economic efficiency of diesel power plants. The article describes the modeling of a stand-alone electromechanical power system consisting of a Diesel Power Plant and an ESS (Energy Storage System) based on supercapacitors with a load of comparable power of a diesel motor to increase its energy efficiency.

Key words: diesel power plant; supercapacitor; induction motor; modeling; voltage loss;autonomous power supply.

В настоящее время дизельные электростанции (ДЭС) широко используются в качестве источников основного, резервного или аварийного энергоснабжения различных объектов. Они также подходят для организации мобильного и автономного электроснабжения и широко применяются на объектах минерально-сырьевого комплекса, удаленных от централизованных энергетических систем. Дизельный двигатель, который используется в качестве первичного двигателя для генерирования электрической энергии, является одним из основных компонентов в ДЭС.

В [1, 2] сказано, что переходное отклонение напряжения при сбросе-набросе 100% симметричной нагрузки должно составлять не более ±30% для потребителей, для которых важными являются только основные характеристики напряжения и частоты, ± 20% для потребителей, у которых требования к характеристикам напряжения электроагрегатов соответствуют характеристикам напряжения систем электроснабжения коммерческих

предприятий и ± 10% для потребителей, которые предъявляют жесткие требования к характеристикам напряжения, частоты и форме кривой напряжения. При этом в [2] уточняется, что переходное отклонение напряжения при сбросе-набросе симметричной нагрузки величиной 100% номинальной мощности должно быть не более ± 20%, при времени восстановления не превышающем значение 2,3 с; переходное отклонение напряжения при сбросе-набросе симметричной нагрузки величиной 50% номинальной мощности должно быть не более ± 10%, при времени восстановления не превышающем значение 1,2 с. Согласно [1, 2], чем больше номинальная мощность электрогенераторной установки, тем меньше **мощность асинхронною короткозамкнутого двигателя в процентах от номинальной мощности электротенераторной установки, прямой пуск которого они должны обеспечить. Обеспечение работы дизель-генераторной установки с поддержанием значения напряжения и частоты в пределах установленных ГОСТ, при увеличении мощности единовременно включаемой нагрузки, при** сбросе-набросе нагрузки, **достигается увеличением мощности электротенераторной установки. Однако, это не является эффективным и экономически целесообразным.**

Таким образом, изучение автономных электромеханических систем питания в изолированных энергетических системах ограниченной мощности с дизель-генераторными установкамис нагрузкой соизмеримой мощности с целью снижения мощности первичного двигателя и оптимизация их параметров является актуальной задачей.

Поведение дизельного двигателя были предметом, хорошо определенным и тщательно изученным [3, 4] на основе различных моделей, которые использовались либо с термодинамической, либо с ориентированной на управление точек зрения. Также дизельный двигатель может быть представлен аппроксимированными передаточными функциями первого порядка [5]. Ряд исследований был посвящен разработке математических моделей для анализа переходных явлений в энергосистемах, включающих в себя дизельные электростанции и асинхронный привод в качестве нагрузки [6]. В [7] описывается алгоритм моделирования дизельного двигателя с переменной скоростью вращения для повышения его энергетической эффективности. Для моделирования рабочих характеристик двигателя внутреннего сгорания применено построение функциональной модели средствами Model-Based Calibration Toolbox™ (MBC Toolbox) с последующим экспортом в среду Simulink (MATLAB).

В [8, 9] представлен способ объединения пускового устройства асинхронных приводов погружных электроцентробежных насосов с автономной системой электроснабжения таким образом, чтобы пусковые режимы работы приводов насосов не оказывали влияния на работу энергосистемы. Был разработан прототип модуля для погружных насосов с использованием силовых электронных компонентов и суперконденсаторов. Однако в [8, 9] не анализируется возможное снижение и длительность провалов напряжения при пуске электроприводов, из-за чего может быть нарушена работа автономной системы электроснабжения. В [10-12] использованы динамические модели дизельного двигателя и синхронного генератора. В статье показано, что полная динамическая модель дизель-генераторной установки требует моделирования дизельного двигателя с контролем скорости, с системой контроля напряжения. Однако, в статье не учтено влияние изменения нагрузки на характеристики дизель-генераторной установки. В [13-18] Экспериментальные исследования по энергоэффективности параллельного гибридного привода морского судна, включающего дизель-генераторные установки. Однако, не учтено распределение нагрузки между дизель-генераторными установками и нагрузкой.

С целью повышения эффективности функционирования автономной системы электроснабжения, имеющей в своем составе дизельную электростанцию, модули суперконденсаторов, была разработана имитационная модель в системе MatlabSimulink.

С помощью разработанной модели дизель-генераторной установки были проведены исследования прямого и частотного пусков асинхронного двигателя. Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что потеря напряжения при прямом пуске АД мощностью 10 кВт составляет 22% от $U_{ном}$; при прямом пуске АД мощностью 20 кВт составляет 37% от $U_{ном}$; при прямом пуске АД мощностью 30 кВт составляет 47% от $U_{ном}$. При частотном пуске АД мощностью 80 кВт составило 8% от $U_{ном}$.Использование преобразователя частоты позволило уменьшить нагрузку в режиме пуска на дизельную электростанцию.Это может быть использовано следующим образом:

1. Повышением мощности двигательной нагрузки, питаемой от ДЭС.
2. Уменьшением мощности ДЭС для питания двигательной нагрузки.

Однако при питании от ДЭС нескольких электроприводов применение преобразователя частоты в качестве пускового устройства на каждом из них может оказаться не рациональным. Рассмотрим возможность применения общегопускового устройства, имеющего в своем составе накопители энергии в виде, для реализации поочередного пуска электроприводов с последующим переключением их на ДЭС.

Также необходимо отметить, что модули суперконденсаторов в данной схеме могут применяться не только в качестве пускового устройства, но и динамического компенсатора искажений напряжения при аварийных ситуациях.

Определено значение емкостисуперконденсаторов, необходимой для пуска двигателя. Для этого проведено измерение активной энергии, необходимой для реализации пуска. Установлено, что при частотном пуске двигателя 80 кВт под нагрузкой ходуется около $8{,}65 \cdot 10^4$ Дж. На рис. 1 показаны зависимости мощности двигателя от емкости суперконденсаторов при различных значениях остаточного напряжения U_2, $\Delta t = 5$ с.

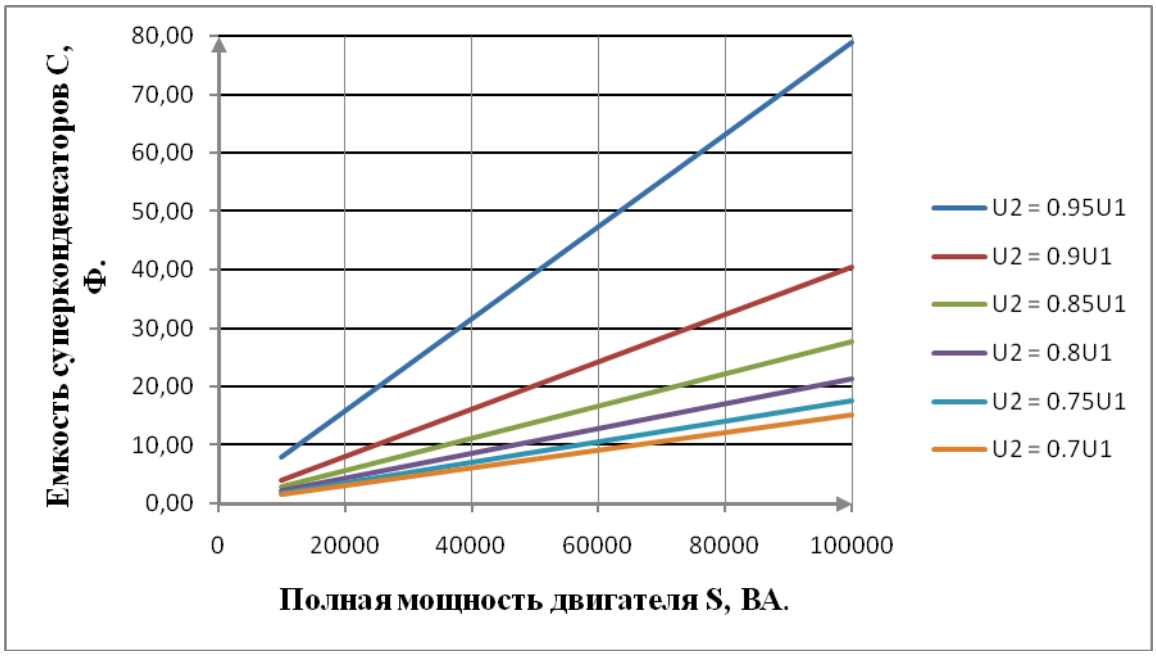


Рисунок 1 – Зависимость мощность двигателя от емкости суперконденсаторов, $\Delta t = 5$ с

Установлено, что при значении энергии разряда модуля суперконденсаторов $\Delta W = 8{,}65 \cdot 10^4$ Дж значение емкости составляет $C = 12$ Ф при уровне остаточного напряжения 95% от начального уровня.

Также для обеспечения отсутствия бросков тока и момента при переключении на основной источник питания необходимо учесть следующие требования к синхронизации:

- различие значений напряжений на выходе инвертора, получающего питание от суперконденсаторов, и напряжением генераторной установки должно быть не более 1%;

- угол расхождения фаз напряжений на выходе инвертора, получающего питание от суперконденсаторов, и напряжением генераторной установки должен быть не более 10 градусов;
- отклонение частот не более 0,1%.

Выполнено моделирование пуска двигателя при питании от суперконденсаторного модуля с последующим переключением на основной источник питания при емкости суперконденсаторов С = 12 Ф.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель дизель-генераторной установки, осуществляющей питание асинхронного двигателя с преобразователем частоты с векторным законом управления и возможностью работы от модуля суперконденсаторов.

2. Выявлено, что потеря напряжения при прямом пуске АД мощностью 10 кВт составляет 22% от $U_{ном}$; при прямом пуске АД мощностью 20 кВт составляет 37% от $U_{ном}$; при прямом пуске АД мощностью 30 кВт составляет 47% от $U_{ном}$. При частотном пуске АД мощностью 80 кВт составило 8% от $U_{ном}$. Таким образом, использование преобразователя частоты позволяет уменьшить нагрузку в режиме пуска на дизельную электростанцию, что может быть учтено при проектировании ДЭС в виде повышения мощности двигательной нагрузки, питаемой от ДЭС или уменьшением мощности ДЭС для питания двигательной нагрузки.

3. Выявлено, что при питании от ДЭС нескольких электроприводов применение преобразователя частоты в качестве пускового устройства на каждом из них может оказаться не рациональным. Показана возможность применения общего пускового устройства, имеющего в своем составе накопители энергии в виде модулей суперконденсаторов, для реализации поочередного пуска электроприводов с последующим переключением их на ДЭС. Модули суперконденсаторов в данной схеме могут применяться не только в качестве пускового устройства, но и динамического компенсатора искажений напряжения при аварийных режимах.

4. Получены зависимости мощности двигателя от емкости суперконденсаторов при различных значениях остаточного напряжения U_2, $\Delta t = 5$ с. Из зависимостей видно, что, чем выше уровень остаточного напряжения U_2, тем выше должно быть значение емкости суперконденсаторов С. Например, для двигателя мощностью 80 кВ·А и значения остаточного напряжения U_2 равного 95% от начального значения напряжения U_1, величина емкости суперконденсаторов составляет 63,1 Ф. В то время, как при значении остаточного напряжения U_2 равного 90% от начального значения напряжения U_1, величина емкости суперконденсаторов составляет 32,4 Ф.

5. Получены зависимости напряжения модуля суперконденсаторов, (В) и состояния заряда (%), напряжения питания (В), тока статора (А), скорости (рад/с) и электромагнитного момента (Нм) при С = 12 Ф. Анализируя полученные зависимости, видно, что пуск двигателя осуществляется. При этом напряжение и заряд суперконденсаторов снижается на 2,5%. При переключении на источник питания броски тока и момента отсутствуют.

6. Разработана методика определения емкости конденсаторного модуля, необходимого и достаточного для пуска электроприводов мощностью соизмеримой с мощности источника питания и последующего безударного переключения на этот источник.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 33115-2014 «Установки электрогенераторные с дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Общиетехнические условия».
2. ГОСТ Р 55006-2012 Стационарные дизельные и газопоршневые электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общиетехнические условия (с Поправкой).

3. *Theotokatos G.* 2010. On the cycle mean value modelling of a large two-stroke marine diesel engine *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 224(3) 193–205.
4. *Rakopoulos C.D. and Giakoumis E.G.* 2013 Diesel Engine Transient Operation: Principles of Operation and Simulation Analysis *United Kingdom: Springer London*.
5. *Hansen J.F.,. Adnanes A.K and Fossen T.I.* 2001 Mathematical Modelling of Diesel-Electric Propulsion Systems for Marine Vessels' *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* 7(3) 323–355.
6. *Karakitsos I., Theotokatos G.* 2016 MODELLING OF DIESEL ELECTRIC PROPULSION. *The Royal Institution of Naval Architects, Energy Efficient Ships, 23-24 November, London, UK.*
7. *Sholokhova I.I., Sarsikeev E.Zh., Moldovanova E.A.* 2015 Modeling of diesel engine parameters with MATLAB MBC TOOLBOX *Modern problems of science and education* 2 8.
8. *Carnovale D.J., Biternas J., Dionise T.J., Shipp D.D.* 2007 Design, Development and Testing of a Voltage Ride-Thru Solution for Variable Speed Drivers in Oil Field Applications *IEEE Pet. Chem. Ind. Tech. Conf. Ieee*.
9. *Yin Z., Han M., Du Y., Zhang Z.* 2006 A Practical Approach for Ride Through of Super Capasitor Energy Storage Based ASD System *Pes Td. Ieee*.
10. *Khaireddine Allali, El-Bahi Azzag, Nabil Kahoul* 2015 Modeling and Simulation of a Wind-diesel Hybrid Power System for Isolated Areas *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)* 116(23).
11. Litwin Wojciech, Les´niewski Wojciech, Pia̧tek Daniel and Niklas Karol 2019 Experimental Research on the Energy E-ciency of a Parallel Hybrid Drive for an Inland Ship *Energies* 12 09 1675.
12. *Abramovich B.N.* 2018 Mining Uninterruptible Power Supply System for mining enterprises *Journal of Mining Institute* 229. 31-40.
13. *Khomiakov K.A., Ustinov D.A.* 2019 Improving the accuracy of calculations of electrical loads forindustrial enterprises *Journal of Physics: Conference Series* 1333 062009.
14. *Sychev Yu.A. , Abramovich B.N. , Zimin R.Yu.* 2019 Modelling and analysis of functional modes of active compensators in distributed generation systems *Journal of Physics: Conference Series* 1333 062028.
15. *Abdallah W.J.* 2019 Studies of voltage stabilization and balancing systems in energy storage modules based on supercapacitors *Journal of Physics: Conference Series* 1333 062001.
16. *Kostin V.N. , Krivenko A.V. , Serikov V.A.* Modeling of operation modes of electrical supply systems with non-linear load *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues* 263-271.
17. *Kostin V.N., Serikov V.A., Sherstennikova I.A.* 2019 Higher harmonics and limiting thereof in power supply systems of different voltages *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 378 012051.
18. Generic supercapacitor model: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/supercapacitor.html?searchHighlight=stern%20model&s_tid=doc_srchtitle
19. *Frolov, V.Y., Ivanov, D.V., Belsky, R.A.* Increasing of operation security and of breaking capacity of surge arresters. Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017, 7910861, c. 1520-1523.
20. *Frolov, V.Y., Kvashnin, A.O., Murashov, I.V.* Nonstationary mathematical model of a magnetic arc blast system. Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus.
21. *Obraztsov, N.V., Frolov, V.Y.* A two-dimensional axisymmetric model of an AC arc // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, 2018-January, c. 430-432.
15. *Frolov, V.Ya., Ivanov, D.V.* Calculation of a plasma composition and its thermophysical properties in cases of maintaining or quenching of electric arcs // 2018 Journal of Physics: Conference Series, 1058(1), 012040.

УДК 537.84

ХАЦАЮК М.Ю.,
СИЗГАНОВ Н.В.
Сибирский федеральный университет

РЕЗОНАНС СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Аннотация. В статье исследовановозникновение резонанса колебаний свободной поверхности при импульсном воздействии переменного электромагнитного поля с помощью математической моделина базе открытого некоммерческого программного обеспечения Elmer и OpenFOAM. Проведен анализ переходных процессов в тигле индукционной печи. Создана математическая модель с импульсным воздействием электромагнитного поля, и исследованы условия возникновения и стабильности резонанса свободной поверхности.

Ключевые слова: численное моделирование, магнитная гидродинамика, свободная поверхность, индукционная тигельная печь.

KHATSAYUK M.U.,
SIZGANOV N.V.
Siberian Federal University

RESONANCE OF THE FREE SURFACE OF A METAL UNDER CONDITIONS OF LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS OF AN ALTERNATING MAGNETIC FIELD

Abstract. In this article investigated the occurrence of a resonance oscillation of the free surfaceunder the pulsed influence of an alternating electromagnetic field by using the open non-commercial software Elmer and OpenFOAM. An analysis of transients in the crucible of an induction furnace was carried out. A mathematical model with a pulsedinfluence of electromagnetic field was created.The conditions for the appearance and stability of resonance of the free surface are investigated.

Keywords: numerical modeling, magnetohydrodynamics, free surface, induction crucible furnace.

Расплавленный металл в пульсирующем магнитном поле индукционной тигельной печи (ИТП) под воздействием радиальной составляющей объемных сил Лоренца $f_л$ начинает движение образующее мениск на свободной поверхности расплава (рис. 1). В магнитной гидродинамике (МГД) проблема перемешивания между основными контурами циркуляции расплава или интенсификации транзитного массопереноса решается разными способами. Один из них – резонанс в жидкости за счет импульсного воздействия однофазного переменного электромагнитного поля. Данная работа посвящена исследованию резонансных колебаний свободной поверхности расплава в условиях низкочастотного импульсного воздействия переменным электромагнитным полем.Численный эксперимент проводился с такими параметрами МГД-системы при которых достигается видимая высота мениска 3 мм. Данные параметры системы были выбраны с расчетом на продолжение исследований уже на физической модели.

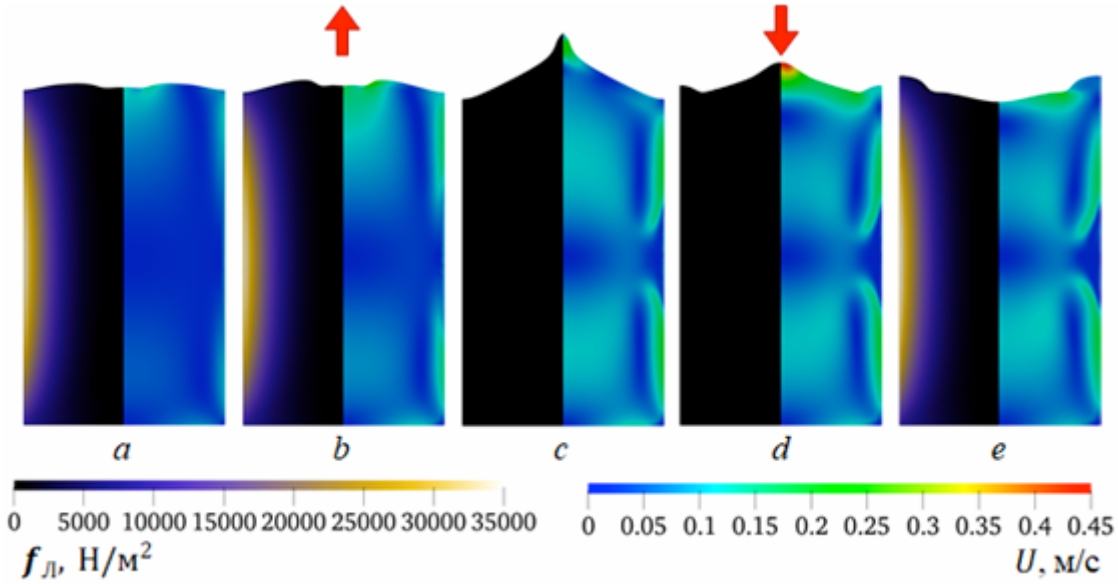


Рисунок 1 – Динамика импульсного воздействия на расплав

Качественный анализ переходных процессов без импульсного воздействия позволил выдвинуть гипотезу о том, что возможно возникновение резонанса свободной поверхности, а также предположение о возможности принудительного поддержания резонансного состояния путем импульсного воздействия электромагнитного поля сил с частотой равной частоте свободных колебаний поверхности.

Создание импульсной силы Лоренца в расплаве осуществляется прерыванием генерирования тока в индукторе с частотой равной частоте свободных колебаний поверхности. Реализовано импульсное воздействия на уровне математической модели путем доработки решателя из открытой библиотеки *EOF-Library*.

Полученные результаты позволили убедиться в возникновении резонанса свободной поверхности. Однако в ходе исследований было выявлена взаимосвязь между скоростью течений в расплаве и частотой импульсного воздействия силы Лоренца на расплав. В следствие чего предположено применение автоматизированной системы управления колебаниями электромагнитной силы в ИТП по обратной связи от положения мениска для автоматического входаМГД-системы в резонанс.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Слухоцкий А.Е.* Установки индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр. – Л. :Энергоиздат, 1981. – 328 с.
2. *Вайнберг А.М.* Индукционные плавильные печи. – М. : Государственное Энергетическое Издательство, 1960. – 456 с.
3. *Baake E., Langejuergen M., Kirpo M., Jakovics A.* 2009 Analysis of transient heat and mass transfer processes in the melt of induction channel furnaces using LES *Magnetohydrodynamics* 3 385-392.
4. *Spitans S., Jakovics A., Baake E., Nacke B.* 2010 Numerical modelling of free surface dynamics of conductive melt in the induction crucible furnace *Magnetohydrodynamics* 4 317-328.
5. *Петров А.Ю.* Турбоиндукционныйплавильно-литейный комплекс для получения композитных сплавов / А.Ю. Петров, В.И. Лузгин, Ф.Н. Сарапулов, В.Э. Фризен // Индукционный нагрев, 2011. №4 (18). С. 32-36.
6. *Мусаева Д.А.* Экспериментальное и численное исследование переноса импульса и энергии при вынужденной конвекции проводящей жидкости в поле низкочастотных

импульсных электромагнитных сил: дис. канд. техн. наук: 30.11.2017 / Д.А. Мусаева. – Казань, 2017. – 193 с.
7. *Vencels J., Råback P., Geža V. 2019* EOF-Library: Open-source Elmer FEM and OpenFOAM coupler for electromagnetics and fluid dynamics *SoftwareX* 9 68-72.
8. *Venčels J., Jakovičs A., Geža V.* 2017 Simulation of 3D MHD with free surface using open-source eof-library: levitating liquid metal in an alternating electromagnetic field *Magnetohydrodynamics* 53 (4) P. 643-652.
9. *Хацаюк М.Ю.* Теория и моделирование магнитогидродинамических процессов в электротехнологических комплексах металлургического назначения: дис. док. техн. наук: 12.02.2020 / М.Ю. Хацаюк. – СПб., 2020. – 338 с.
10. *Venčels J., Jakovičs A., Geža V.*, *Scepanskis M.* 2017 EOF Library: open-source Elmer and OpenFOAM coupler for simulation of MHD with free surface.
11. Kleinknecht N., Halvorsen S. 2011 High Frequency Magnetohydrodynamic Calculations in COMSOL Multiphysics *COMSOL Conf. (Stuttgart, Germany)*.
12. *Bourrou R., Budenkova O., Charvin P., Lafon C., Lemont F., Gagnoud A.* 2020 Numerical study of the hydrodynamics in a two-phase induction melter for nuclear waste treatment under various operating parameters *European Journal of Mechanics/B Fluids* 79 181–189.

УДК 621.311.1

ХОМЯКОВ К.А.,
УСТИНОВ Д.А.
Санкт-Петербургский горный университет

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация. Существующие высокие темпы, с которыми развивается энергетика, предъявляют требования по повышению эффективности капиталовложений и материальных затрат. На сегодняшний день, порядка двух третей от потребляемой электроэнергии, приходится на промышленные предприятия. Поэтому, необходимо применить комплекс мер по повышению технико-экономических показателей еще на этапе проектирования. Одной из первоочередных задач при проектировании промышленных предприятий, является задача определения электрических нагрузок, а достоверность значений, полученных при таких расчетах прямым образом влияет на технико-экономические показатели всего комплекса предприятия. Значения, получаемые при расчетах электрических нагрузок, применяются для определения элементов системы электроснабжения. Занижение или завышение расчетных значений приводит к большим потерям и увеличению капитальных затрат. Достоверность значений зависит от методов применяемых для расчета электрических нагрузок. Целью данной статьи является корректировка и повышение точности метода определения расчетных нагрузок.

Ключевые слова: расчет электрических нагрузок, мероприятия по энергосбережению, математическая модель случайного процесса, нормированная корреляционная функция.

KHOMIAKOV K.A.,
USTINOV D.A.
Saint-Petersburg Mining University

INTEGRATED ASSESSMENT OF FACTORS DETERMINING ELECTRIC LOADS OF THE MINERAL RAW MATERIAL COMPLEX

Abstract. The existing high rates with which the energy sector is developing make demands on increasing the efficiency of capital investments and material costs. Nowdays, about two-thirds of the electricity consumed is accounted for by industrial enterprises. Therefore, it is necessary to apply a set of measures to improve technical and economic indicators at the design stage. One of the priority tasks in the design of industrial enterprises is the task of determining electrical loads, and the reliability of the values obtained in such calculations directly affects the technical and economic indicators of the entire enterprise complex. The values obtained in the calculation of electrical loads are used to determine the elements of the power supply system. Underestimation or overstatement of the calculated values leads to large losses and an increase in capital costs. The reliability of the values depends on the methods used to calculate the electrical loads. The purpose of this article is to adjust and improve the accuracy of the method for determining design loads.

Ключевые слова: calculation of electrical loads, energy conservation measures, mathematical model of a random process, normalized correlation function.

К методам статического моделирования относят методы использующие математическую модель случайной величины, с такими характеристиками как математическое ожидание $M[P]$, которое представляется как коэффициенты использования $k_и$ и дисперсия DP. Информационная база исходных данных по характеристикам индивидуальных графиков нагрузки ЭП используется минимальная, как и информация, получаемая от таких расчетов, примерами использующих статическое моделирование является статистический метод (СМ), метод упорядоченных диаграмм (УД) и модифицированный статистический метод (МСМ). Методы, использующие математическую модель случайного процесса $\{P(t)\}$, с такими характеристиками, как математическое ожидание $M\{P(t)\}$, а также корреляционная функция (КФ) $K(\tau)$, относятся к методу динамического моделирования, который используется в расчетах характеристик выбросов и провалов нагрузки и методам вероятностного моделирования.

Нормированная корреляционная функция $R(\tau)$ определяет в относительных единицах степень зависимости между ординатами случайного процесса нагрузки. Вид и параметры НКФ в значительной степени определяют эффект нагрева проводника, а, следовательно, и значения расчетных нагрузок по нагреву и пиковых нагрузок, характеризуют скорость изменения ординат графиков нагрузок и позволяет определять выбросы, провалы и колебания нагрузок.

Проведенный ряд исследований различных типов нагрузок, как с использованием регулирования частоты, так и без, позволяет сделать вывод, что вид нормированной корреляционной функции будет различен (рис. 1 и 2).

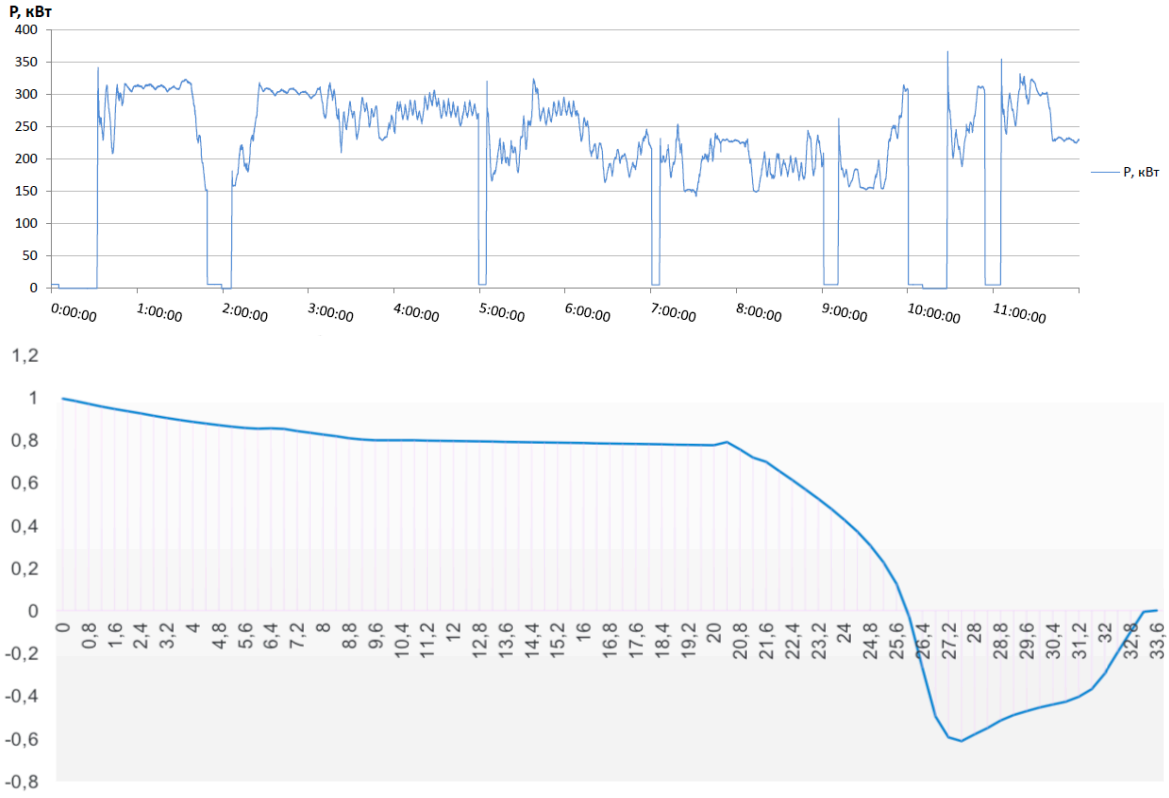


Рисунок 1 – График потребления активной мощности без регулирования скорости конвейерной ленты и его НКФ

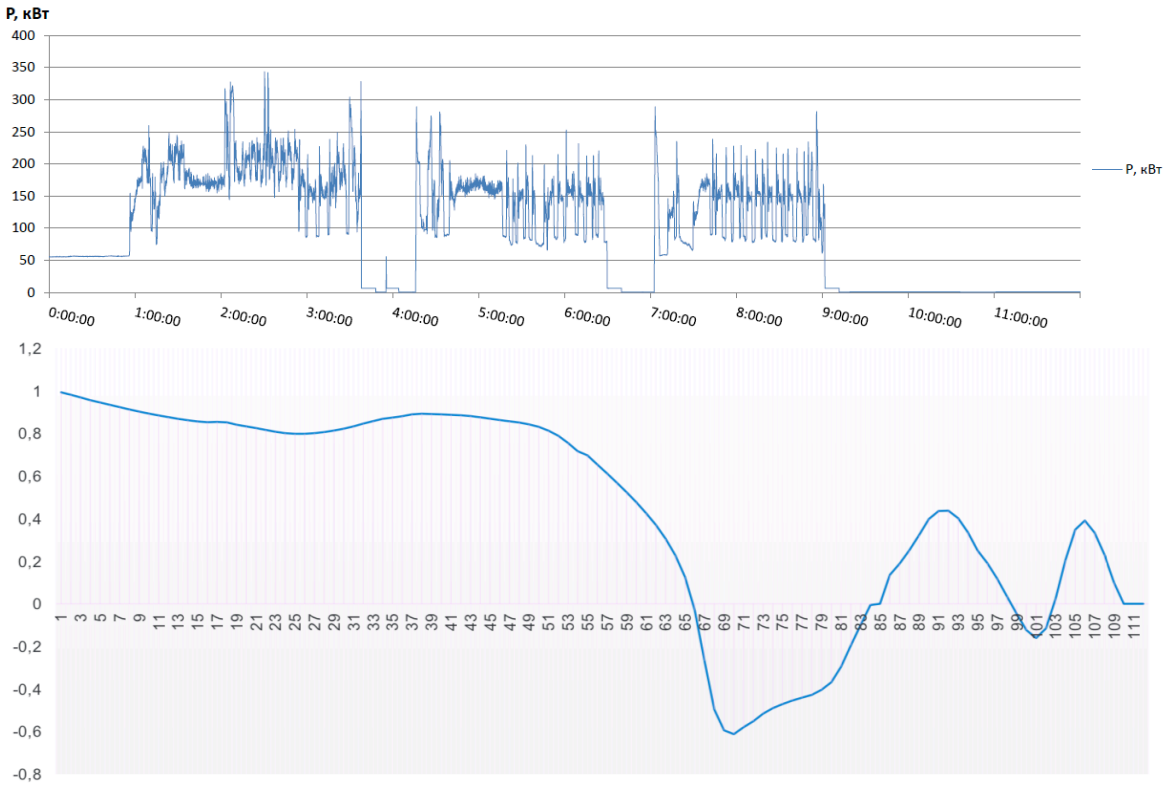


Рисунок 2 – График потребления активной мощности с регулируемой скоростью конвейерной ленты и его НКФ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочные данные по расчетным коэффициентам электрических нагрузок, шифр М788-1069 / ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 1990 г.
2. *Степанов В.П.* Динамические модели и методы расчета характеристик графиков электрических нагрузок иерархически-структурных систем электроснабжения: дис. д-ра техн. наук – Самара., 1999. - 369 с.
3. *Кротков Е.А.* Совершенствование иерархически-структурного метода расчета характеристик графиков электрических нагрузок систем электроснабжения: дис. канд. техн. наук – Самара., 2002. – 265 с.
4. *Синчук О.Н., Гузов Э.С., Пархоменко Р.А.* Совершенствование методов расчета электрических нагрузок при проектировании модернизации систем электроснабжения железорудных предприятий / Вестник КрНУ имени Михаила Остроградского, 2013. Вып. 1. (78) С. 28-32.
5. *Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б.* Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур. - Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 89 с.
6. *Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Веприков А.А., Хомяков К.А.* Повышение эффективности электротехнических преобразовательных комплексов для питания электролизеров алюминия / Цветные металлы, 2016. № 10. С. 29-32.
7. *Хомяков К.А., Беляков С.А.* Применение энергосберегающих электродвигателей производства РИВС на объектах горно-обогатительного производства / Горный журнал, 2016. №11. С. 107-108.
8. *Волошко А.В., Лутчин Т.Н.* Кластерный и вейвлет-анализ параметров энергопотребления / Вестник КДУ, 2010. № 1. С. 99-103.
9. *Волошко А.В., Лутчин Т.Н.* Разработка метода кластеризации вейвлет-

преобразовательных графиков электрических нагрузок / Вестник НТУУ «КПИ». Серия «Гирництво», 2010. Вып. 19. С. 72-82.
10. *Тавлинцев А.С., Суворов А.А., Стаймова Е.Д.* Поиск однотипных графиков нагрузки энергообъекта / Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2018. Т. 18. № 2. С. 20-27.
11. *Devine M., Baring-Gould E.I.* The Alaska village electric load calculator / NREL/TP-500-36824. October 2004.
12. *KEKA Ilir, CICO Betim, FRASHERI Neki* 2017 Effect of parallelism in calculating the execution time during forecasting electrical load *JNTS* 44 169-180.
13. *Bennett C., Stewart R.A., Lu J.* 2014 Autoregressive with exogenous variables and neural network short-term load forecast models for residential low voltage distribution networks *Energies* 7.
14. *Alasali F., Haben S., Becerra V., Holderbaum W.* 2017 Optimal energy management and MPC strategies for electrified RTG cranes with energy storage systems *Energies* 10.
15. *Ping-Huan Kuo, Chiou-Jye Huang* 2018 A high precision artificial neural networks model for short-term energy load forecasting *Energies* 11.
16. *Khuntia S.R., Rueda J.L.* Mart A.M.M. van der Meijden Long-term electricity load forecasting considering volatility using mulpiplicative error model *Energies* 11.

УДК 622.236.22

ЦЕНЕВ А.Н.,
Главный инженер НПП “ИННОТЕХ”
КОРОБКОВ Г.Е.,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
НОСОВ В.В.
Санкт-Петербургский горный университет

ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВОК КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Аннотация. Безопасная эксплуатация магистральных газопроводов обеспечивается прежде всего, эффективной работой средств электрохимзащиты, в состав которых входит установка катодной защиты. Контроль показателей эффективности работы установки определяется потребляемым количеством энергии, а также предотвращение непроизводительных потерь электроэнергии при электрохимической защите от коррозии трубопроводов. С целью оценки эффективности работы установки катодной защиты введены комплексные показатели эффективности работы станции, которые позволяют оценить процентное соотношение между потребляемой активной мощностью станции и необходимого количества электроэнергии на защиту подземного сооружения, с учетом возможных дополнительных потерь на сторонние сооружения других предприятий. Предложен расчет показателей эффективности работы установки и алгоритм мероприятий, в результате проведения которых, повысится энергетическая эффективность работы средств электрохимической защиты магистральных газопроводов.

Ключевые слова: безопасная эксплуатация, магистральный газопровод, электрохимическая защита, эффективность, катодная защита, установка катодной защиты, коэффициент полезного действия, дефект.

TSENEV A.N.,
INNOTECH Ltd.
KOROBKOV G.E.,
Ufa State Petroleum Technological University
NOSOV V.V.
Saint-Petersburg Mining University

CATHODIC PROTECTION INSTALLATIONS PERFORMANCE INDICATOR FOR MAIN GAS PIPELINES

ABSTRACT

Abstract. Main gas pipelines safe operation is provided primarily by the electrochemical protection device's effective operation, which includes the installation of cathodic protection. Monitoring of the plant's performance indicators is determined by the amount of energy consumed, as well as preventing unproductive losses of electricity during electrochemical protection from pipeline corrosion. In order to assess the efficiency of the cathodic protection unit, complex indicators of the station's performance have been introduced, which allow us to estimate the percentage of the station's active power consumption and the required amount of electricity to protect the underground structure, taking into account possible additional losses to third-party structures of other enterprises. The calculation of the efficiency indicators of the installation and the algorithm of measures that will increase the energy efficiency of the electrochemical protection of main gas pipelines is proposed.

Keywords: safe operation, main gas pipeline, electrochemical protection, efficiency, cathodic protection, cathodic protection installation, efficiency factor, defect.

Электрохимическая защита магистральных газопроводов обеспечивает целостность трубопроводной системы, а также предотвращает начало образования коррозионных процессов в металле стенки трубы благодаря работе установок катодной защиты (УКЗ) [1-5, 7-11, 12]. Эффективность работы УКЗ основывается на проведении энергетического обследования с целью контроля показателей эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), выявления причин непроизводительных потерь электроэнергии при электрохимической защите от коррозии трубопроводов [3, 4]. Энергетическое обследование должно проводится в три этапа: сбор, обработка и анализ исходной информации на основе предоставленных документов; приборное обследование на соответствие фактическим техническим показателям работы УКЗ; проведение анализа совокупных данных с целью определения резервов ТЭР [4, 7-14].

В реальных условиях при обследовании и оценки эффективности работы УКЗ, вводится условный коэффициент $К_э$ комплексный показатель эффективности работы установки катодной защиты, который позволяет оценить, сколько процентов потребляемой активной мощности УКЗ расходуется собственно на защиту участка магистрального газопровода [6].

$$К_э = Р_{полезная} / Р_{активная} \text{ x } 100\%$$

Основываясь на многочисленных данных проведения энергетических обследований УКЗ, установлено, что работа установки эффективна при Кэ ≥ 60%. Проведение следующих мероприятий обеспечит значительный рост эффективности работы УКЗ: выявление контактных узлов с высоким омическим сопротивлением (>0,05 Ом) и очистка их от продуктов окисления, вывод в резерв УКЗ без ущерба защищенности газопровода; приведение дренажных кабелей в нормативное состояние; замена станций катодной защиты с низким КПД на станции с высоким, капитальный ремонт или замена анодных заземлителей, вырабатывающих свой срок, проведение диагностики и замену при необходимости изоляционного покрытия газопроводов в местах обнаружения дефектов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон №116 от 21 июля 1997 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменениями на 29 июля 2018 года).
2. Федеральный закон №187 от 27 декабря 2002 «О техническом регулировании» (с изменениями на 28 ноября 2018 года).
3. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 26 июля 2019 года).
4. Приказ ФСТ России от 31 марта 2015 г. № 579-э «Об установлении требований к программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности субъектов естественных монополий, оказывающих услуги по транспортировке газа по газораспределительным сетям».
5. Защита трубопроводов от коррозии: Том 1: Учебное пособие / Ф.М. Мустафин [и др.]. СПб.: Недра, 2005. Т.1. 620 с.: ил.
6. *Блинов И.Г., Кускильдин Р.А., Старочкин А.В., Валюшок А.В., Шанин А.А.* Апробация методики энергоаудита катодных станций для защиты систем газораспределения на примере ОАО «Газ-Сервис». Территория нефтегаз. 2014.№12. С. 86-89.
7. *Tsenev A.N., Nosov V.V., Akimova E.V.* Fault location method for unexposed gas trunk line insulation at stray current constant effect area//International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2017, IPDME 2017 Сер. "IOP Conference Series: Earth and Environmental Science" 2017. С. 092028. – ISSN:

17551307.
8. *Ценев А.Н., Назарова М.Н., Носов В.В., Шарнина Г.С.* Мониторинг технического состояния изоляционных покрытий МГП в зоне постоянного действия блуждающих токов. Деловой журнал Neftegaz.RU. 2018. № 12. С. 58-60.
9. *Ценев А.Н., Носов В.В., Назарова М.Н.* Поиск повреждений изоляционных покрытий магистральных газопроводов без вскрытия в зоне постоянного действия блуждающих токов. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S5-2. С. 430-438.
10. *Назарова М.Н., Понкратова В.В.* Риск-ориентированный подход к обеспечению безопасной эксплуатации газопроводов системы газораспределения// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. - №7. – С. 484-489. – ISSN 0236-1493.
11. *Nosov V. V.* On the Principles of Optimizing the Technologies of Acoustic-Emission Strength Control of Industrial Objects// Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016, 2016, Vol. 52, No. 7, pp. 386–399.
12. *Ценев Н.К., Митрофанов О.А., Ценев А.Н., Кудояров Р.У.* Влияние дефектов на разрушение резервуаров и магистральных трубопроводов. В сборнике: Обеспечение промышленной безопасности при эксплуатации резервуаров и резервуарных парков Материалы консультационно-методического семинара. Ассоциация "Башкирская Ассоциация Экспертов"; ОАО "Газпром нефтехим Салават"; ФБГОУ ВПО "Уфимский государственный нефтяной технический университет". 2011. С. 143-152.
13. *Коробков Г.Е., Сайфутдинов А.И.* Безаварийная эксплуатация подводных переходов МНП. Деловой журнал Neftegaz.RU. 2018. № 12. С. 48-51.
14. *Коробков Г.Е.* Метод фононной диагностики на магистральных газопроводах. Деловой журнал Neftegaz.RU. 2019. № 4. С. 64-67.

УДК 621.311

ЧЕРВОНЧЕНКО С.С.,
ФРОЛОВ В.Я.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

АНАЛИЗ ПРОВАЛА НАПРЯЖЕНИЯ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ, ПОДКЛЮЧЕННОЙ К ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕТИ

Аннотация. В статье рассматривается и анализируется аварийный режим работы автономного электротехнического комплекса буровой установки. Описано понятие провала напряжения. Приведена сравнительная характеристика устройств и методов преодоления провалов с указанием недостатков и достоинств. Построены графики изменения величины напряжения на зажимах электродвигателя буровой установки.

Ключевые слова:провал напряжения; генератор; буровая установка; источники питания.

CHERVONCHENKO S.S.,
FROLOV V.YA.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

ANALYSIS OF THE VOLTAGE FALL OF A DRILLING RIG CONNECTED TO A LOCAL ENERGY NETWORK

Abstract. The article discusses and analyzes the emergency mode of the autonomous electrical complex of the drilling rig. The concept of voltage fall is described. A comparative characteristic of devices and methods for overcoming falls with the indication of disadvantages and advantages is given. Plots of changes of the magnitude of the voltage at the terminals of the electric motor of the drilling rig.

Keywords: voltage fall; generator; drilling rig; power sources.

Локальные энергетические комплексы или системы автономного электроснабжения, широко применяются во многих отраслях народного хозяйства. Особенно часто они используются в системах электроснабжения промышленных объектов нефтегазовой отрасли. Это связанно с освоением и разработкой особо удаленных от электросетей месторождений нефти и газа в различных регионах мира, в том числе и в нашей стране: в Сибири, на Дальнем Востоке и других регионах.

Системы автономного электроснабжения, удаленные от высоковольтных электрических сетей, в основном, питаются от автономных электростанций с двумя дизель-генераторными установками, одна из которых является основной, а другая – резервной. В таких изолированных системах особое внимание необходимо уделять показателям качества электроэнергии.

Наиболее значимый показатель качества электроэнергии, который возникает при внезапном понижении напряжения электрической сети ниже 0,9 Uном. - это провал напряжения [1]. За провалом наблюдается восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через определенный промежуток времени от 10 мс до нескольких десятков секунд. Его уменьшение изменяется на 10...100% от номинального. Посадка напряжения на 100% может рассматриваться как кратковременное прерывание питания. Провалы являются наиболее критичными аварийными нарушениями. Они приводят к отключениям и перегрузке электрооборудования и

потребителей электроэнергии [2].

Различают следующие устройства, защищающие электрооборудование промышленных предприятий от провалов напряжения: маховик, статический источник бесперебойного питания (ИБП), динамический компенсатор искажений напряжения, статический компенсатор (СТАТКОМ), параллельно работающий СД, повышающий преобразователь, активный фильтр и бестрансформаторный последовательный усилитель [3, 4].

Таблица 1.

Сравнительные характеристики оборудования

№ п/п	Наименование устройства	Достоинства	Недостатки
1	2	3	4
1	Маховик	- защита от возмущений основного питания; - высокий КПД (93%);	- значительные механические потери;
2	Статический ИБП	- быстродействие;	- высокая стоимость; - небольшое время выдачи мощности;
3	Статический компенсатор	- активное регулирование реактивной мощности;	- высокая стоимость;
4	Повышающий преобразователь	- быстродействие;	- необходимость применения частотных преобразователей высокой мошности; - компенсация провалов напряжения только до 50% от Uном; - необходимость использования батарей для преодоления глубоких провалов;
5	Активный фильтр	- наряду с провалом напряжения компенсируется и негативное влияние высших гармоник;	- повышенная мощность при компенсации глубоких провалов;
6	Бестрансформаторный последовательный усилитель	- быстродействие; - компенсация несимметричных провалов.	- компенсация провалов напряжения только небольшой мощности; - компенсация провалов напряжения только до 50% от Uном.

Проанализировав табл. 1 и некоторые источники [5, 6], можно сделать вывод, что наиболее эффективны для уменьшения влияния провалов напряжения автономные источники питания. Из них можно выделить дизель-генераторные блоки, стабилизаторы напряжения. Однако использование стабилизаторов напряжения является ограниченным в виду их небольшой мощности для промышленных масштабов. Поэтому в рамках данной статьи представлен анализ провала напряжения буровой установки в локальном электротехническом комплексе на основе модели (рис. 1) в среде MatLab Simulink.

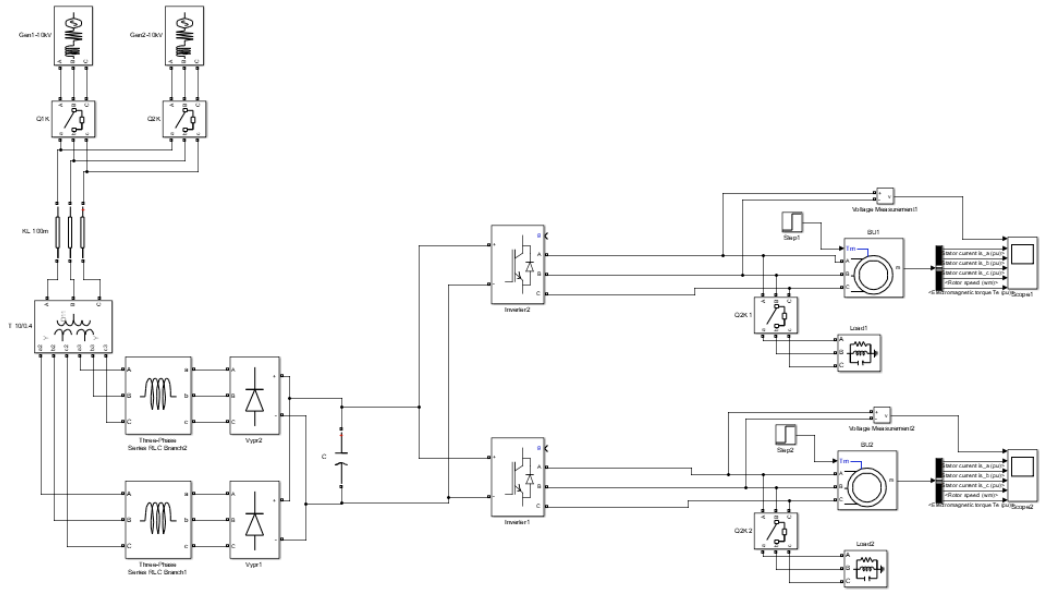


Рисунок – Схема локальной энергетической сети буровой установки

Блоки Gen1 и Gen2 моделируют работу блока дизель-генератор P = 550 кВт, BU1 и BU2 – асинхронных двигателей буровых установок (в представленной модели был использован блок Asynchronous machine из библиотеки Simulink – P = 310 кВт, Load1 и Load2 представляют дополнительную нагрузку, которая используется для создания провала напряжения. Такой способ позволяет получить сравнительные данные, которые приведены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 и 3 видно, какие изменения происходят в сети при включении дополнительной нагрузки или «прихвата» оборудования - напряжение на зажимах буровой установки просаживается ниже 0,5 Uном. В данный момент в нефтегазовой и горнодобывающей промышленности существует один способ борьбы с данным аварийными режимом – аварийный подъем бурового инструмента. Однако такой метод ведет к экономическим и технологическим потерям.

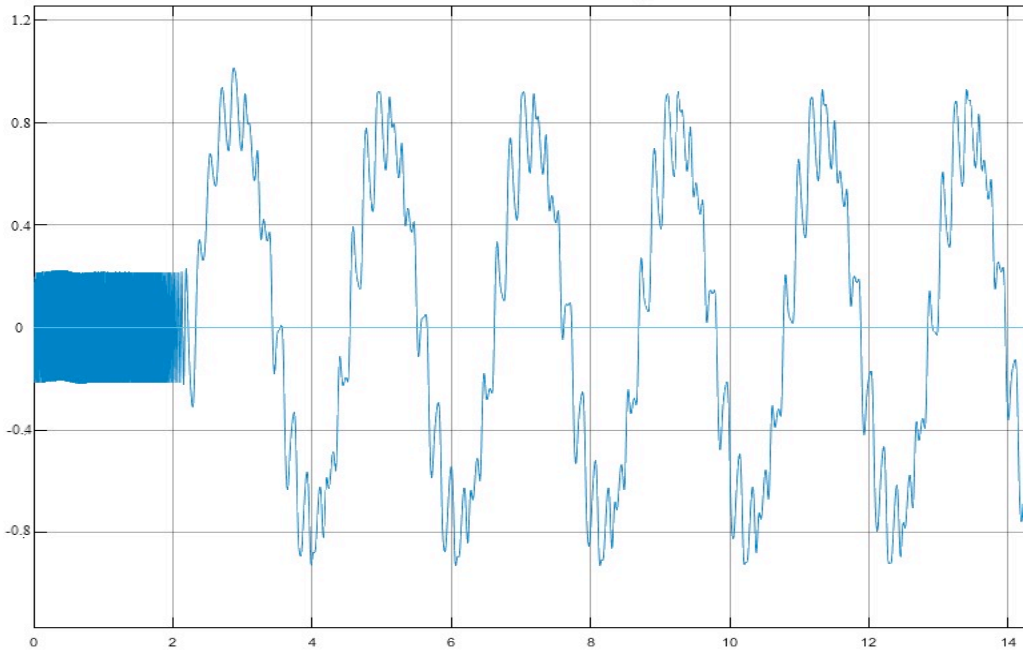


Рисунок 2 – Величина напряжения на зажимах электродвигателя буровой установки в нормальном режиме

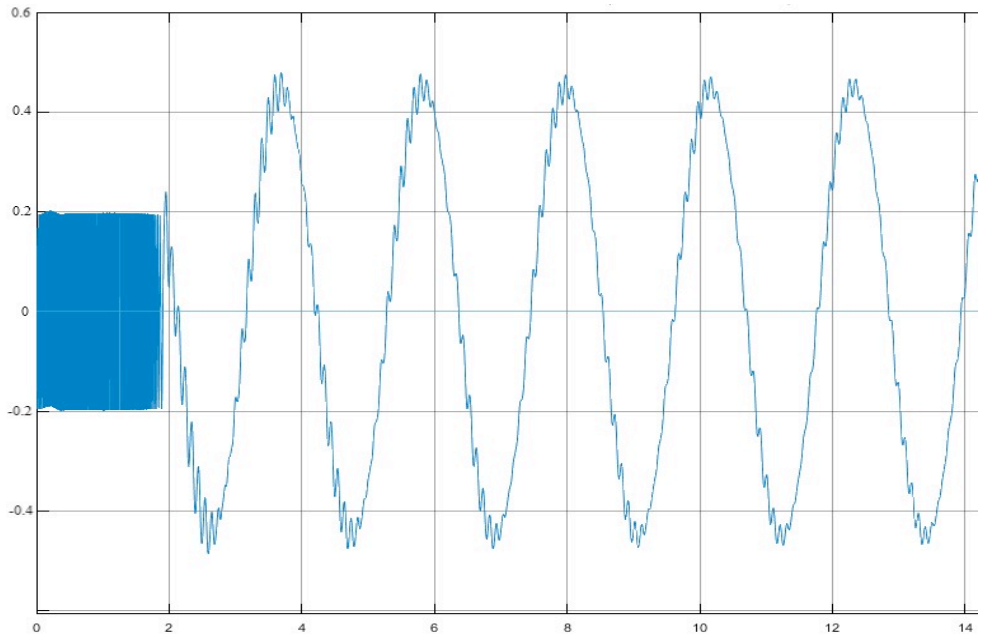


Рисунок 3 – Величина напряжения на зажимах электродвигателя буровой установки в аварийном режиме

Исходя из табл. 1 видно, что самые популярные ныне устройства не смогут преодолеть величину провала ниже 0,5 Uном и вернуть систему в нормальный режим работы. Решением для данного аварийного режима видится использование резервного источника питания (дизель-генератора), подключенного параллельно основному. Продолжение работы следует видеть в исследовании переходных процессов при провалах напряжения и подключения резервного питания, а также составления рекомендаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144-2013 Электричекая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
2. *Жежеленко И.В.* Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2014. – 167 с.
3. *Никифоров Г.В.* Энергосбережение и управление энергопотреблением в химическом производстве / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2013. – 479 с.
4. *Ершов С.В.* Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения / С.В. Ершов, М.С. Пигалов // Энергосбережение. Известия ТулГУ. Технические науки, 2017. №12.1.
5. *Степаненко В.П.* Определение параметров накопителей энергии комбинированных силовых установок / Горный информационно-аналитический бюллетень, 2016. № 8. С. 166–174.
6. *Овчаренко А.С., Розинский Д.И.* Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий. – Киев: Техника, 2012. – 286 с.
7. *Shklyarskiy Y.E., Bardanov A.I., Shklyarskiy A.Y.* Novel approach to control of active rectifier during voltage dips // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 194, 052022. DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052022.
8. *Abramovich B.N., Bogdanov I.A., Kopteva A.V., Malarev V.I.* The system of trigeneration with binary cycle for use as an energy source for gas fuel. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019, 643. 012092. doi: 10.1088/1757-899X/643/1/012092.

9. *Skamyin A.N., Belsky A.A.* Reactive power compensation considering high harmonics generation from internal and external nonlinear load // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87(3), 032043. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032043.
10. *Zhukovskiy Y.L., Korolev N.A., Koteleva N.I.* Diagnostics of an asynchronous motor powered from a self-commutated voltage inverter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 560, 012171. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012171.
11. *Shpenst V.A.* Investigation of the state of materials of power lines by multispectral optical-electronic devices // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, Volume 378, 012072. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012072.
12. *Belsky A.A., Dobush V.S., Kuksov N.A., Gluhanich D.Y.* Autonomous power supply complex for oil leakage detection system in pipelines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 643(1), 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012029.
13. *Ivanchenko D., Smirnov A.* Identification of interturn faults in power transformers by means of generalized symmetrical components analysis // E3S Web Conf., 140 (2019) 04007. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914004007.
14. *Ptitsyna E.V., Ptitsyn D.V., Kuvaldin A.B.* To the question of effective modes mixed load with the complex waveform current supply. Journal of Physics: Conference Series 2019.

УДК 621.316

ЧЕРЕНКОВ В.А.,
ИВАНОВ Д.В.,
ФРОЛОВ В.Я.,
ОНЕПАВИНА МАЛАВАНХ
Санкт- Петербургский политехнический
университет Петра Великого

ПОВЫШЕНИЕ ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВДК 10 КВ В СРАВНЕНИИ СОБСТВЕННОГО АКСИАЛЬНОГО И РАДИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Аннотация. Целью данной работы является повышение отключающей способности вакуумного выключателя с аксиальным радиальным магнитным полем.
Основной задачей в данной работе является расчет электромагнитного поля в разомкнутом положении контактов. Также, будет проанализировано влияние конструкции контактов и создаваемого ими магнитного поля на величину отключающей способности.

Ключевые слова: вакуумный выключатель, магнитное поле, отключающая способность, электрический ток, электромагнитное поле.

CHERENKOV V.A.,
IVANOV D.V.,
FROLOV V.YA.,
MALAVANH ONEPAVINA
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

INCREASING THE BREAKING CAPACITY OF 10 KV VDK IN COMPARISON WITH ITS OWN AXIAL AND RADIAL MAGNETIC FIELD

Аннотация. The purpose of this work is to increase the breaking capacity of a vacuum circuit breaker with an axial radial magnetic field.
The main task in this work is to calculate the electromagnetic field in the open position of the contacts. Also, the influence of the contact design and the magnetic field created by them on the value of the breaking capacity will be analyzed.

Ключевые слова: vacuum switch, magnetic field, breaking capacity, electric current, electromagnetic field.

1. Контактная система с аксиальным магнитным полем.

Для решения поставленной задачи использовался программный продукт COMSOL Multiphysics. Для создания трехмерной геометрии использовалась программа КОМПАС-3D. Моделирование проводилось при токе 20 кА и напряжении 10 кВ промышленной частоты.

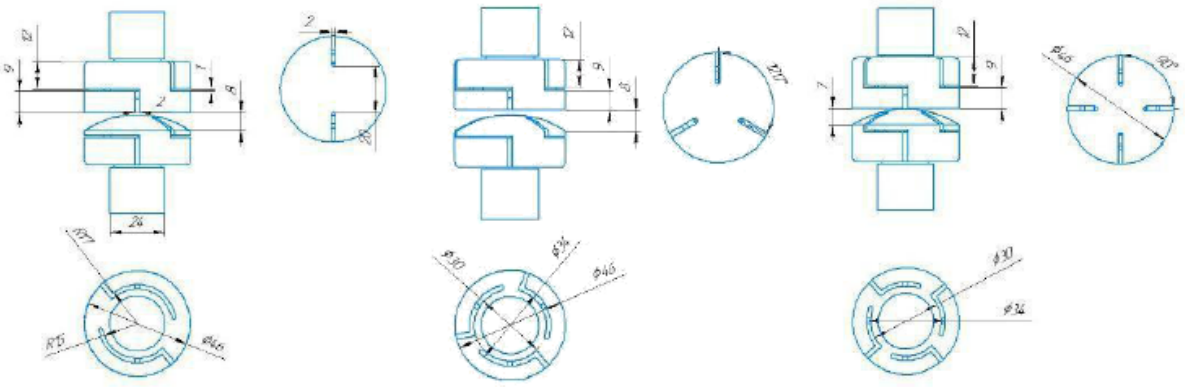
На рис. 1.1 представлены три варианта исполнения геометрии ВДК для определения зависимости величины отключающей способности от количества щелей.

Для вакуумного выключателя с AMF с контактами щелевого типа, максимальный отключаемый ток можно рассчитать из формулы [1]:

$$I_{откл} = k \cdot D^2 \cdot B_z^{\alpha}, \quad (1.1)$$

где k = const; D – диаметр контактов, мм; Bz – удельная индукциямагнитного поля в центре плоскости между контактами в максимуме тока, мТл/кА.

На примере первой конструкции рассчитаем отключающую способность.



(1) (2) (3)

Рисунок 1.1 - Три варианта исполнения геометрии ВДК:
(1) – конструкция 1: ВДК с 2-мя секторами, (2) – конструкция 2: ВДК с 3-мя секторами,
(3) – конструкция 3: ВДК с 4-мя секторами

Из рис. 1.2 видно, что в максимуме тока осевая компонента магнитной индукции в центре плоскости между контактами составляет 450 мТл. Подставив в формулу (1.1), получим:

$$I_{откл} = 3.19 \cdot 46^2 \cdot 4.5^{0.4} = 22.6\ (кА)$$

Соответственно, максимальный отключаемый ток для геометрии, изображенной на рис. 1.2, составляет 22,6 кА.

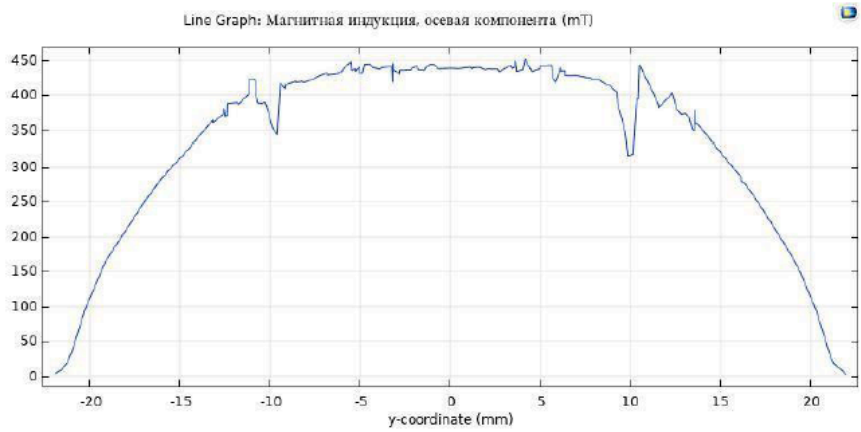


Рисунок 1.2 - Распределение осевой компоненты магнитной индукции в центре плоскости между контактами

В табл 1.1 приведены результаты моделирования для различных конструкций контактов.

Таблица 1.1.

Результаты моделирования для различных конструкций контактов

	Конструкция 1	Конструкция 2	Конструкция 3
Bz, мТл	450	530	670
Imax, кА	22,63	24,17	26,54

Для базовой конструкции контактов, отключающая способность составляет 22,63 кА. Изменив конструкцию (рис. 1, (3)), способность увеличивается до 26,54 кА.

Таким образом, можно увеличить максимальный отключаемый ток вакуумного выключателя путем изменения конструкции контактной системы при сохранении геометрических размеров ВДК. Это является актуальным вопросом в связи с постоянным ростом нагрузки на энергосистему и с повышением токов.

2. Контактная система с радиальным магнитным полем:

Исследуемая контактная система с радиальным магнитным полем в конструкции вакуумной дугогасительной камеры была построена в среде моделирования COMSOL и представлена на рис.2.1.

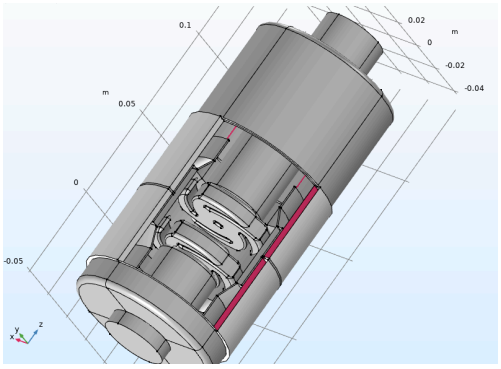


Рисунок 2.1 - Модель вакуумного выключателя с радиальным магнитным полем, построенная в COMSOL

В результате проведенных расчетов и моделирования процесса отключения тока КЗ = 40 кА, были получены следующие изображения, на которых наглядно представлена индукция магнитного поля и величина силы Лоренца, действующей на дугу (канал дуги задается вначале недалеко от оси, а потом вручную перестраивается в том месте, куда была направлена сила Лоренца в предыдущем расчете), которая образуется в следствии взаимодействия магнитного поля и тока, текущего между контактами:

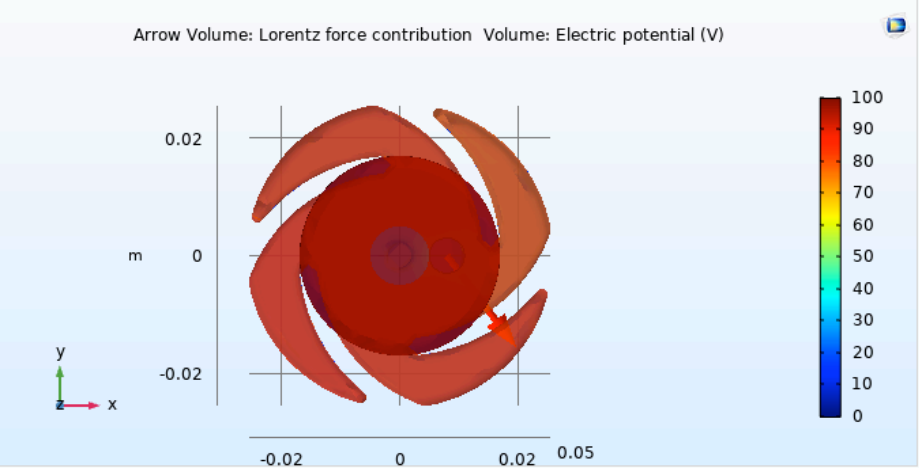


Рисунок 2.2 - Величина и направление силы Лоренца при возникновении дуги

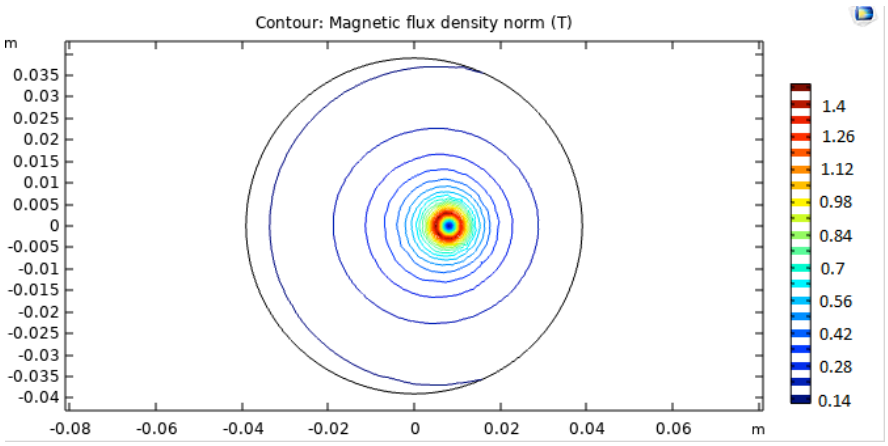


Рисунок 2.3 - Индукция магнитного поля

На рис. 2.3 представлена индукция магнитного поля, как видно из рисунка, величина ее составляет 1.4-1.5 Тл, с помощью этого значения и формулы для нахождения силы, действующей на дугу[6]:

$$F = 0{,}5 \cdot i \cdot L \cdot B, \qquad (2.1)$$

где i – ток, L – расстояние между контактами, B – магнитная индукция, мы получаем, что:

$$F = 140\text{-}150 \text{ Н}.$$

Как видно из рис. 2.4, направление силы Лоренца постоянно меняется при перемещении дуги по поверхности контактов, поэтому для описания пути перемещения дуги необходимо взять еще несколько точек:

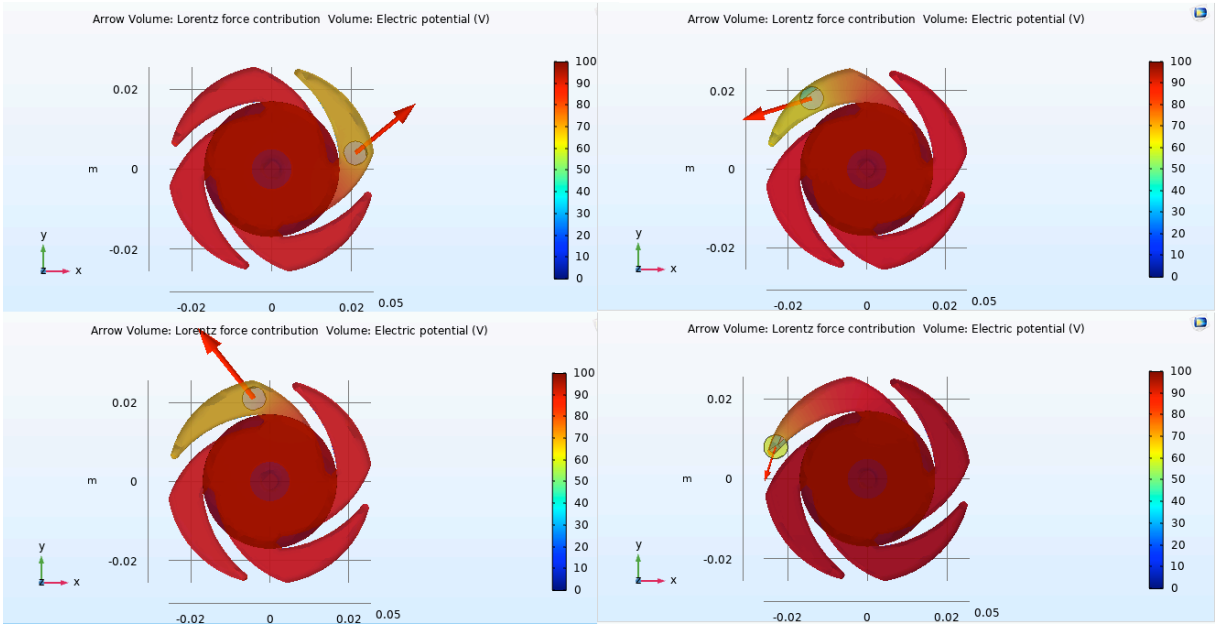


Рисунок 2.4 - Величина и направление силы Лоренца, действующей на дугу.

Таким образом, на основании полученных данным можно сделать вывод о пути перемещения дуги по поверхности контактов под действием силы Лоренца (рис.2.5).

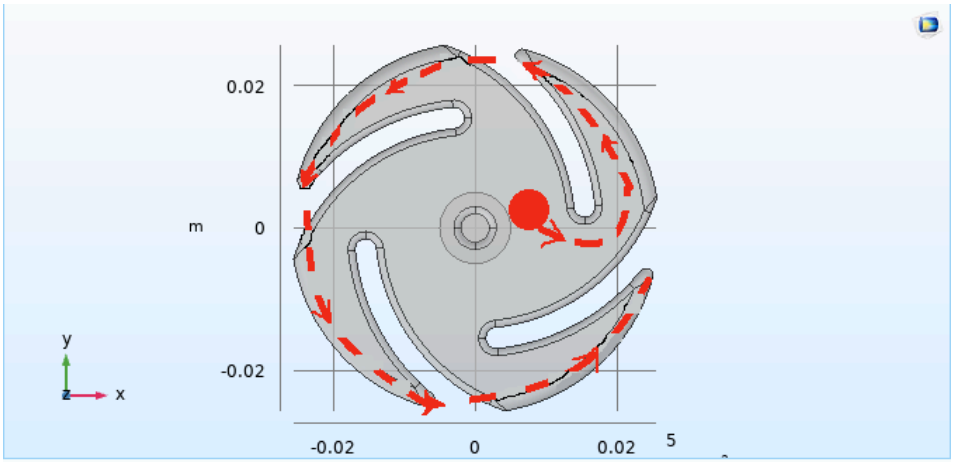


Рисунок 2.5 - Путь перемещения дуги по поверхности контактов

Как видно из рис.2.5 дуга перемещается по наибольшей длине пути контакта, что обеспечивает наиболее равномерное нагревание контакта по всей площади, при отключении. Похожее поведение дуги в выключателе с радиальным магнитным полем описывается в исследовательской работе Японских ученых [7], что подтверждает правильность выполнения и работы процесса моделирования, при использовании с построенной моделью. Дуга продолжает двигаться по кругу, до возникновения нуля тока, после чего гаснет (примерно через 10,5 мс) в вакууме.

По результатам произведенного моделирования была получена величина силы Лоренца. При форме контактов с шириной разрезов s_1=5мм ее величина изменяется в диапазоне $F_{Л1}$ = (134 - 206) Н, что подтверждает наши расчеты, произведенные ранее.

Далее для определения влияния геометрии на величину силы Лоренса, а, следовательно, и отключающей способности, проведено моделирование контактной системы с измененной величиной прорезей равных 2 и 8 мм.

Результаты проведенных вычислений приведены в таблице 2.1:

Таблица 2.1.

Результаты вычислений

Величина	s		
Ширина прорезей, мм	2	5	8
Сила Лоренца $F_Л$, Н	112	140	168
Отключающая способность, кА	35,8	40	41,4
Магнитная индукция В, Тл	1.25	1.4	1.62

Таким образом дугогасительное устройство вакуумного выключателя с радиальным магнитным полем может быть использовано для отключения более высоких токов КЗ, благодаря изменению формы дугогасительных контактов, а именно увеличению ширины прорезей. Что является актуальным вопросом в настоящее время в связи с ростом потребителей электроэнергии и соответственно с ростом нагрузки электросетей и увеличению отключаемых токов.

Выводы.

В данной работе с помощью моделирования физических процессов в ВДК 10 кВ, 20 кА и в ВДК 10 кВ, 40 кА было доказано, что изменение геометрии способствует увеличению максимального отключаемого тока, но, к сожалению, сложность моделирования дуги, а точнее приэлектродных процессов, не позволила точно определить корреляцию. В случае ВДК с аксиальным магнитным полем диффузионная дуга в меньшей степени воздействует на поверхность электродов, поэтому отклонение от

ожидаемых величин не так велико, как в случае с ВДК с радиальным магнитным полем, контрагированная дуга которого в большей степени воздействует на электроды по неизвестной нам зависимости. В данном исследовании показан сам факт того, что изменение геометрии способствует повышению отключающей способности обоих типов ВДК, дальнейшее исследование которых позволит вывести вакуумные выключатели, повсеместно используемые на среднем классе напряжения, на более высокие значения класса напряжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Liu Z., Cheng S., Zhang X., Wang J., Wang Q. and He G.* 2011 An Interrupting Capacity Model of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters with Slot Type Contacts *2006 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum* 297-300.
2. *Chaly A.M., Logatchev A.A.,.Zabello K.K., Shkol'nik S.M.* 2009 High-current vacuum arc in a strong axial magnetic field *IEEE Transactions on Plasma Science* 35(4) 939-945.
3. *Забелло К.К.* Характеристики статистического распределения тока, пропускаемого катодным пятном вакуумной дуги, в магнитных полях различной ориентации / К.К. Забелло, А.А. Логачёв, А.М. Чалый, С.М. Школьник // Журнал технической физики, 2010. Т.79. № 6. С. 58-66.
4. *Chaly A.M., Shkol'nik S.M.* 2011 Low-current vacuum arcs with short arc length in magnetic fields of different orientations: a review *IEEE Transactions on Plasma Science* PART 1. 39(6) 1311-1318.
6. *Муллин В.В.*Оценка скорости перемещения дуги в вакуумных дугогасительных камерах с поперечным магнитным полем / В.В. Муллин, М.А. Фурсаев // Вестник СГТУ, 2012. №2 (66). Вып. 2. С. 136-138.
7. *Hui Ma, Zhang Zaiqin, Yingsan Geng, Jianhua Wang* 2018 Rotation Characteristics of Vacuum Arcs Driven by Transverse Magnetic Fields *IEEE Transactions on Plasma Science* PP(99).
8. *Shklyarskiy Y.E., Bardanov A.I., Shklyarskiy A.Y.* Novel approach to control of active rectifier during voltage dips // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 194, 052022. DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052022.
9. *Kopteva A. V., Ushkova T. O., Koptev V. Y., Malarev V. I,* Development of a system for automated control of oil transportation in the Arctic region to prevent the formation of paraffin deposits in pipelines / E3S Web of Conferences, № 140, 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/201914007004.
10. *Zhukovskiy Y.L., Korolev N.A., Koteleva N.I.* Diagnostics of an asynchronous motor powered from a self-commutated voltage inverter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 560, 012171. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012171.
11. *Shpenst V.A*. Investigation of the state of materials of power lines by multispectral optical-electronic devices // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, Volume 378, 012072. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012072.
12. *Skamyin A.N., Belsky A.A.* Reactive power compensation considering high harmonics generation from internal and external nonlinear load // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87(3), 032043. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032043.
13. *Skamyin A.N., Dobush V.S.* Analysis of nonlinear load influence on operation of compensating devices // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194 (5), 052023. DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052023.
14. *Belsky A.A., Dobush V.S., Kuksov N.A., Gluhanich D.Y.* Autonomous power supply complex for oil leakage detection system in pipelines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 643(1), 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012029.
15. *Abdallah W.J.* Studies of voltage stabilization and balancing systems in energy storage modules based on supercapacitors // Journal of Physics: Conference Series. 2019, Vol. 1333(6), 062001. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062001.

УДК 621.365.5

ЧМИЛЕНКО Ф.В.,
ЕРМЕКОВА М.Р.
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
РАСТВОРОВА И.И.,
КЛЮЧЕРЕВ Н.А.
Санкт-Петербургский горный университет

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА «ПОЛОСАТОГО НАГРЕВА» ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ ВБЛИЗИ ТОЧКИ КЮРИ

Аннотация. Впервые эффект «полосатого нагрева» при индукционном нагреве ферромагнитных материалов упоминается в работах советских ученых Лозинского М.Г. и Бабата Г.И. в середине XX в. [1]. Они попытались дать физическое объяснение «полосатому нагреву» и высказали опасения, что это явление может ограничить применение индукционной закалки. Однако, при практическом использовании индукционного нагрева в большинстве случаев не наблюдалось существенного влияния этого эффекта на технологический процесс. В связи с этим, «полосатый нагрев» активно не обсуждался научной общественностью и не был в достаточной степени исследован. Возобновил дискуссию по этому вопросу проф. Дзлиев С.В. [2-4]. В дальнейшем проф. Немков В.С. попытался собрать всю имеющуюся информацию о «зебра эффекте» (так он назвал это явление) и обобщить ее [5]. Данная статья продолжает дискуссию об эффекте «полосатого нагрева», а также о его проявлении при численном моделировании индукционного нагрева ферромагнитных тел. Приводится частный случай проявления эффекта «полосатого нагрева» при кузнечном индукционном нагреве с дискретным переталкиванием.

Ключевые слова: индукционный нагрев, численное моделирование, температура Кюри.

CHMILENKO F.V.,
ERMEKOVA M.R.
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
RASTVOROVA I.I.,
KLYUCHEREV N.A.
Saint-Petersburg MiningUniversity

MANIFESTATION OF THE “STRIPE HEATING” EFFECT IN NUMERICAL SIMULATION OF INDUCTION HEATING OF FERROMAGNETIC BODIES NEAR THE CURIE POINT

Abstract. For the first time, the effect of «striped heating» in the induction heating of ferromagnetic materials is mentioned in the works of Soviet scientists Lozinski M.G. and Babat G.I. in the mid-20th century [1]. They tried to give a physical explanation for the «striped heating» and expressed fears that the phenomenon might limit the use of induction hardening. However, in the practical use of induction heating in most cases, there was no significant influence of this effect on the process. In this regard, the «striped heating» was not actively discussed by the scientific community and was not sufficiently researched. The discussion on this issue was resumed by prof. Dzliev S.V. [2-4]. In the future, prof. Nemkov V.S. tried to gather all the available information about the "zebra effect" (as he called it a phenomenon) and summarize it [5]. This article continues the discussion about the effect of «striped heating», and

its manifestation in numerical modeling of induction heating of ferromagnetic bodies. A special case of the effect of «striped heating» in blackous induction heating with discrete overflow is given.

Keywords: induction heating, numerical modeling, Curie temperature.

ВВЕДЕНИЕ

Впервые упоминание об эффекте «полосатого нагрева» во время индукционной закалки ферромагнитных материалов упоминается в работе 1940 г.советских ученных Бабата Г.И. и Лозинского М.Г. [1]. Суть этого явления заключается в том, что при индукционном нагреве ферромагнитной стали в районе температуры точки Кюри на поверхности нагреваемых цилиндрических тел появляются яркие кольца, температура которых может отличаться от температуры промежутков на 100–200 °С. При дальнейшем нагреве «полосатость» пропадает, и по достижении температуры около 850 °С вся поверхность начинает светиться равномерно.

В своих последующих работах Бабат Г.И. и Лозинский М.Г. пытались развивать объяснение «полосатого нагрева» [6-8]. В них приведены некоторые количественные соотношения, полученные экспериментально, изложены условия возникновения этого явления, а также сделаны предположения о причинах его возникновения.

Следует отметить, что объяснение первопричин «полосатости» в последних работах ученых отличается. Лозинский М. Г. полагал, что под воздействием переменного поля возникают магнитострикционные колебания в поверхностном слое, которые приводят к изменениям свойств нагреваемой стали. Области, подверженные меньшим механическим деформациям, будут иметь меньшее удельное сопротивление и, следовательно, там будет происходить более интенсивный нагрев [8]. В посмертной работе Бабата Г.И., отредактированной его учениками, приводится одно из самых полных описаний «полосатого нагрева» [6]. Бабат Г.И. не выделял магнитострикцию как причину, и его подход кажется более верным. Он различал «вынужденный полосатый нагрев» и «естественный полосатый нагрев».

Причиной «вынужденного полосатого нагрева» может быть локальный перегрев под витками индуктора, а причиной «естественного полосатого нагрева» в области однородного поля индуктора является неизбежная неоднородность свойств материала. По одной из этих причин происходит локальный перегрев выше точки Кюри, в зонах перегрева результирующее сопротивление становится меньше, и, как следствие, в эти зоны вытесняются линии токов из окружающего металла.

Следует учесть, что для своих исследований Бабат Г.И. и Лозинский М.Г. использовали ламповые генераторы на частотах выше 100 кГц, но в практике промышленного применения индукционной закалки, в качестве источников питания в середине XX в. верх одержали машинные генераторы, работающие на значительно более низких частотах. Возможно это, а также относительно узкая область практического применения эффекта «полосатого нагрева», явились причиной отсутствия интереса к нему исследователей в течение долгого времени.

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЕ «ПОЛОСАТОГО НАГРЕВА»

На возобновление интереса к эффекту «полосатого нагрева» повлияло широкое распространение надежных транзисторных источников питания: это позволило поднять рабочую частоту тока для промышленных установок индукционной закалки ферримагнитной стали. В 2013 г. группа проф. Дзлиева С.В. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») сообщила, что при нагреве стальных деталей на частоте 66-100 кГц под закалку наблюдается «полосатый нагрев» как в случае стационарных, так и сканирующих

индукторов [2-3]. Они предприняли попытку смоделировать это явление с использованием коммерческого пакета Ansys. Вероятно, это был первый случай компьютерного моделирования «полосатого нагрева». Однако, удалось воспроизвести этот эффект только при помощи значительной корректировки зависимости магнитной проницаемости от температуры для нагреваемой детали.

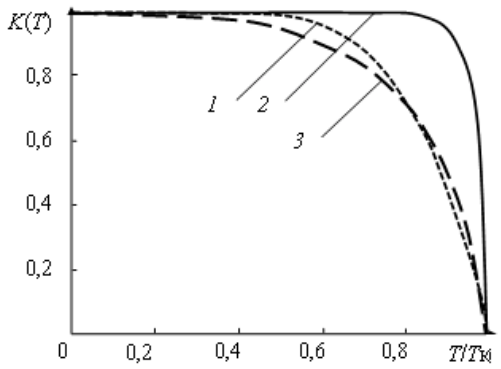


Рисунок 1 – Кривые зависимости магнитных свойств от температуры: 1 – n = 4, 2 – n = 25, 3 – экспериментальная кривая для Fe [10]

Магнитная проницаемость ферромагнитных тел при индукционном нагреве зависит от напряженности магнитного поля и от температуры, что можно представить следующим образом:

$$\mu(H,T) = 1 + (\mu(H) - 1)K(T),$$

где μ(H) – зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля, $K(T)$ – коэффициент зависимости магнитной проницаемости от температуры. Для него часто используют следующие выражения [9]:

$$K(T) = (1 - T/T_K)^n \text{или}$$

$$K(T) = (1 - \exp((T - T_K)/c)),$$

где T_K – температура Кюри, nи c – параметры подбираемые эмпирически. Как правило, если тепловой расчет проводиться относительно градусов Цельсия, то для относительно сильных магнитных полей, которые используются при индукционном нагреве, задают n равное 4. Однако в работах [2-3] коэффициент nнеобоснованно задается равным 25.

На результаты команды проф. Дзлиева С.В. обратил внимание проф. Немков В.С. (Center for Induction Technology, USA). Он попытался найти в литературе информацию по данному эффекту, но не нашел ни одной публикации на эту тему за последние 50 лет. Используя простые электромагнитные расчеты с постоянными свойствами материалов, проф. Немков В.С. показал [5], что в нагреваемом теле на границе двух сред с резким изменением магнитной проницаемости происходит перераспределение наведенных токов, которое хорошо согласуется с объяснением, данным Бабатом Г.И. [6]. И чем больше разница в магнитной проницаемости двух сред, тем больше проявляется эффект перераспределения токов.

Кроме того, в работе [5] удалось смоделировать «полосатый нагрев» в коммерческом пакете Flux 2D, но для этого потребовалось также как и в [2-4] изменить зависимость магнитной проницаемости от температуры для нагреваемой детали.

Чем можно объяснить необходимость необоснованного изменения зависимости магнитной проницаемости от температуры? Скорее всего, причина заключается в том, что конечноэлементные модели, построенные на основе коммерческих пакетов общего назначения, таких как Ansys или Flux, не приспособлены задавать естественную неоднородность материала. Таким образом, построенные в этих пакетах модели не подходят для воспроизведения«естественного полосатого нагрева», так как не отражают всю физику явления. Увеличение же магнитной проницаемости приводит к усилению «вынужденного полосатого нагрева», вызванного либо неоднородным нагревом (как следствие геометрии системы), либо за счет погрешности моделирования на соседних конечных элементах. В обоих случаях более крутая зависимость магнитной проницаемости от температуры позволяет легче получить ее градиент на границе двух конечных элементов, достаточный для «запуска»эффекта.

Также имеет смысл отметить, что в работах [2-5] для исследования применялись модели в комплексной области, которые при индукционном нагреве до точки Кюри имеют большую погрешность, выраженную в занижении внутренних источников теплоты. Это

может приводить к увеличению времени нагрева в модели более чем на 10%. Расчеты для ферромагнитных тел во временной области лучше соответствуют реальности, а увеличение скорости нагрева способствовало бы появлению больших градиентов температур в районе поверхности, что в свою очередь является механизмом для запуска эффекта «полосатого нагрева».

ЭФФЕКТ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ С ДИСКРЕТНЫМ ПЕРЕТАЛКИВАНИЕМ

Интересный эффект, демонстрирующий перераспределение источников теплоты между заготовками, происходит при нагреве в индукторах с дискретным переталкиванием. Он наблюдается на стыке двух заготовок, когда из-за разности температур возникает резкий перепад магнитной проницаемости. В этом случае торец «горячей» заготовки разогревается еще больше, а торец «холодной», наоборот, теряет температуру, что продемонстрировано на рис. 2, где представлено расчетное окно программы Universal 2D [11-12]. На поверхности у правого торца третьей детали температура заметно снижается, а температура на поверхности четвертой детали ближе к левому торцу возрастает. Физическая природа этого явления соответствует явлению полосатости при индукционной закалке. Здесь также, как и с яркими полосами начинает работать принцип обратной положительной связи – более горячий участок детали сильнее разогревается, так как в этой зоне, особенно если она выше точки Кюри, результирующее сопротивление становится меньше, и в эти зоны вытесняются линии токов из более холодной еще магнитной заготовки.

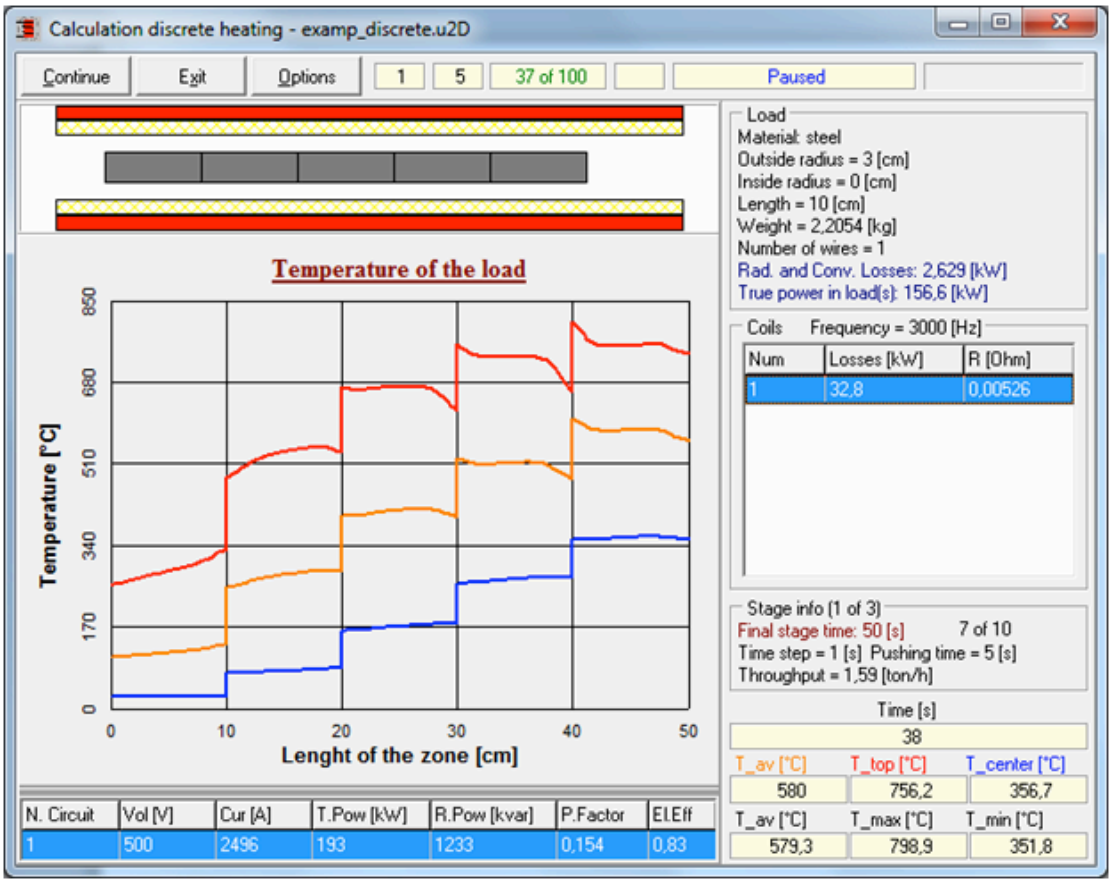


Рисунок 2 – Расчетное окно программы Universal 2D. Моделируется индукционный нагрев пяти цилиндрических стальных заготовок в индукторе дискретного типа. Верхний график – температура на поверхности деталей, средний график – средняя температура, нижний график – температура в центре

Стоит отметить, что прикладного значения этот эффект не имеет. Дискретный нагрев в основном применяется для нагрева под ковку, и за время, которое потребуется для достижения требуемых температур (более 1000 °С), неравномерность, вызванная данным эффектом, сгладится.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье показаны проблемы связанные с корректным воспроизведением эффекта «полосатого нагрева»в численных моделях. Для моделирования полосатости имеет смысл воспользоваться теми программными средствами, которые позволят задать неоднородность свойств материала, такие как удельное сопротивление, теплопроводность и теплоемкость.

Представлен эффект перераспределения источников теплоты при дискретном нагреве, базирующийся на том же физическом принципе, что и «полосатый нагрев». В связи с тем, что градиент температур на стыке двух деталей получается естественным путем, для моделирования этого эффекта не требуется необоснованно изменять зависимость магнитной проницаемости от температуры или задавать неоднородность свойств материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабат Г.И.* Поверхностное упрочнение стали обработкой токами высокой частоты / Г.И. Бабат, М.Г. Лозинский // Наркомсредмаш СССР, Центр. дом техники. – М.: Б. и., 1940. - 48 с.
2. *Дзлиев С.В.* Неустойчивость при индукционном нагреве магнитной стали / С.В. Дзлиев, А.А. Завороткин, Д.М. Жнакин, К.Е. Пищалев, Ю.Ю. Перевалов // Индукционный нагрев, 2013. № 1 (23). С. 36-41.
3. *Дзлиев С.В.* Автоколебания при сканирующем индукционном нагреве магнитной стали / С.В. Дзлиев, А.А. Завороткин, Д.М. Жнакин, К.Е. Пищалев, Ю.Ю. Перевалов // Индукционный нагрев, 2013. №2 (24). С. 37-43.
4. *Dzliev S.V., Golubev M.S. , Pishchalev K.E. , Zavorotkin A.A*. 2019 Curie isotherm instability during scanning induction heating of magnetic steel strip *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019* 960-965.
5. *Nemkov V., Goldstein R.* 2017 Striation effect ininduction heating: myths and reality *COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* 36(2) 504-517.
6. *Бабат Г.И.* Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. - М.– Л.: Энергия, 1965. - 552 с.
7. *Лозинский М.Г.* Поверхностная закалка и индукционный нагрев стали. - М.: изд-во и 1-я тип. Машгиза, 1949. - 460 с.
8. *Лозинский М.Г.* Промышленное применение индукционного нагрева / ИМАШ АН СССР. – М.: АН СССР, 1958. - 470 с.
9. *Демидович В.Б.* Численные методы в теории индукционного нагрева / В.Б. Демидович, Ф.В. Чмиленко. - СПб.: Издательство «Технолит», 2008. – 220 с.
10. *Лифшиц Б.Г.* Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лифшиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Линецкий. – М.: «Металлургия», 1980. – 320 с.
11. *Демидович В.Б.* Программное обеспечение для моделирования и расчета индукционных нагревателей / В Б. Демидович, Ф.В. Чмиленко // Индукционный нагрев, 2009. № 3. С. 5-10.
12. *Демидович В.Б.* Семейство программ Indheat - среда для моделирования и разработки индукционных нагревательных устройств / В.Б. Демидович, Ф.В. Чмиленко, В.Г. Скворцов // Индукционный нагрев, 2010. № 2. С. 15-19.

УДК 62-529, 629.359

ШАБАНОВ Д.В.,
КОЗЛОВИЧ А.В.,
ВАЛИЕВ Р.Р.,
КОЧНЕВА О.В.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

МАНЕВРИРОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ КОЛЕСНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ. КРИТЕРИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ В РАМКАХ ЗАДАЧИ СЛЕДОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ (TRAJECTORY TRACKING)

Аннотация. В работе рассматривается проблематика построения систем управления мобильных роботов, работающих в стесненных условиях. Предлагаются подходы решения задачи следования траектории (*trajectory tracking*), учитывающие геометрические особенности робота и перевозимого груза. Для каждого из подходов определяются формализованные критерии регулирования, предлагаются способы реализации систем управления и регуляторов, учитывающих эти критерии. Методики использования предлагаемых подходов разрабатываются на основе результатов имитационного моделирования.

Ключевые слова: колесный мобильный робот, следование траектории, стесненные условия, регулятор, система управления, критерии качества регулирования.

SHABANOV D.V.,
KOZLOVICH A.V.,
VALIEV R.R.,
KOCHNEVA O.V.
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

AUTONOMOUS WHEELED MOBILE ROBOT MANEUVERING IN CONSTRAINT ENVIRONMENT. TRAJECTORY TRACKING QUALITY CRITERIA

Abstract. In this article the problem of control system synthesis for mobile robots operating within constraint environment is considered. The proposed approaches of solving trajectory-tracking problem take into account the geometric features both of the robot and the transported cargo. For each of the approaches formalized tracking quality criteria are determined, methods of implementation of control systems and regulators taking into account these criteria are proposed. Methods of using the proposed approaches based on the results of simulation modeling are developed.

Keywords: wheeled mobile robot, trajectory tracking, constraint environment, regulator, control system, tracking quality criteria.

Сложно представить автоматизацию любых сфер промышленности без самодвижущихся систем. Это может быть как цеховая транспортная система на базе мобильных роботов [1], так и транспортная основа сложного устройства, автономно выполняющего технологические операции. Особо актуальной является автоматизация рабочего процесса в местах, опасных для человека – например, в шахтах и тоннелях [2].

Отличительной особенностью таких мест зачастую являются стесненные условия, что требует индивидуальный подход к решению задачи передвижения.

При рассмотрении транспортных роботов необходимо учитывать, что перевозимый груз может выходить за габариты самого робота и груз может быть не однотипным – один и тот же цеховой робот может перевозить как 6-ти метровый профиль, так и листовой прокат.

Большинство исследований на тему движения роботов при наличии препятствий и возможности столкновения со стенами основаны на корректировке траекторий движения [3], что невозможно применить при наличии препятствий на малом расстоянии от траектории с обеих сторон. А в работах, описывающих другие методы ухода от столкновения, не учитываются геометрические особенности робота и его груза.

На первом этапе рассмотрен частный случай. Аналогично классическим алгоритмам решения задачи следования траектории в качестве аргументов регулятора приняты следующие величины: нормальное отклонение “центральной” точки робота от траектории и отклонение углового положения робота от касательной к траектории в ближайшей точке. Чаще всего коэффициенты, задающие приоритетность этих критериев, задаются единожды. Однако, в случае учета геометрии робота и груза необходимо менять эти коэффициенты в зависимости от текущей ситуации.

Для наглядности целесообразно рассмотреть ситуацию, когда робот прямоугольной формы с двумя приводными колесами проезжает узкий коридор, имея изначальное отклонение от траектории (рис. 1, а). При попытке скорректировать свое положение (рис. 1, б) относительно траектории робот заденет стену. Таким образом, более приоритетным аргументом регулятора является угловое отклонение. Однако, для того же самого робота на участке заезда в такой коридор (рис. 2) будет важнее максимально точно попасть на траекторную линию, чем соблюдать угловое положение.

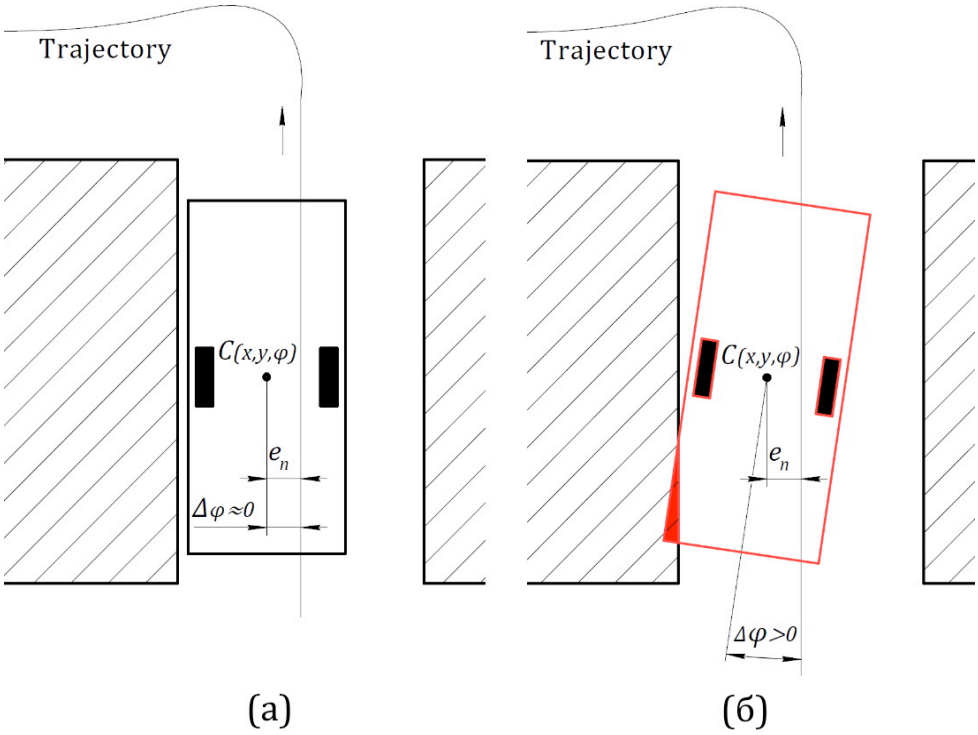


Рисунок 1 – Движение робота в узком проходе:
а) исходное положение; б) попытка приближения к траектории

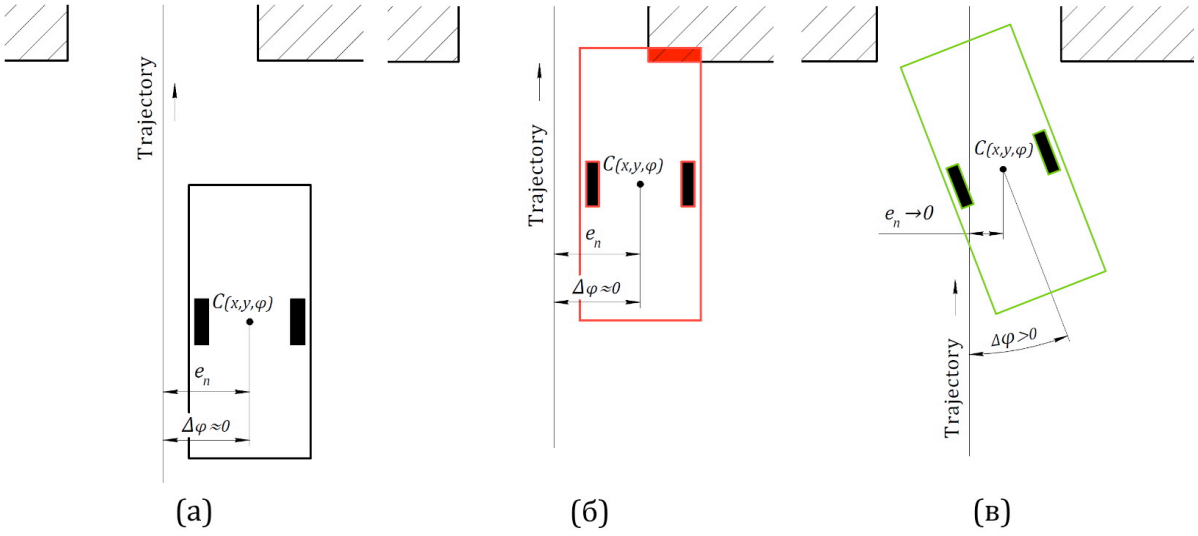


Рисунок 2 – Движение робота при въезде в узкий проход:
а) исходное положение; б) попытка соблюдения углового положения; в) попытка приближения к траектории

Для определения критериев регулирования используются «векторы отклонения точек». Под этим термином понимается вектор, лежащий в плоскости движения робота, исходящий из рассматриваемой геометрической точки робота, характеризующий негативный эффект от текущего положения точки на безопасность и качество прохождения текущего участка траектории. По принципу расположения конечных точек векторов отклонений можно выделить три основных класса:

1) Расположение на траекторной линии – робот стремится занять чем можно меньшее пространство в ширину относительно траекторной линии.

2) Расположение на ближайшем препятствии – робот «сторонится» всех препятствий.

3) Расположение на соответствующей точке виртуального робота – метод аналогичен «Методу Виртуального Робота» [4], но с корректировкой приоритетности аргументов регулятора в зависимости от текущей геометрии робота и груза.

Основываясь на способах задания векторов отклонения точек предложено несколько подходов решения задачи маневрирования в стесненных условиях. Для каждого из них необходимо решить следующие задачи:

– формализировать критерии качества регулирования,

– разработать методику построения систем управления и регуляторов, учитывающих эти критериев,

– провести анализ качества работы системы с помощью имитационного моделирования,

– разработать комплексные методики использования предложенных подходов.

Помимо интерпретирования векторов отклонения точек в вид аргумента функции регулятора можно использовать поиск локального минимума критерия по математической модели (аналогично прогнозному управлению моделью в [5]). Для этого выполняются пробные девиации используемых коэффициентов. Иными словами, в каждый момент времени оценивается при каких численных значений коэффициентов регулирования будет получен более удовлетворительный результат.

В некоторых случаях целесообразно программно вычислять необходимое управляющее воздействие в сило-моментном виде [6]. Векторы отклонения точек интерпретируются в силы, действующие на каждую геометрическую точку робота. Далее, относительно более удобной точки все силы заменяются приведенными силой и моментом. Система управления управляющим воздействием имитирует воздействие на

робота приведенной силы и момента.

Предложенный подход позволяет повысить эффективность применения мобильных роботов при автоматизации технологических процессов. Учет геометрии робота и перевозимого груза позволяет повысить среднюю скорость перемещения и снизить вероятность соударения с препятствиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tzafestas Spyros* Introduction to Mobile Robot Control 2014 ISBN 978-0-12-417049-0.
1. *Corke Peter, Roberts Jonathan, Cunningham Jock, Hainsworth David* 2008 Mining Robotics *Springer Handbook of Robotics* 5 50 1127-1150.
3. *Mylvaganam Thulasi, Sassano Mario* 2018 Autonomous collision avoidance for wheeled mobile robots using a differential game approach *European Journal of Control* 40 53-31.
4. *Abou-Samah Michel* A Kinematically Compatible Framework for Collaboration of Multiple Nonholonomic Wheeled Mobile Robots - 2001.
5. *Mhuammad Adil, Ahsan Ali, Muhammad Choudhry A.* 2015 Obstacle avoidance and control of Swedish wheeled mobile robot *Journal of Electrical Engineering* 15(1) 70-77.
6. *Klančar Gregor, Matko Drago, Blazic Saso* 2009 Wheeled Mobile Robots Control in a Linear Platoon *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 709-731.

УДК 62-523.2

ШКЛЯРСКИЙ А.Я.,
ЛУТОНИН А.С.
Санкт-Петербургский Горный университет

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВСТРОЕННЫМИ В РОТОР ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ

Аннотация. Исследуются зависимости влияния параметров синхронного двигателя с встроенными в ротор постоянными магнитами на его механическую характеристику. Приведена методика расчета механической характеристики. Приведены результирующие семейства графиков. Выполнен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: синхронный; двигатель; постоянные магниты, СДПМ, СДПМВ, встроенные магниты; механическая характеристика; ослабленное поле.

SHKLYARSKIY A.Y.
LUTONINA.S.
Saint-Petersburg Mining university

INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR'S PARAMETERS INFLUENCE ON ITS MECHANICAL CHARACTERISTICS

Abstract. Interior permanent magnet synchronous motor's parameters influence on its mechanical characteristics are investigated. The methodology for calculating the mechanical characteristics is given. The resulting calculated graphs are given. The results analysis is obtained.

Keywords: IPM, permanent, magnet, synchronous, motor, interior, mechanical characteristics, torque-speed curve, field weakening, parameters change.

При проектировании различных систем, в составе которых используется электродвигатель, одним из важнейших пунктов является достижение соответствия характеристикэлектродвигателя условиям его эксплуатации. На данный момент существует множество подходов к проектированию электродвигателя в соответствии с необходимыми электрическими, механическими и массогабаритными параметрами [0, 0, 3]. Однако, использование этих методов долгий и трудоемкий процесс, который может занять продолжительное время. В условиях, когда первоначальной целью является разработка алгоритмов управления электроприводом и где нет необходимости в использовании его точной модели, выбор электродвигателя на основе корректировки параметров уже существующих серийных электромоторов является наиболее быстрым решением.

В устройствах, где мотору необходимо работать в широком диапазоне скоростей и где вес тягового агрегата существенно влияет на работу системы, наиболее целесообразноиспользовать синхронный двигатель с встроенными в ротор постоянными магнитами, так как, в сравнении с асинхронным электродвигателем [0, 0], он обладает наиболее высоким КПД и лучшим соотношением веса мотора к его номинальной мощности, а в сравнении с синхронным двигателем с постоянными магнитами, установленными на поверхности ротора, имеет более широкий диапазон регулирования скорости [0, 0].

Основными параметрами синхронного двигателя с встроенными в ротор постоянными магнитами (СДПМВ) относительно вращающейся системы координат dq являются:

1) R – Сопротивление обмоток статора (Ом),

2) L_d – Индуктивность обмоток статора по во вращающейся системе координат по оси d (Гн),

3) L_q – Индуктивность обмоток статора по во вращающейся системе координат по оси q (Гн),

4) ψ_{pm} – Магнитный поток постоянных магнитов (Вб),

5) p – Число пар полюсов электродвигателя (-),

6) $U_{\max}$ – Максимально допустимое значение уровня напряжения электродвигателя (В),

7) $I_{\max}$ – Максимально допустимое значение уровня тока электродвигателя (А).

Уравнения для СДПМВ относительно вращающейся системы координат d-q согласно [0, 0] может быть представлена как:

$$U_d(t) = R \cdot I_d(t) + L_d \frac{dI_d(t)}{dt} - \omega_{me}(t) \cdot L_q \cdot I_q(t), \quad (7)$$

$$U_q(t) = R \cdot I_q(t) + L_q \frac{dI_q(t)}{dt} - \omega_{me}(t) \cdot L_d \cdot I_d(t) + \omega_{me}(t) \cdot \psi_{pm}, \quad (8)$$

$$T_e(t) = \frac{3}{2} p \cdot \left(\psi_{pm} + \left(L_d - L_q\right) \cdot I_d(t)\right) \cdot I_q(t), \quad (9)$$

$$\omega_{me}(t) = \frac{U_{max}}{\sqrt{\left(L_q \cdot I_q(t)\right)^2 + \left(\psi_{pm} + L_d \cdot I_d(t)\right)^2}}, \quad (10)$$

где $U_d(t)$ – напряжение относительно оси d; $U_q(t)$ – напряжение относительно оси q; ω_{me} – скорость электродвигателя; $I_d(t)$ – ток относительно оси d; $I_q(t)$ – ток относительно оси q; $T_e(t)$ – момент на валу двигателя;

Согласно [0], в зависимости от заданной скорости, режим работы СДПМВ (рис. 1) можно разделить на две части: работа при скоростях от 0 до номинального значения (номинальный режим) и работа при скоростях выше номинальных значений (режим ослабленного поля).

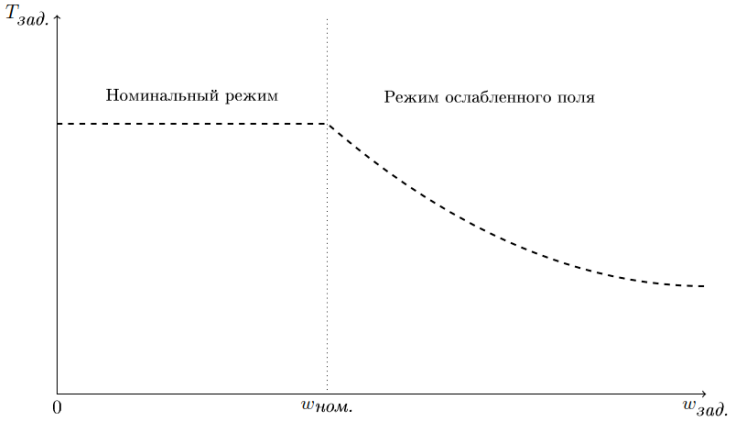


Рисунок 1 - Механическая характеристика СДПМВ

Согласно [0] крутящий момент в зависимости от заданной скорости в режиме

ослабленного поля может быть найден как тангенциальное пересечение кривых напряжения и момента, построенных относительно токов во вращающейся системе координат d-q:

$$T_{\tan} = \sqrt{\frac{-\delta + \sqrt{\delta^2 - 4\zeta\sigma}}{2\zeta}}, \tag{11}$$

$$\zeta = 4096\omega_{em}^8 L_d^4 L_q^4 \left(L_d - L_q\right)^2, \tag{12}$$

$$\begin{aligned}\delta = -144 p^2 \omega_{em}^4 L_d^2 L_q^2 \left(-\psi_{pm}^4 \omega_{em}^4 L_q^4 + 20\psi_{pm}^2 \omega_e^2 U_{\max}^2 L_d^2 L_q^2 8U_{\max}^4 L_d^4 - 32U_{\max}^4 L_d^3 L_q + 48U_{\max}^4 L_d^2 L_q^2\right. \\ \left. -32U_{\max}^4 L_d L_q^3 - 40\psi_{pm}^2 \omega_{em}^2 U_{\max}^2 L_d L_q^3 + 20\psi_{pm}^2 \omega_{em}^2 U_{\max}^2 L_q^4 + 8U_{\max}^4 L_q^4\right)\end{aligned} \tag{13}$$

$$\sigma = 81 p^4 U_{\max}^2 \left(U_{\max} L_d - \omega_{em}\psi_{pm} L_q - U_{\max} L_q\right)^3 \left(U_{\max} L_d + \omega_e \psi_m L_q - U_{\max} L_q\right)^3. \tag{14}$$

Номинальные значения момента и скорости СДПМВ могут быть найдены посредством нахождения точки пересечения кривой МТРА с кругом ограничения по максимально допустимому току, построенных относительно токов во вращающейся системе координат d-q. Токи для этой точки могут быть выражены согласно уравнениям (9-10):

$$I_q = \frac{\sqrt{4\psi_{pm}\sqrt{\psi_{pm}^2 + 8I_{\max}^2\left(L_d - L_q\right)^2} - 4\psi_{pm}^2 + 16I_{\max}^2\left(L_d - L_q\right)^2}}{4\left(L_d - L_q\right)}, \tag{15}$$

$$I_d = \sqrt{I_{\max}^2 - I_q^2}. \tag{16}$$

Подставив полученные из уравнений (9-10) токи в уравнения для нахождения крутящего момента (3) и скорости (4), получим номинальные их значения.
Ниже представлены семейство графиков (рис. 2).

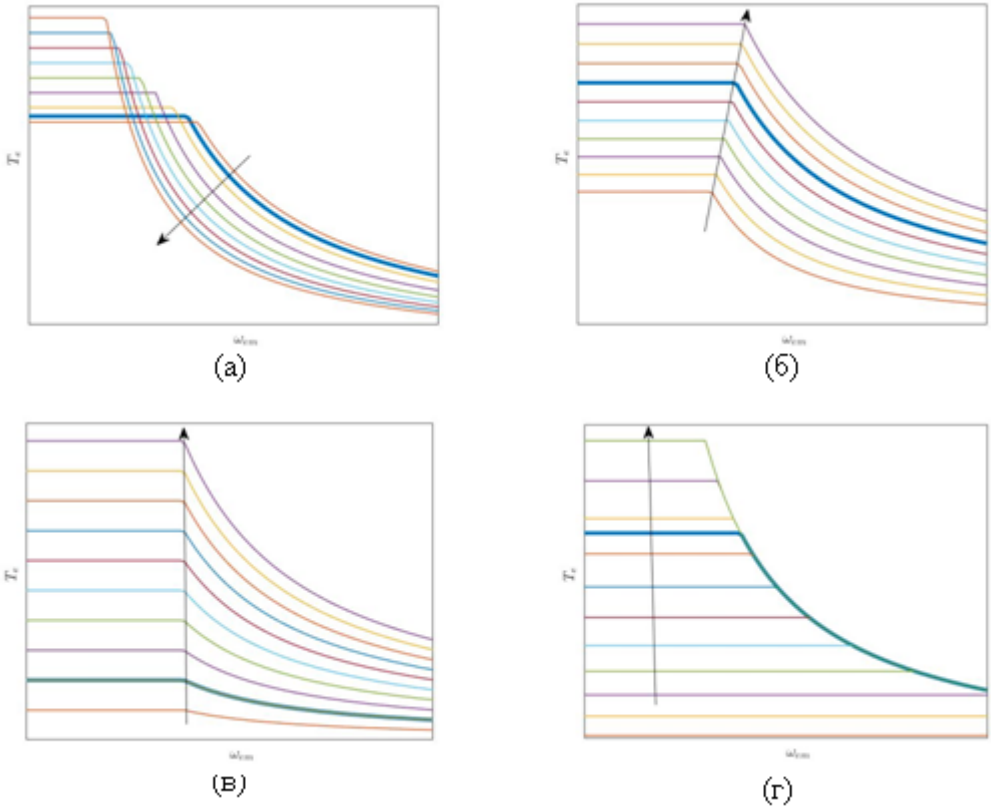


Рисунок 2 - Влияние изменения параметров электродвигателя на его механическую характеристику

На рис. 2 приведены результаты расчета кривой механической характеристики в зависимости от изменения параметров. Стрелка указывает направление увеличения соответствующего параметра:

1) Увеличение значения индуктивности по оси q при неизменном соотношении L_d / L_q,
2) Увеличение значения магнитного потока постоянных магнитов,
3) Увеличение числа пар полюсов ротора,
4) Увеличение максимально допустимого тока.

Из приведенных графиков видно, что увеличение значения индуктивности по оси q при неизменном соотношении L_d / L_q ведет к смещению механической характеристики в сторону увеличения момента и снижении значения номинальной скорости при неизменной результирующей мощности.

Увеличение значения магнитного потока постоянных магнитов ведет как к увеличению номинальной скорости электродвигателя, так и к увеличению номинальной мощности, что ведет в повышению результирующей мощности электродвигателя.

Увеличение числа пар полюсов ротора приводит к увеличению моента на валу двигателя при неизменном значении номинальной скорости электродвигателя и приводит к повышению результирующей мощности.

Увеличение значение максимально допустимого тока приводит к увеличению момента и результирующей мощности электродвигателя в зоне от 0 до номинальной скорости, при этом сохраняя неизменным значение результирующей мощности в зоне ослабленного поля.

Таким образом, в случае необходимости изменения параметров серийного СДПМВ для отладки моделей систем управления, корректировка вышеперечисленными способами позволит добиться достижения ихтребуемых значений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pechlivanidou M.C., Chasiotis I.D., Karnavas Y.L.* 2019 A comparative study on 2D and 3D magnetic field analysis of permanent magnet synchronous motor using FEM simulations *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 33(17) 2215-2241.
2. *Jabbar M.A., Liu Z., Dong J.* 2003 Time-stepping finite-element analysis for the dynamic performance of a permanent magnet synchronous motor *IEEE transactions on magnetics* 39(5) 2621-2623.
3. *Saadoun A., Amirat Y.* 2013 Validation of a PMSM model based on static and transient FEM *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. – IEEE, 2013* 1130-1134.
4. *Sarac V., Iliev D.* 2017 Synchronous Motor of Permanent Magnet compared to Asynchronous Induction Motor *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)* 65(7) 51-58.
5. *Pellegrino G. et al.* 2012 Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples *IEEE Transactions on industry applications* 48(6) 2322-2332.
6. *Kim T.J. et al.* 2001 Comparison of dynamic responses for IPM and SPM motors by considering mechanical and magnetic coupling *IEEE Transactions on Magnetics* 37(4) 2818-2820.
7. *Ogbuka C., Nwosu C., Agu M.* 2016 Dynamic and steady state performance comparison of line-start permanent magnet synchronous motors with interior and surface rotor magnets *Archives of Electrical Engineering* 65(1) 105-116.
8. *Mukti E.W. et al.* 2017 Field oriented control design of inset rotor PMSM drive *AIP Conference Proceedings*. *– AIP Publishing LLC* 1855(1) 020010.
9. *Wang M.S., Hsieh M.F., Lin H.Y.* 2018 Operational Improvement of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Fuzzy Field-Weakening Control *Electronics* 7(12) 452.

10. *Li M., He J., Demerdash N.A.O.* 2014 A flux-weakening control approach for interior permanent magnet synchronous motors based on Z-source inverters *2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – IEEE, 2014* 1-6.
11. *Jung S.Y., Hong J., Nam K.* 2013 Current minimizing torque control of the IPMSM using Ferrari's method *IEEE Transactions on Power Electronics* 28(12) 5603-5617.
12. *Murashov, I., Frolov, V., Kadyrov, A.* Development of the arc plasma torch operation mathematical model for spheroidization of fine-dispersed powders // 2018, Journal of Physics: Conference Series, 1058(1), 012024.
13. *Frolov, V.Y., Kvashnin, A.O., Murashov, I.V.* Nonstationary mathematical model of a magnetic arc blast system. Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus.
14. *Vostrov, K., Frolov, V., Safonov, E.* Development of current limiting device for short and autonomous networks // 22nd Symposium on Physics of Switching Arc, 2017-September, c. 182-185.
15. *Chusov, A., Podporkin, G., Pinchuk, M., Murashov, I., Frolov, V.*Development of a physical 2-D model for arc quenching chamber of lightning protection multichamber systems. 2016 33rd International Conference on Lightning Protection, ICLP 2016, 7791509.
16. *Obraztsov, N.V., Subbotin, D.I., Popov, V.E., Frolov, V.Y., Surov, A.V.* Modelling of heating of plasma-chemical reactor in Comsol Multiphysics // 2018 Journal of Physics: Conference Series, 1038(1), 012137.

УДК 621.311

ШКЛЯРСКИЙ Я.Э.,
БАТУЕВА Д.Е.
Санкт-Петербургский горный университет

АНАЛИЗ ГРАФИКОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ВЫБОРА СОСТАВА ГЕНЕРАЦИИ В ВЕТРОДИЗЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

Аннотация. Энергопотребление поселков в Артике характеризуется преимущественно бытовыми потребителями. График нагрузки таких потребителей имеет характерную форму и определяется отопительным сезоном в зимний период и резким изменением внешних климатических условий в весенний и осенний периоды. В статье анализируются графики нагрузки поселка на территории Арктики, максимальное среднее потребление которого составляет 369 кВт в январе-феврале. Исследуются такие показатели графиков нагрузок, как средняя нагрузка, среднеквадратичная нагрузка, дисперсия графика нагрузки и среднеквадратическое отклонение нагрузки от средней. В результате было выявлено, что среднеквадратическое отклонение нагрузки имеет большие значения именно в зимние месяцы и весенне-осенний период, когда энергопотребление существенно изменяется, и, следовательно, данный показатель необходимо учитывать при выборе состава генерации в ветродизельном комплексе.

Ключевые слова: график нагрузок; показатели нагрузки; ветродизельный комплекс.

SHKLYARSKIY J.E.,
BATUEVA D.E.
Saint-Petersburg Mining University

ANALYSIS OF SCHEDULES AND LOAD INDICATORS FOR THE NEXT CHOICE OF THE GENERATION COMPOSITION IN THE WIND-DIESEL COMPLEX

Abstract. The energy consumption of villages in the Arctic is characterized mainly by household consumers. The load schedule of such consumers has a characteristic shape and is determined by the heating season in the winter and a sharp change in external climatic conditions in the spring and autumn. The load graphs of a village in the Arctic are analyzed in an article whose maximum average consumption is 369 kW in January-February. We study such indicators of load graphs as average load, rms load, variance of the load graph and standard deviation of the load from the average. As a result, it was found that the standard deviation of the load has large values precisely in the winter months and the spring-autumn period, when energy consumption changes significantly, and, therefore, this indicator must be taken into account when choosing the composition of the generation in the wind-diesel complex.

Keywords: load schedule; load indicators; wind-diesel complex.

Электроснабжение объектов в Арктике осуществляется преимущественно изолированно от Единой энергосистемы России. Источником электроснабжения являются дизель-генераторные установки, однако всё чаще в научном сообществе обсуждается вопрос об использовании ветроэнергетических установок (ВЭУ) в качестве основного источника электроснабжения для этих территорий, что позволит сократить объемы завоза дизельного топлива и снизить влияние выбросов парниковых газов на окружающую среду [1-4]. На данный момент такие установки работают всего на нескольких объектах (пос. Тикси, Мурманская обл.), а их производителями являются иностранные компании. Но

стоит отметить, что исследования в области применения ВЭУ на территории Арктики, а особенно в прибрежных районах, крайне востребованы [5].

Климатические условия на этих территориях носят резкопеременный характер, скорость ветра практически всегда является достаточной для работы ВЭУ (минимум 3-5 м/с в зависимости от региона), также необходимо рассматривать возможность аккумулирования избыточной электроэнергии [6].

Основными потребителями электроэнергии на территории Арктики являются либо крупные промышленные комплексы, такие как завод Ямал-СПГ, добыча нефти на шельфе и другие, но анализ их энергопотребления не является задачей данного исследования, либо это небольшие поселения со слабо и умеренно развитым производством. Такие объекты имеют характерные графики нагрузок, так, зимой потребление вырастает, так как используются обогревательные установки, летом потребление электроэнергии меньше, но это времена года длится на территории Арктики всего лишь с конца июня до начала августа. В весенний и осенний периоды энергопотребление существенно изменяется в связи с резкими климатическими изменениями. Также существует рост электропотребления в праздничные и выходные дни. Данные закономерности являются базовыми для данных групп потребителей, однако должны быть исследованы более точно на конкретном объекте при прогнозировании энергопотребления [7-11].

Целью данного исследования является изучение и анализ графиков и показателей нагрузки, которые повлияют в последующем на выбор состава генерирующего оборудования в ветродизельном комплексе для электроснабжения поселков с бытовыми потребителями.

Анализ графиков нагрузок показал, что среднее значение электрической нагрузки в исследуемом поселке на территории Арктики варьируется от 209 кВт (июль) до 336 кВт (январь), а максимальное и минимальное ее значение приходится соответственно на январь-февраль (369 кВт) и июль (201 кВт). Типовые графики для февраля и июля приведены на рис. 1 и 2:

Продолжив анализировать графики нагрузок, были выделены характерные базовая (желтым), пиковая (оранжевым) и полупиковая (зеленым) зоны, что позволяет характеризовать скорость изменения потребления, которая будет являться не резкой, тогда как длительность пиковых зон составляет от 2 до 4 часов в сутки; форма графиков зимой имеет более заметную пиковую зону в связи с включением отопительных приборов, мощность по сравнению с летним периодом увеличивается в 1,5 раза.

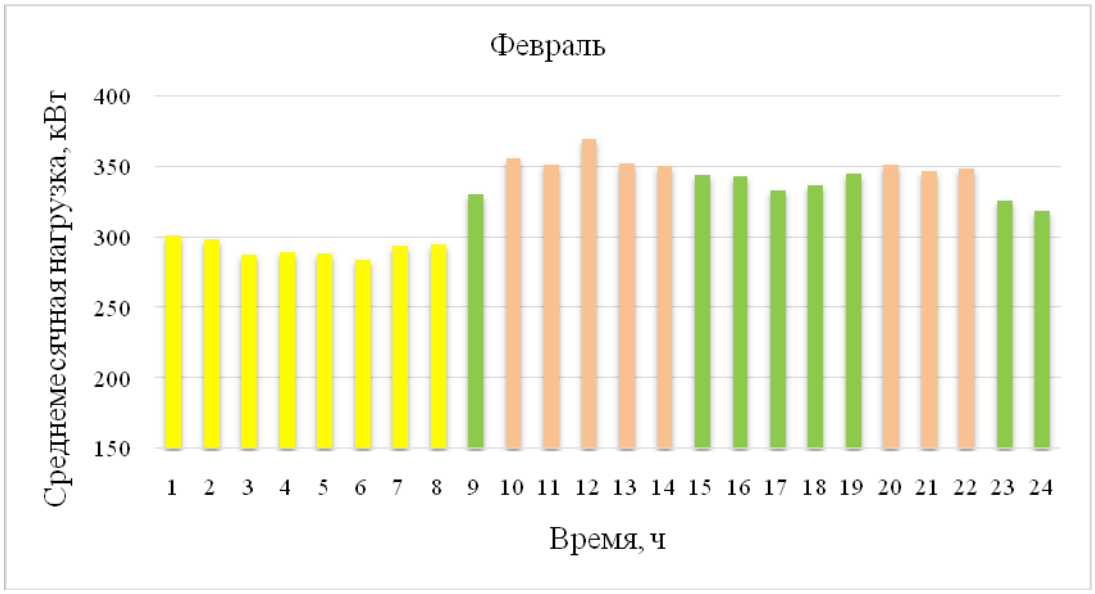


Рисунок 1 - Суточная потребляемая мощность электрической нагрузки для февраля

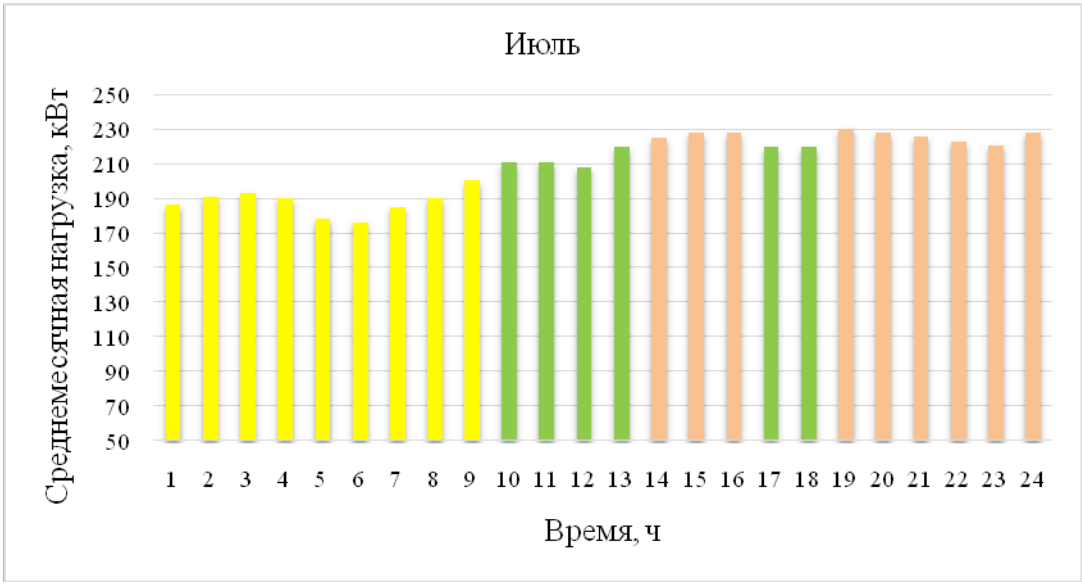


Рисунок 2 - Суточная потребляемая мощность электрической нагрузки для июля

Важнейшими вероятностями характеристиками случайного процесса электрической нагрузки являются функция распределения, плотность распределения и дисперсия мощности для каждого момента времени.

Для ступенчатого графика средняя нагрузка рассчитывается по формуле 1:

$$P_{ср} = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} P_i t_i, \quad (1)$$

где T – рассматриваемый период времени, t_i – длительность участка с мощностью P_i.

Среднеквадратичная нагрузка рассчитывается по формуле 2:

$$P_э = \sqrt{\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} {P_i}^2 t_i}, \quad (2)$$

Дисперсия графика нагрузки рассчитывается по формуле 3:

$$D_P = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(P_i - P_{ср}\right)^2, \quad (3)$$

Среднеквадратическое отклонение нагрузки от средней рассчитывается по формуле 4:

$$\sigma = \sqrt{D_P}, \quad (4)$$

Рассчитанные показатели по формулам (1-4) на основе усредненных данных за каждый месяц представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Данные расчета средней нагрузки, среднеквадратичной нагрузки, дисперсии графика нагрузки и среднеквадратического отклонения нагрузки от средней

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_{ср}$	350,1	339,0	310,3	275,9	273,5	234,3	216,8	327,5	271,7	315,3	324,8	353,3
$P_э$	344,5	333,3	304,5	271,1	268,8	230,2	213,2	322,8	267,0	310,1	319,4	347,5
D_P	1 262,7	961,2	480,1	595,5	577,0	387,9	437,7	1 464,2	563,6	972,4	934,5	1 201,0
σ	35,5	31,0	21,9	24,4	24,0	19,7	20,9	38,3	23,7	31,2	30,6	34,7

Дисперсия является важным признаком при выборе состава генерирующего оборудования, она показывает насколько в среднем отклоняются средние значения по выборке (средний квадрат отклонений значений энергопотребления мощности от их средней величины в исследуемом диапазоне времени).

Также видно, что среднеквадратическое отклонение нагрузки, показывающее реальное среднее значение отклонений от среднего значения по выборке, больше именно в зимние месяцы и весенне-осенний период, когда энергопотребление существенно

изменяется ввиду резких изменений внешних климатических условий. Данный показатель необходимо учитывать при выборе состава генерации в ветродизельном комплексе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефремов Э.И.* Направления формирования электроэнергетической инфраструктуры в Арктической зоне республики Саха (Якутия) / Экономика и управление, 2013. №25 (304).
2. *Попель А.С.* Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения потребителей в Арктической зоне Российской Федерации / А.С. Попель, С.В. Киселева, М.О. Моргунова // Арктика: экология и экономика, 2015. № 1. С. 64 – 69.
3. *Blaabjerg F., Yang Y., Yang D. and Wang X.* 2017 Distributed Power-Generation Systems and Protection / F. Blaabjerg, *Proceedings of the IEEE* 105( )7.
4. *Sosnina E.N., Kechkin A.Yu., Filatov D.A.* Power supply issues for consumers remote from the network infrastructure *Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University* 5 (107).
5. *Бердин В.Х.* Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики / В.Х. Бердин, А.О. Кокорин, Г.М. Юлкин, М.А. Юлкин. - М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017.
6. *Vasilkov O.S., Dobysh V.S.* 2019 Features of Application Hybrid Energy Storage in Power Supply Systems 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) 728-730.
7. *Gavrilas M., Member S., Ivanov O., Gavrilas G.* 2014 Customer Classification and Load Profiling using Data from Smart Meters *12th Symp. Neural Netw. Appl. Electr. Eng*. 1-6.
8. *Mat A.* 2016 A hybrid integrated architecture for energy consumption prediction *Future Generation Computer Systems* 63 C 131-147.
9. *Mustapha M., Mustafa M.W., Khalid S.N., Abubakar I. and Shareef H.* 2015 Classification of electricity load forecasting based on the factors influencing the load consumption and methods used: An-overview *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)* 442-447.
10. *Ummuhan B.F., Gerek O.N., Kurban M.* 2011 A novel modeling approach for hourly forecasting of long-term electric energy demand *Energy Convers. Manag.* 52 199-211.
11. *Zhu J.* 2013 The Optimization Selection of Correlative Factors for Long-Term Power Load Forecasting *IEEE 5th Internatinal Conf. Human-Machine Sys. Cybern.* 1 241-244.

УДК 004.032.22

ШПЕНСТ В.А.
Санкт-Петербургский горный университет

КОМПЛЕКСНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ШАХТЫ (ПОДЗЕМНОГО СООРУЖЕНИЯ) НА ОСНОВЕ PLC ТЕХНОЛОГИИ

Аннотация. В данной статье рассматривается одно из современных направлений развития телекоммуникационных систем в составе электротехнических комплексов подземных сооружений – PLC технологии комплексирования электротехнических систем. Приведено описание основного инструмента экспериментальных исследований данных систем-имитационной модели функционирования, ее структура, последовательность разработки и основные ее элементы.

Ключевые слова: телекоммуникации; электротехнический комплекс; PLC; электроснабжение; имитационное моделирование.

SHPENST V.A.
Saint-Petersburg Mining University

SIMULATION MODEL OF FUNCTIONINGMINE TELECOMMUNICATION SYSTEM(UNDERGROUND CONSTRUCTION) BASED ON PLC TECHNOLOGY

Abstract. This article describes one of the modern trends in the development of telecommunication systems as part of the electrical complexes of underground structures - PLC technology for the integration of electrical systems. A description is given of the main tool for experimental research of these systems-simulation models of functioning, its structure, development sequence and its main elements.

Keywords: telecommunications; electrical complex; PLC; power supply; simulation modeling.

Одним из возможных направлений дальнейшего совершенствования телекоммуникационных систем в шахтах и подземных сооружениях может явиться их комплексирование с системами электроснабжения. Передача какой-либо информации и осуществление электроснабжения по общим проводным каналам уже сейчас эффективно осуществляется в различных технологических приложениях. Следует также отметить, что встречаются ситуации, когда осуществление прокладки новых кабелей, либо очень нежелательно, либо даже не представляется возможным. В таких случаях практически всегда есть возможность ограничиться существующей электоинфраструктурой, а именно воспользоваться имеющейся проводной сетью системы электроснабжения для организации достаточно скоростного и устойчивого канала передачи информации, разветвленного по всему сооружению.

В качестве основного инструмента экспериментальных исследований и механизма принятия решений в данном направлении предлагается использовать имитационную модель комбинированной системы телекоммуникации и электроснабжения шахты (подземного сооружения). Разработанная модель позволит решать широкий спектр задач в процессе исследования как систем телекоммуникаций, так и систем электроснабжения. Построение моделиосуществлялось в следующей последовательности:

1. Формулировка комплекса задач исследования;
2. Построение концептуальной модели;

3. Формирование комплекса требований к моделирующей программе;
4. Построение математической модели;
5. Разработка моделирующей программы (моделирующего алгоритма);
6. Проверка работы (верификация) имитационной модели;
7. Оценка пригодности имитационной модели.

Исходя из предлагаемого состава PLC-сети, модель комплексирования систем электроснабжения и телекоммуникации подземных сооружений будет включать: перечень решаемых задач, модуль генерирования информации, модуль подключения, модуль линии передачи, модуль модуляции, кодирования и декодирования, модуль обработки информации и помехоподавления, абонентский модуль и модуль оценки характеристик (рис. 1).

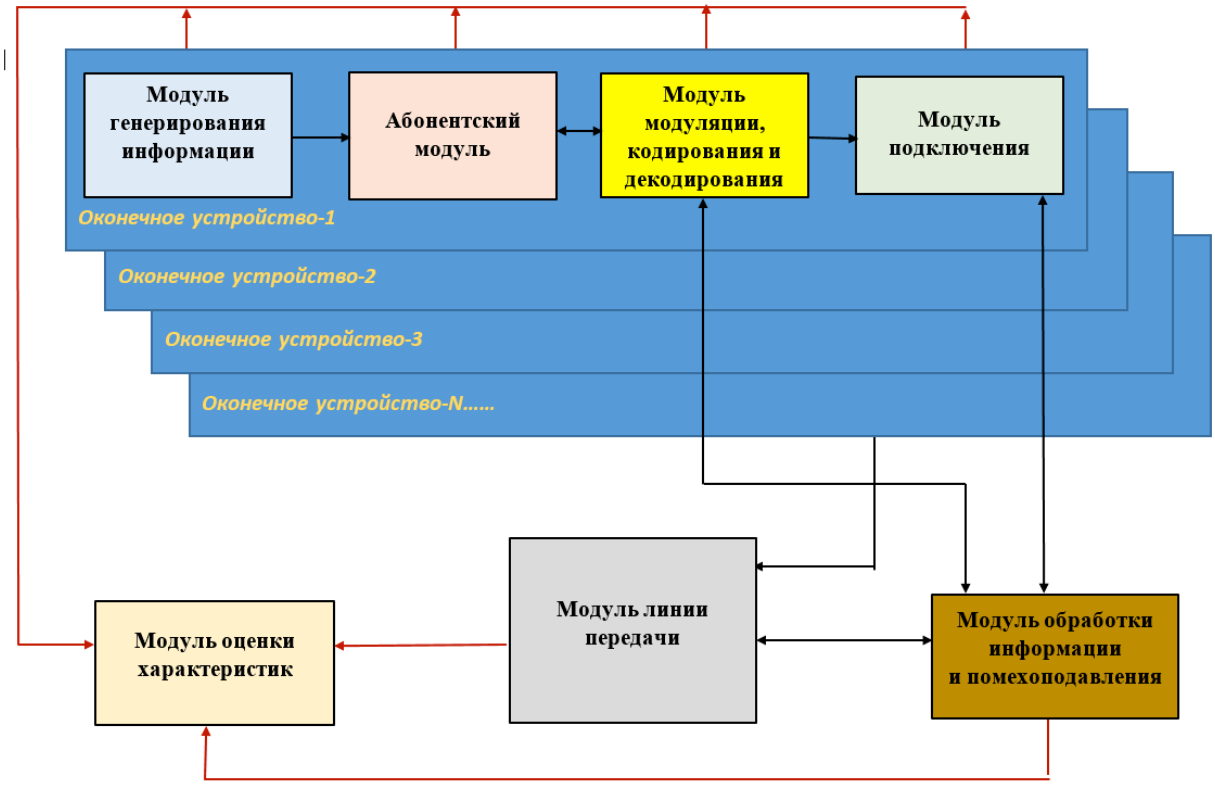


Рисунок 1 - Имитационная модель комплексирования систем электроснабжения и телекоммуникации шахт (подземных сооружений)

Модуль генерирования информации. Обеспечивает имитационное моделирование информационных потоков, в соответствии с принятыми протоколами, а также наложение помеховой электромагнитной обстановки.

Модуль подключения. Формирует алгоритмы преобразования передаваемых сигналов при индуктивном ответвлении сотдельными фазными проводами в распределительных кабелях шахты, при ответвлении в гнездо или из гнезда с низким напряжением, при ответвлении в заземление кабеля по отношению к местному заземлению, при беспроводном ответвлении на кабель или от кабеля и при индуктивном ответвлениирадиочастоты (RF) по всему высоковольтному кабелю или от него.

Модуль линии передачи. Реализует алгоритмы прохождения сигналов через элементы системы электроснабжения (электропроводку, скрутки, разветвитель, устройства фазового сопряжения, щиты распределения электропитания, вторичные распределительные панели, автоматы электрозащиты, автоматические выключатели и электрические розетки, заземление).

Модуль модуляции, кодирования и декодирования. Содержит алгоритмы работы электрического модема-дешифратора, содержащего, как правило, контроллер сетевого и канального уровня, трансивер, усилитель и изолирующий тракт.

Абонентский модуль. Обеспечивает формирования принимаемых и передаваемых сигналов абонентских устройств, взаимодействующих через PLC-сеть (контроллеры вентиляторов, датчиков, системы связи и т.п.) в соответствии с реализуемыми протоколами.

Модуль обработки информации и помехоподавления. Реализует алгоритмы обработки циркулирующей в PLC-сети информации в целях осуществления задач помехоподавления и контроля целостности данных. PLC-системы, ориентированные на решение задач широкополосного абонентского доступа, в основном используют две технологии. В первой применяется сигнал с т.н. расширением спектра (spread spectrum - SS), существенно повышающий помехоустойчивость передачи. При использовании SS-модуляции мощность сигнала распределяется в широкой полосе частот, и сигнал становится незаметным на фоне помех. На принимающей стороне значимая информация выделяется из шумоподобного сигнала с использованием уникальной для данного сигнала псевдослучайной кодовой последовательности. С помощью различных кодов можно осуществлять передачу сразу нескольких сообщений в одной широкой полосе частот. Описанный принцип лежит в основе метода множественного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA). Отметим, что помимо помехоустойчивости SS-модуляция обеспечивает высокий уровень защиты информации. В качестве базовой используется QPSK-модуляция. Вторая технология основана на ортогональном частотном уплотнении с одновременной передачей сигналов на нескольких несущих (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplex). Этот метод также гарантирует высокую достоверность передачи и устойчивость к искажениям сигнала. Следует также отметить, что рассматривалась PLC-система, которая реализует принцип множественного доступа «точка - множество точек». Например, локальная трансформаторная подстанция поставляет определенному числу объектов шахты (сооружения) электроэнергию и, одновременно, обеспечивает подключенным абонентамдоступ к сети, связи и др.

Модуль оценки характеристик. Обеспечивает сбор параметров и характеристик передаваемых и принимаемых сигналов во всех точках сети с целью получения оценок исследуемых решений.

Программная реализация модели осуществлена на языке C++ с применением системы JBuilder компании Embarcadero версии 10.3. В результате чего получена функционально завершенная программа, позволяющая решать практически все задачи исследования медодом имитационного моделирования. Верификация имитационной модели сводилась к реализации в этой модели начальных состояний и условий функционирования абстрактной системы и к сопоставлению получаемых затем результатов моделирования с ожидаемыми результатами, т.е. путем решения ряда контрольных примеров, за счет чего осуществлена отладка программы. Для оценки пригодности модели планируется в следующем году проведение ряда экспериментов на реальных системах электроснабжения шахт компании «Уралкалий» и шахты «Воргашерская» с применением телекоммуникационного оборудования компании NI. Также следует отметить, что имитационная модель такого типа создается **впервые** и подана заявка на ее регистрацию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ваганов В.С., Гоффарт Т.В., Дубков И.С.* Развитие мобильных устройств в составе компьютерных сетей угольных шахт / Горная Промышленность, 2018. №1 (137).
URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-mobilnyh-ustroystv-v-sostave-kompyuternyh-setey-ugolnyh-shaht.

2. *Охрименко В.* PLC-технологии / Электронные компоненты, 2009. № 10.
3. *Верхулевский К.* Передача информации по сетям электропитания с помощью ис компании semtech / Компоненты и технологии, 2015. № 11 (172). С. 50-54.
4. *Hrasnica H., Haidine A., Lehnert R.* Broadband Power-line Communications Networks, John Willey & Sons, 2004.
5. *Невструев И.А., Арсеньев А.В.* Построение сетей доступа передачи информации по электрическим сетям / Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2007. Т. 3. № 3. С. 12-19.
6. *Бабенко А.Г., Лапин С.Э., Вильгельм А.В., Оржеховский С.М.* Принципы построения многофункциональных систем безопасности угольных шахт, опыт и перспективы их использования в Кузбассе / Безопасность труда в промышленности, 2011. №1, С. 16.
7. *Зубов В.П.*. Состояние и направления совершенствования систем разработки угольных пластов на перспективных угольных шахтах Кузбасса / Записки Горного института**,** 2017. [S.l.], Т. 225, С. 292.
8. *Грачев А.Ю., Новиков А.В., Паневников К.В., Терехов Д.Б.* МФСБ в угольной шахте – позиционирование и оповещение персонала, 2016. С. 121.
9. *Ваганов В.С.* Многофункциональные системы безопасности, применяемые при производстве горных работ / Горная Промышленность, 2014. №3 (115). С. 25.
10. Centers for Disease Control and Prevention, NIOSH, Mining, Advanced Tutorial on Wireless Communication and Electronic Tracking: Electronic Tracking Systems Performance, 3.0 Electronic Tracking Systems Performance, 2013
https://www.cdc.gov/niosh/mining/content/emergencymanagementandresponse
/commtracking/advcommtrackingtutorial2.html.
11. PBE&MRS, Решения для горнодобывающей промышленности, 2016.
http://www.mineradio.ru/under_doc.php?lng=ru.
12. WiPAN краткое описание системы. DavisDerby. 2016.
www.davisderby.com.
13. Система газоаналитическая шахтная многофункциональная «Микон III», ИГТ.071000.100.00 РЭ, Руководство по эксплуатации, (ООО «Информационные горные технологии»), 2010.
14. Cisco Connected Mining, 2016.
https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/industries/automotive/docs/connected_mining_at-a-glance. pdf.
15. Приказ Министерства связи и массовых коммуникаций РФ от 14 сентября 2010 г. № 124 «Об утверждении Правил применения оборудования радиодоступа. Часть I. Правила применения оборудования радиодоступа для беспроводной передачи данных в диапазоне от 30 МГц до 66 ГГц» (зарегистрировано в Минюсте РФ 12.10.2010 № 18695).
16. *Гайкович Г.Ф.* Стандартизация в области промышленных сетей. Развитие беспроводных стандартов для АСУ ТП / Электронные компоненты, 2009. №1, С. 48.
17. Система многофункциональной связи «исеть» (смс «исеть»). Руководство по эксплуатации. ИМ.091000.001.00 РЭ ООО «ИНТЕЛМАЙН». – Екатеринбург, 2014.

СЕКЦИЯ 5.
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ, МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, ОЦЕНКА КАЧЕСТВА

УДК 621.926.000.00

БОРИСОВ С.В.,
ВЫБОЛДИН Ю.К.
Санкт-Петербургский горный университет

МЕТОДИКА ВЫБОРА МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО ПОДПОВЕРХНОСТНОГО РАДАРА

Аннотация. Решение задачи оценивания вероятностных характеристик отраженных сигналов в георадиолокации позволяет реализовать синтез решающих статистических правил в задачах обнаружения и распознавания подповерхностных объектов. Соответствующие математические модели распределений предпочтительнее иметь в виде многопараметрических вероятностных распределений. В частности, значения коэффициентов асимметрии и эксцесса распределений, полученных экспериментальным путем для случая широкополосного зондирования, занимают значительные области на диаграмме Пирсона для вероятностных распределений. Полученные при этом многопараметрические распределения вероятностей позволяют аппроксимировать в одном выражении несколько законов распределения вероятностей. Показано, что предложенная методика выбора статистической модели отраженных сигналов активного подповерхностного локатора на основании оценок вероятностных характеристик флуктуаций отраженного сигнала позволяет оценить вид и параметры его вероятностного распределения.

Ключевые слова: аппроксимация, распределения Пирсона, георадар.

BORISOV S.V.,
VYBOLDIN YU.K.
Saint-Petersburg Mining University

METHOD OF SELECTING A WIDE BAND SUBSURFACE RADAR SIGNAL PROBABILISTIC DISTRIBUTION MODEL

Abstract. The solution to the problem of evaluating the probabilistic characteristics of reflected signals in georadar allows the synthesis of decisive statistical rules in the problems of detection and recognition of subsurface objects. Appropriate mathematical models of distributions are preferable to have in the form of multiparameter probability distributions. In particular, the values of the asymmetry coefficients and kurtosis of the distributions obtained experimentally for the case of broadband sounding occupy significant areas in the Pearson diagram for probabilistic distributions. The multiparameter probability distributions thus obtained make it possible to approximate several laws of probability distribution in one expression. It is shown that the proposed technique allows us to evaluate the type and distribution parameters of the reflected signal of the subsurface radar and to obtain its probabilistic model.

Keywords: approximation, Pearson distribution, ground penetrating radar.

Одной из важных задач, решаемых методами георадиолокации, является поиск, определение положения и формы подповерхностных объектов и неоднородностей, в том числе, оценка глубины их залегания и линейного размера [1-5].

Разработка оптимальных и квазиоптимальных методов обнаружения и распознавания подповерхностных объектов при обработке результатов первичного зондирования возможна при использовании моделей распределений, характеризующих

трассы распространения электромагнитных волн в подземном пространстве [6-12].

Способ экспериментального получения вероятностных моделей распределений заключается в согласованной обработке отраженных импульсных широкополосных ЛЧМ сигналов подповерхностного локатора, оцифровке полученных реализаций и подборе типа и параметров вероятностного распределения, характерного для тех или иных условий зондирования и исследуемых пород. При этом накопление статистик реализуется для каждой исследуемой точки поверхности и для нескольких точек в радиусе 3-5 м от нее.

Цифровая обработка накопленных случайных реализации сигналов георадиолокации выполняется с построением одномерных или двумерных вероятностных обобщенных реализаций сигналов георадиолокации, обладающих полнотой комплексной и достоверной информацией о строении, состоянии и показателях свойств исследуемых пород [1].

В результате обработки полученных реализаций сигналов подповерхностной локации могут быть получены статистические оценки вероятностных показателей распределений на основании их гистограмм и далее аппроксимация интегральных законов распределения. Основанием для выбора двух-, трех- и многопараметрических вероятностных моделей может служить получение двух-, трех- или более параметрических выборочных характеристик отраженного подповерхностного сигнала.

Одним из способов представления информации о распределениях является использование оценок квантилей распределений. Рассмотрим возможности подбора распределений по их квантилям при использовании семейства распределений Пирсона. Каждое семейство распределений на диаграмме Пирсона может быть получено как решение дифференциального уравнения:

$$\frac{df}{dx} = \frac{(x-\phi_2)f(x)}{\phi_0 + \phi_1 x + \phi_2 x^2}.$$

для случайной величины x с плотностью распределения $f(x)$ путем надлежащего выбора параметров φ_0, φ_1, φ_2 и φ_3. Решение этого уравнения приводит к большому числу семейств распределений, включая нормальное, бета-распределение и гамма-распределение [10, 11, 14, 15]. На диаграмме Пирсона для распределений в плоскости (β_1, β_2) показаны точки, линии и области для различных распределений – нормального, бета распределения (частный случай – равномерное распределение), гамма-распределения (частный случай – экспоненциальное распределение) и логарифмически нормального.

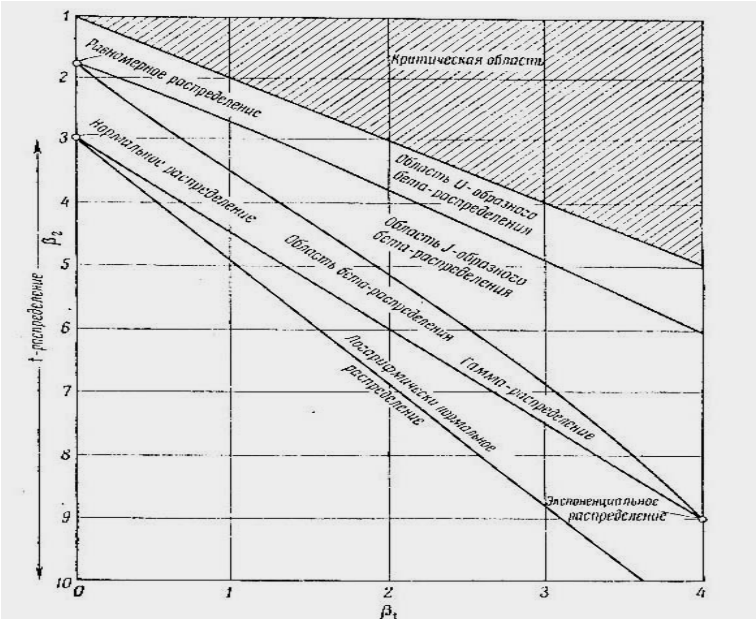


Рисунок 1 - Диаграмма распределений Пирсона

Координаты диаграммы выбираются следующим образом: β_1 - квадрат нормированного показателя асимметрии, β_2 - нормированный показатель островершинности. В частности, для нормального распределения $\beta_1 = 0$ и $\beta_2 = 3$. На диаграмме это распределение представлено одной точкой, как и экспоненциальное и равномерное распределения. Гамма-распределение, логарифмически нормальное распределение и t-распределение можно подобрать для всех значений β_1 и β_2, лежащих вблизи средней кривой. Заметим, что кривая для гамма-распределения находится вблизи кривой для логарифмически нормального распределения. Это помогает объяснить тот факт, что, эмпирические данные могут быть описаны как гамма- распределением, так и логарифмически нормальным распределением. Бета-распределение, имеющее два параметра формы, занимает определенную область, отсюда следует его обобщающий характер. Однако большая область значений β_1 и β_2 не охвачена не одним из рассмотренных ранее распределений.

Наиболее распространенным распределением для аппроксимации экспериментальных данных является применение нормального распределения. Из центральной предельной теоремы следует, что нормальное распределение дает приемлемое описание многих реальных явлений. Аналогично гамма-распределение и логарифмически нормальное распределение используются для описания случайных величин, ограниченных с одной стороны. Хотя эти модели приводят к распределениям самой различной формы, все же они не дают той степени обобщения, которая является необходимой [7-9, 12-15].

Для применения графиков, изображенных на рис. 1, необходимо знать оценочные значения β_1 и β_2, соответствующие принятым экспериментальным реализациям. Эти оценки используются для описания экспериментальных данных одним из представленных распределений путем расчета выборочных оценок β_1 и β_2 и нанесения точек с соответствующими координатами на диаграмму распределений. Если области расположения экспериментальных точек будут расположены достаточно близко от точки, кривой или области, соответствующей одному из видов распределения, из этого следует, что данное распределение может быть использовано для описания эмпирических данных. Затем приступают уже к уточненному выбору параметров распределения. Графики на диаграмме свидетельствуют о широком разнообразии форм распределений Пирсона и, таким образом, непосредственно могут быть использованы для выбора соответствующего аппроксимирующего распределения. В ряде случаев для подбора аппроксимирующего распределения Пирсона достаточно использовать оценки первых четырех моментов гистограмм экспериментальных выборок [14, 15].

Результаты применения методики показывают, что вероятностные характеристики отраженных сигналов подповерхностной локации удовлетворительно аппроксимируются негауссовскими распределениями, что может служить основанием для разработки алгоритмов согласованной обработки отраженных сигналов георадиолокатора при обнаружении или распознавании подповерхностных объектов для заданных условий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нерадовский Л.Г.* К вопросу о статистической природе сигналов георадиолокации / Геофизика. - 2013. - №2. - С. 60-63.
2. *Борисов С.В.* Моделирование помехо-сигнальных ситуаций в георадиолокации / С.В. Борисов, Ю.К. Выболдин // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: Сборник. научных трудов Международной научно-практической конференции IPDME-2018. - 2018. - С. 186.
3. *Выболдин Ю.К.* Метод оценки линейных размеров объекта при радиолокационном зондировании земных недр / С.В. Борисов, Ю.К. Выболдин // Инновации и перспективы

развития горного машиностроения и электромеханики: Сборник. научных трудов Международной научно-практической конференции IPDME-2018. - 2018. - С. 186.
4. *Выболдин Ю.К.* Методы обработки дискретных сигналов в системах передачи информации / Ю.К. Выболдин, А.В. Кривошейкин, Л.Х. Нурмухамедов. - СПб.: Изд-во ГИКИТ, 2015. - 320 с.
5. *Выболдин Ю.К.* Система аварийного оповещения подземных рудников. В кн. «Промышленная безопасность минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» / Ю.К. Выболдин, В.А Шпенст // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2015. №2 (специальный выпуск 7). - С. 336-343.
6. *Сопельник Ю.В.* Характеристики обнаружения радиолокационных некогерентных сигналов при неизвестной мощности гауссовской помехи / Радиотехника, 1988. - №5.
7. *Шелухин О.И., Беляков И.В.* Негауссовские процессы. — СПб.: Политехника, 1992.
8. *Шляхин В.М.* Вероятностные модели нерелеевских флуктуаций радиолокационных сигналов / Радиотехника и электроника, 1987. - №5.
9. *Худяков Г.И.* Развитие методов аналитической геометрии на сфере для решения задач геодезии и навигации / Записки Горного института. - 2017. - Т. 223. - С. 70-81.
10. *Ширман Я.Д.* Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.А. Горшков, С.П. Лещенко, Г.Д. Братченко, В.Н. Орленко // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. - 1996. - №11.
11. *Кендалл М.Дж., Стюарт А.* Статистические выводы и связи. - М.: Наука, 1973. - 899 с.
12. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. — М.: Радио и связь, 1981.
13. *Сопельник Ю.В., Борисов С.В., Володин А.В.* Методы селекции объектов на основе радиолокационной информации при широкополосном зондировании / Радиотехника (РАН). - 1997. - №5.
14. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. В 3-х томах. - М.: Советское радио, 1974 - 1976.
15. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. - М: Наука, 1983. - 416 с.

УДК 681

БУРЫЛОВ Д.А.,
БУЛГАКОВ В.А.
Санкт-Петербургский горный университет

КОНТРОЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ ЛИНИЙ УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ЛИНИЙ УДАЛЁННЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. В статье рассмотрен метод неразрушающего контроля состояния длинных линий, связывающих различные составные объекты устройства.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, автоматизация производственных процессов, мониторинг состояния, информационные линии, линии управления.

BURYLOV D.A.,
BULGAKOV V.A.
Saint-Petersburg Mining University

CONTROL OF INTEGRITY OF CONTROL LINES AND INFORMATION LINES OF REMOTE OBJECTS

Аннотация. The article discusses the method of non-destructive control of the state of long lines connecting various components of the device.

Ключевые слова: non-destructive testing, automation of production processes, condition monitoring, information lines, control lines.

При решении задач автоматизации производственных процессов достаточно часто возникают ситуации, когда объект управления, органы управления и управляющий контроллер находятся на значительном расстоянии друг от друга. С целью обеспечения работоспособности такой системы необходим постоянный мониторинг состояния информационных линий и линий управления между управляющим контроллером и объектом управления, а также мониторинг информационных линий между управляющим контроллером и органами управления.

На рисунке 1 представлена структурная схема рассматриваемого устройства. На управляющий контроллер с органов управления поступают сигналы управления. В зависимости от поступившего сигнала управляющий контроллер формирует то или иное воздействие на объект управления. В результате объектуправления меняет своё состояние, о чём сообщает управляющему контроллеру посредством информационных линий. В рассматриваемой системе расстояние между органом управления, управляющим контроллером и объектом управления может достигать сотни метров. Поэтому актуальной является задача мониторинга состояния информационных и управляющих линий, объединяющих объекты в единую систему.

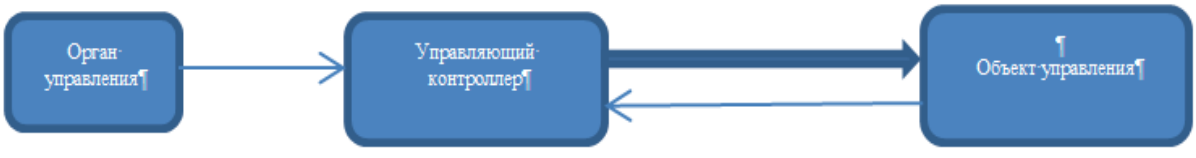


Рисунок 1 – Структурная схема устройства

Объекты, формирующие управляющие сигналы в органе управления и информационные сигналы в объекте управления, могут находиться в двух состояниях: включено или выключено.

Состояние информационных линий между управляющим контроллером и органами управления, а также информационных линий между управляющим контроллером и объектом управления может быть в одном из перечисленных состояний:

1. Информационная линия в исправном состоянии, информационный сигнал в состоянии выключено;
2. Информационная линия в исправном состоянии, информационный сигнал в состоянии включено;
3. Информационная линия разомкнута;
4. Информационная линия замкнута.

Состояние линий управления между управляющим контроллером и объектом управления может быть в одном из перечисленных состояний:

1. Линия управления в исправном состоянии;
2. Линия управления замкнута;
3. Линия управления разомкнута.

Для анализа состояния линий предлагается следующий подход: орган управления в совокупности с информационными линиями является неким объектом, характеризующимся комплексным сопротивлением:

$$Z_{oy} = R_{oy} + j\omega L_{oy} - \frac{j}{\omega C_{oy}}.$$

Для анализа комплексного сопротивления Z_{oy}в управляющем контроллере используется схема, представленная на рисунке 2.

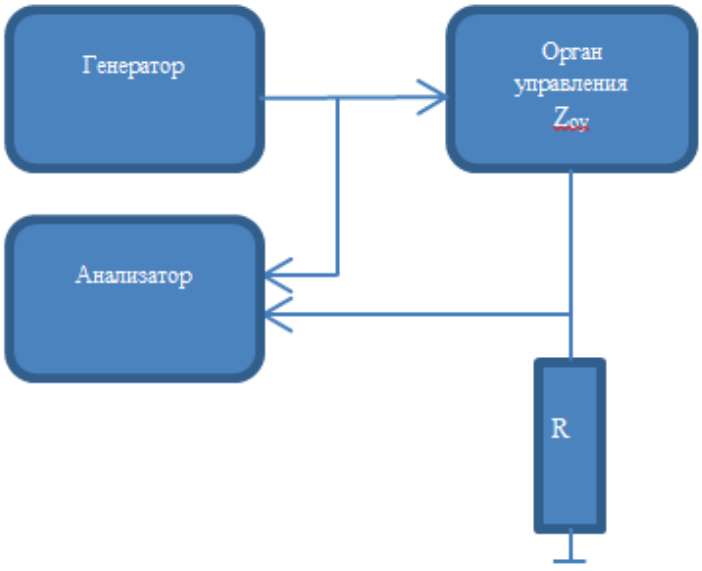


Рисунок 2 – Структурная схема анализатора состояния линии

С генератора в исследуемую линию подаётся переменный сигнал произвольной формы. Этот же сигал подаётся на вход анализатора управляющего контроллера.С выхода делителя напряжения снимается сигнал, который анализаторесравнивается с сигналом с генератора амплитуде, фазе, изменению формы сигнала. По соотношению данных сигналов принимается решение, в каком из четырёх состояний находится орган управления и информационные линии от него.

На рисунках 3-6 представлены результаты моделирования работы схемы.

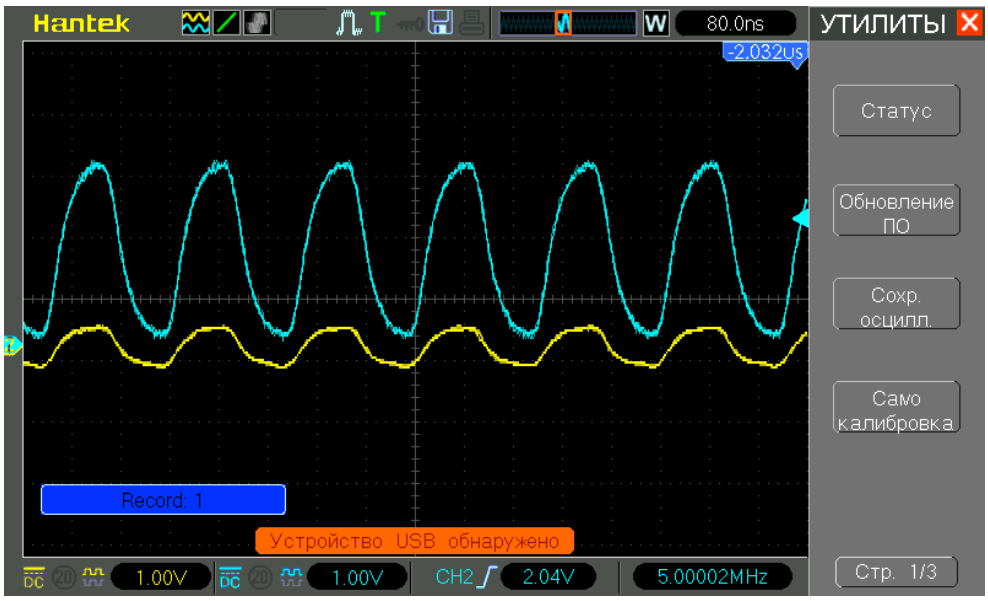


Рисунок 3 – Информационная линия в исправном состоянии, информационный сигнал в состоянии выключено

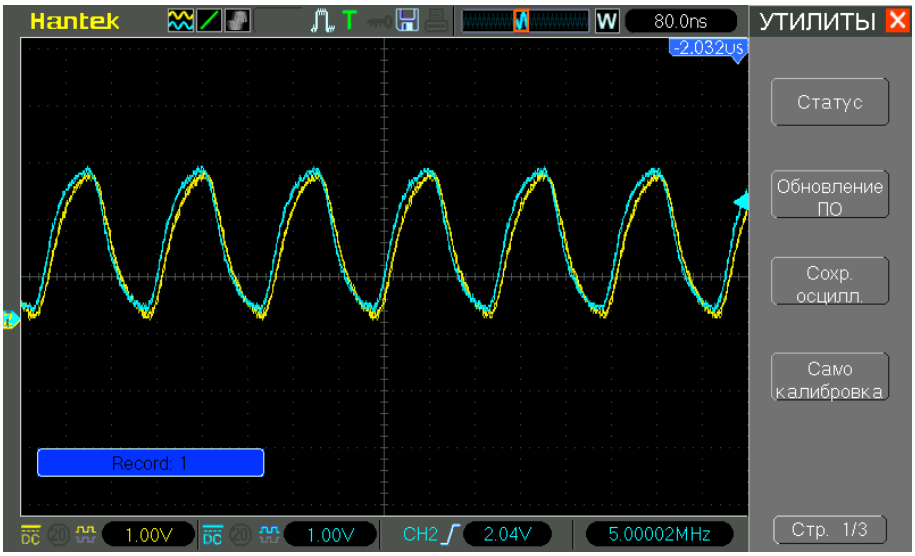


Рисунок 4 – Информационная линия в исправном состоянии, информационный сигнал в состоянии включено

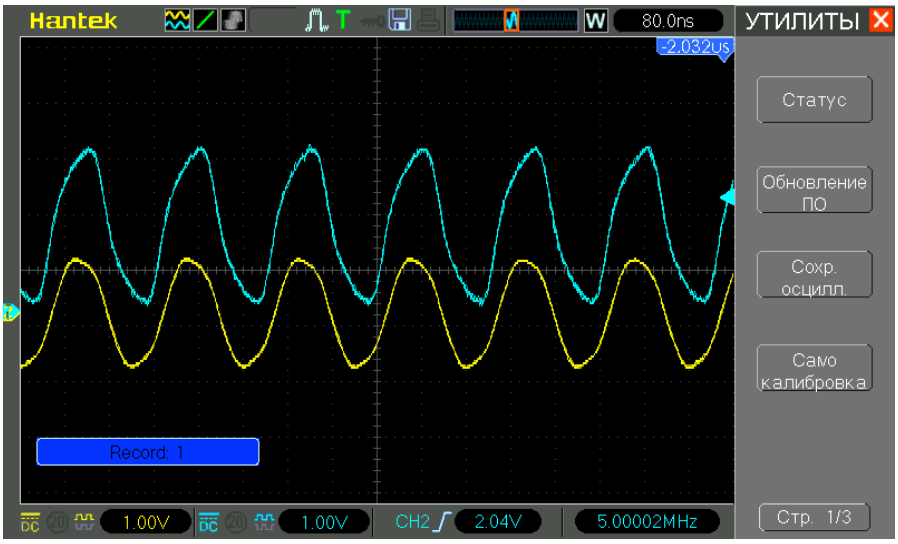


Рисунок 5 – Информационная линия разомкнута

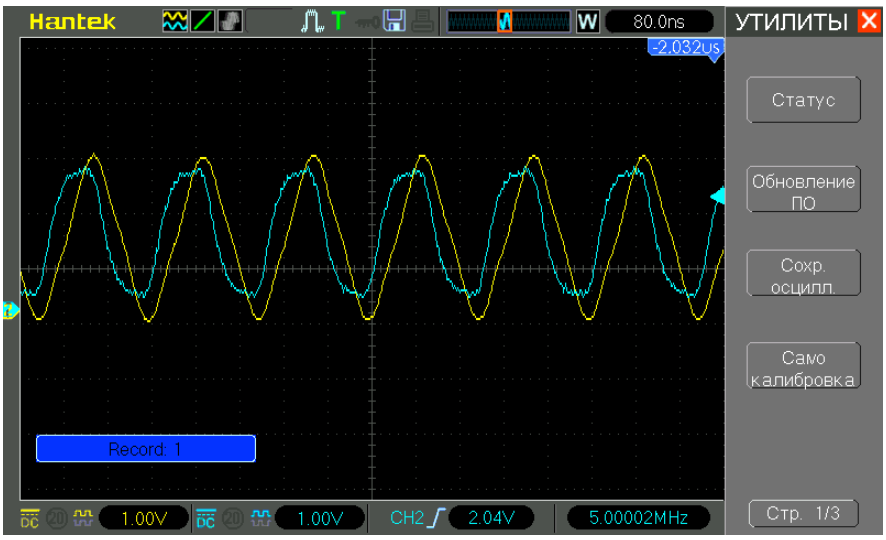


Рисунок 6 – Информационная линия замкнута

Из анализа полученных осциллограмм можно сделать вывод о том, что с помощью предложенного подхода можно детектировать различные состоянияинформационной линии, связывающейобъект и управляющий контроллер. Как видно, в зависимости от состояния линии, сигнал ы имеют видимые различия по форме , амплитуде, фазе.

Аналогичный подход может быть использован для анализа состояния информационных линий объекта управления и состояния объекта управления, а также для анализа состояния линий управления.

Заключение

Предложенный подход может быть использован для неразрушающего контроля целостности линий управления и информационных линий удалённых объектов.

Преимущества предложенного подхода заключаются в том, что для анализа состояния линии не требуется в данную линию добавлять какие-либо элементы, а весь анализ ведётся с помощью математической обработки сигналов.

В существующих системах для решения поставленной задачи используются терминальные резисторы. Их применение не удобно с практической точки зрения: это дополнительные затраты на их монтаж, и, как правило, неудобство их крепления. Выход из строя по каким-либо причинам терминального резистора может привести к ошибочному принятию решения о состоянии системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белицкий А.А.* Нелинейная и несимметричная нагрузка как основной фактор возникновения тока в нейтрали // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018», г. Санкт-Петербург. - 2018. - с. 144.
2. *Белицкий А.А.* Универсальный генератор управляющих сигналов на основе микропроцессора ATMEGA8 / А.А. Белицкий, К.А. Антонов, Е.В. Кузьменко // ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА - материалы III Всероссийской научно-практической конференции, г. Кемерово. - 2017. - с. 301.
3. *Kanygina E.D.* Opticaland electrical control in printed circuit board manufacturing (Conference Paper) / E.D. Kanygina, O.V. Denisova, I.V. Rastvorova // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 201928 February 2019, Номер статьи 8656918, p. 536-538.

УДК 681

ВЕСЕЛОВСКИЙ А.П.,
КОСАРЕВА Л.И.,
ЗВЕРЕВ С.Г.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

ЛИНЕЙНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ DC-DC ТИПА

Аннотация. В статье рассматривается наиболее динамично развивающееся направление силовой электроники, связанное с решением задачи регулирования напряжения в преобразователях постоянного напряжения. Линейное регулирование выходного напряжения осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции. Получена линейная регулировочная характеристика во всем диапазоне регулирования от нулевого до максимальных значений. Получена формула регулировочной характеристики выходного напряжения на основе математической модели широтно-импульсного способа регулирования с изменяющейся шириной импульсов.

Ключевые слова: регулирование напряжения, статические преобразователи напряжения DC-DC, широтно-импульсная модуляция, регулировочная характеристика.

VESELOVSKY A.P.,
KOSAREVA L.I.,
ZVEREV S.G.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

LINEAR VOLTAGE REGULATION IN DC-TO-DC CONVERTERS

Abstract. The article deals with the most dynamically developing branch of power electronics related to solving tasks of voltage regulation in DC-to-DC converters. Linear regulation of the output voltage is carried out using pulse-width modulation. A linear regulatory characteristic is obtained over the entire control range from zero to maximum values. The formula of the output voltage regulation characteristic is obtained through a mathematical model of a pulse-width control method with a variable pulse width.

Keywords: voltage regulation, DC-to-DC converters, pulse-width modulation, control characteristics.

Introduction

The wide variety of control systems can be classified by the most important distinguishing features. At the heart of the functions performed by control systems are the requirements for the processes, implemented by technological installations with specified parameters of power sources, electric drives, or power sources of radio-technical devices. Modern factory produced converters includelocal and remote control, alphanumeric indicators for displaying input and output voltages, output current, frequency, accuracy of maintaining various parameters and other data [1–15].

These installations require particularly accurate regulation in open and closed control systems. Andusing energy-efficient, controlled electric drive with static electricity converters can improve efficiency, equipment payback, and production profitability [8].

Principles of converting DC voltage

To improve the consumer properties of products, we can optimize parameters, increase the working frequency of conversion, reduce power losses on power elements, and reduce dynamic loads in the power part of the circuit. Regulation of AC and DC voltages uses pulse-width modulating methods with varying duty cycle [5].

Pulse-width DC-to-DC converters convert DC voltage to pulse one, the average value of which needs to be adjusted. The output voltage of these converters (before the output filter), as a rule, has the form of unipolar pulses.

The frequency of conversion depends on the dynamic properties of the switches, of which the converter is made. Due to the constant value of the supplied voltage at the input of the converter, natural commutation of the switches (thyristors) is impossible, which requires using fully-controllable elements (lockable thyristors, transistors). *GTO*-thyristors allow switching up to 1 kHz, *IGBT*-transistors – up to about 10 kHz, field-effect transistors – up to 1 MHz and more [12].

The equation of the regulatory characteristic of the pulse-width converter with unipolar and equal in duration pulses (unipolar modulation), is determined by the degree C of regulation of the output voltage:

$$C = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{TU_{in}} \int_0^{t_u} U_{in} dt \quad . \tag{1}$$

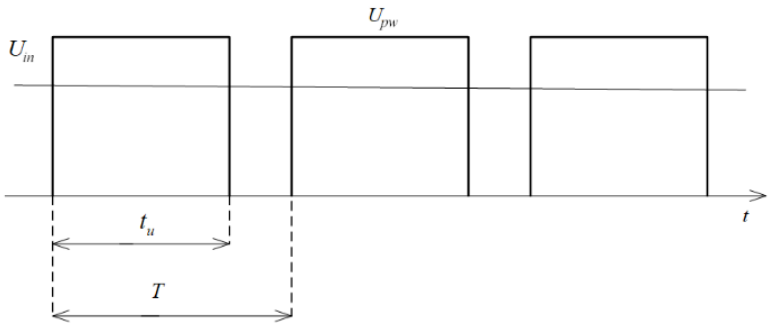


Fig. 1. Pulse-width modulation of converters with unipolar pulses of equal duration

An essential point in the converters of DCvoltage is the desired linear dependence of output voltage on the control effect. The peculiarity of dependence $U_{out} = f(U_{control})$ in pulse-width modulation (PWM) of voltage is the non-linearity of the output characteristic [1]. Regulatory performance in this mode of regulation is steeply falling, making it difficult to develop regulators when using microprocessors. Linearity of the characteristic is a huge advantage of the converter, ensuring optimal construction of devices of automatic process control in output circuits of rectifiers.

We have developed the method of modulated pulse-width control of the power elements of the converter with changes in the duration of power pulses, allowing to obtain a linear dependence of output voltage on the control sinusoidal voltage [2].

Partial linearity of the regulatory characteristics of a controlled rectifier can be obtainedusingPWM when changing the control angle αaccording to the arccosine dependence [10].

The authors proposed a methodof regulating the output voltage of PWM, allowing to obtain linear regulatory characteristic in the range of 0 to 1.

Mathematical description of the proposed linear pulse-width regulation method

The control scheme contains a sinusoidal voltage generator and a triangular pulse generator. Positive half-sinusoid $u(x) = U_c \sin x$ (U_c is the amplitude) over the range of 0 to π corresponds to m triangular pulses. The limits of pulses are lines l_k, the equations of which are

described by the general formula:

$$u_k(x) = (-1)^{k-1} 2U_{\text{т}} \left(\frac{m}{\pi} x - k + \frac{1+(-1)^{k-1}}{2} \right), \quad x \in [x_{k-1}, x_k], k = 1, 2, \ldots, 2m. \tag{2}$$

Where U_{t} is the amplitude of triangular pulses (see fig. 2.a),and abscissas of the splitting points of the [0, π] range are defined by the formula:

$$x_k = \frac{\pi k}{2m}. \tag{3}$$

Pulse-width modulation is carried out as follows: the DC signal of durationπ is broken into rectangular pulses in accordance with the condition: constant voltage U_0 is broken into a number of ranges with the presence or absence of voltage by points of intersection ξ_k ($k = 1, 2, \ldots, 2m$) of triangular pulses with a sinusoidal curve. Meanwhile, voltage will be present in the ranges where the sine graph lies above (fig. 2.b) or, conversely, below (fig. 2.c) the triangular pulses.

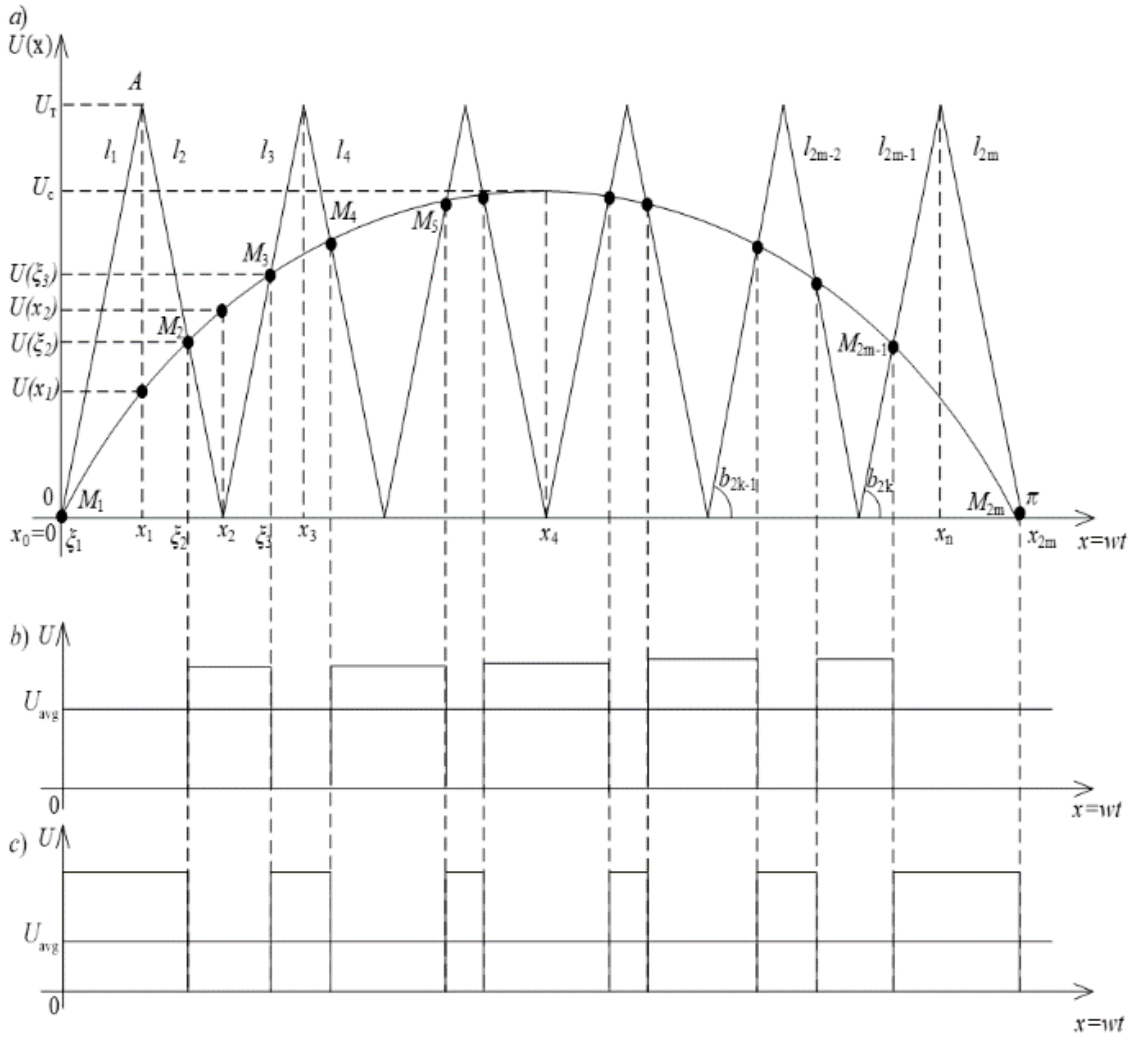


Fig. 2. Intersections of the sinusoidal voltage curve with *m*triangular pulses (a); a sequence of rectangular pulses satisfying the condition $u_t(x) < U_c \sin x$ (b); $u_t(x) > U_c \sin x$ (c)

Rectangular pulses, therefore, are determined in the case of $u_t(x) < U_c \sin x$ by the formula:

$$u_{\text{п}}(x)=\begin{cases} U_0, & x\in\bigcup_{k=1}^{m}[\xi_{2k},\xi_{2k+1}], \\ 0, & x\notin\bigcup_{k=1}^{m}[\xi_{2k},\xi_{2k+1}] \end{cases} \tag{4.1}$$

and in the case of $u_{\text{t}}(x) > U_{\text{c}}\sin x$ – by the formula:

$$u_{\text{п}}(x)=\begin{cases} U_0, & x\in\bigcup_{k=1}^{m}[\xi_{2k-1},\xi_{2k}], \\ 0, & x\notin\bigcup_{k=1}^{m}[\xi_{2k-1},\xi_{2k}] \end{cases} \tag{4.2}$$

It is not possible to analytically obtain the abscissas ξ_k of the points M_k where straight lines l_k cross the sinusoidal curve $u(x)=U_{\text{c}}\sin x$, so we will do the following:

As a point of crossing of the sinusoidal curve $u(x)=U_{\text{c}}\sin x$ and straight line l_k, we will take the point lying on this straightline (we will call it $N_{k),}$) the abscissa of which will be δ_k, and its ordinate $y(\delta_k)$ we will set as the arithmetic average of the values of the function $u(x)=U_{\text{c}}\sin x$ on the edges of where the straight line l_k, is defined, i.e. at $x_{k\text{-}1}$ and $x_{k.}$:

$$y(\delta_k)=\frac{u(x_{k-1})+u(x_k)}{2}=$$

$$=\frac{1}{2}(U_{\text{c}}\sin x_{k-1}+U_{\text{c}}\sin x_k).$$

Substituting expressions for $x_{k\text{-}1}$ and x_k from (3), we obtain:

$$y(\delta_k)=U_{\text{c}}\cos\frac{\pi}{4m}\cdot\sin\frac{\pi(2k-1)}{4m}. \tag{5}$$

Coordinates of the point $N_k(\delta_k, y(\delta_k))$ satisfy the equation of the straight line l_k.

$$y(\delta_k)=(-1)^{k-1}2U_{\text{т}}\left(\frac{m}{\pi}\delta_k-k+\frac{1+(-1)^{k-1}}{2}\right) \tag{6}$$

By equating right parts of the formulas (5) and (6), we will get the expression for δ_k:

$$\delta_k=\left((-1)^{k-1}\frac{U_{\text{c}}}{2U_{\text{т}}}\cos\frac{\pi}{4m}\sin\frac{\pi(2k-1)}{4m}+\right.$$

$$\left.+k-\frac{1+(-1)^{k-1}}{2}\right)\frac{\pi}{m}\quad. \tag{7}$$

Since the boundaries of the rectangular pulses are defined by points δ_k (7) instead of points ξ_k, the formulas that determine the sequence of these impulses will also change:

$$u_{\text{п}}^{-}(x)=\begin{cases} U_0, & x\in\bigcup_{k=1}^{m}[\delta_{2k},\delta_{2k+1}], \\ 0, & x\notin\bigcup_{k=1}^{m}[\delta_{2k},\delta_{2k+1}] \end{cases} \tag{8.1}$$

for the case $u_{\text{t}}(x) < U_{\text{c}}\sin x$, and

$$u_{\text{п}}^{+}(x)=\begin{cases} U_0, & x\in\bigcup_{k=1}^{m}[\delta_{2k-1},\delta_{2k}], \\ 0, & x\notin\bigcup_{k=1}^{m}[\delta_{2k-1},\delta_{2k}] \end{cases} \tag{8.2}$$

for the case $u_{\text{t}}(x) > U_{\text{c}}\sin x$.

Now we will calculate the average voltage for each case:

1. $u_t(x) < U_c \sin x$.

$$U_{avg}^{-} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} u_{\text{п}}^{-}(x)dx = \frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{m}\int_{\delta_{2k}}^{\delta_{2k+1}} U_0 dx =$$

$$= \frac{U_0}{\pi}\sum_{k=1}^{m}(\delta_{2k+1} - \delta_{2k}) =$$

$$= \frac{U_0 U_c}{U_T m}\cos^2\frac{\pi}{4m}\cdot \text{tg}^{-1}\frac{\pi}{2m}.$$

For $m >> 1$

$$\cos\frac{\pi}{4m} \longrightarrow 1, \text{tg}\frac{\pi}{2m} \approx \frac{\pi}{2m}$$

And the formula takes on the form of:

$$U_{avg}^{-} . \tag{9}$$

2. $u_t(x) > U_c \sin x$.

$$U_{avg}^{+} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} u_{\text{п}}^{+}(x)dx = \frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{m}\int_{\delta_{2k-1}}^{\delta_{2k}} U_0 dx =$$

$$= \frac{U_0}{\pi}\sum_{k=1}^{m}(\delta_{2k} - \delta_{2k-1}).$$

$$U_{avg}^{+} = U_0 . \tag{10}$$

On fig. 3 we present the regulatory characteristic of the converter derived from this method of regulation.

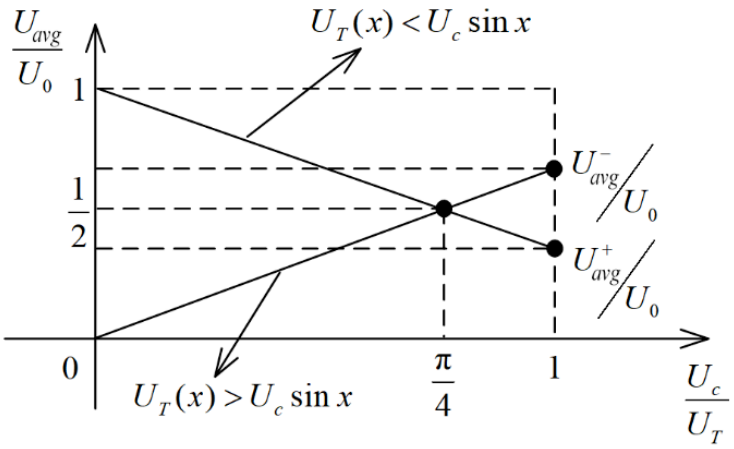


Fig. 3. Regulatory characteristic of the converter

According to this regulatory characteristic,our method allows to regulate theDC-to-DC converter voltage outputlinearly in the entire range of 0 to 1.

Conclusion

As a result of using the PWM method, the regulatory characteristics of DC voltage become linear and allow for voltage regulation from zero to maximum values. At the sametime, it is much easier touse microprocessor technology to make such voltage regulators. Results of the developed algorithm of the control device utilizing the PWM method can find broad use in power electronics, electric drives, and other areas.

This research work was supported by the Academic Excellence Project 5-100 proposed

by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

REFERENCES

1. *Gorbachev G.N., Chaplygin E.E.* Industrial electronics. Textbook for universities / Ed. by V.A. Labuntsov - M.: Energoatomizdat. 1988. - 320 p.
2. *Semenov B.Y.* Power electronics: Professional solutions. - M.: Solon-Press, 2011. - 416 p.: ill.
3. *Rozanov Y.G.* Basics of power electronics. - M.: Energoatomizdat, 1992. - 296 p.
4. *Sokolovsky G.G.* AC electric drives with frequency regulation. - M.: Academia, 2006. - 265 p.
5. *Rotash E.M., Drobovich Y.I., Yurchenko N.N., Shevchenko P.N.* High-frequency transistor converters. M.: Radio and communication. 1988 p.
6. *Veselovsky A.P., Budko P.A., Buryanov O.N., Vinogradenko A.M.* Features of the systems of control of ventral converters // Problems of technical support of troops in modern conditions: theses of reports II intercollegiate NPC (St. Petersburg, Military Academy of Communications, 2017). 2017. pp. 150–154.
7. *Veselovsky A.P., Budko P.A., Vinogradenko A.M., Kosareva L.I.* Implementation of the way of converting AC voltage // Problems of technical support of troops in modern conditions: theses of reports III intercollegiate NPC (St. Petersburg, Military Academy of Communications, 2018). - St. Petersburg. 2018. pp. 172-176.
8. *Veselovsky A.P., Budko P.A., Vinogradenko A.M., Kosareva L.I.* Voltage regulation in converters of high-frequency pulses with varying duty cycles / Mechatronics,automation, control. 2018. No 8 (19). pp. 516–522.
9. *Vinogradenko A.M., Veselovsky A.P., Vzesniewski S.V., Galvas A.V.* The way and the synchronization of voltage control systems / Practical power electronics. 2018. No 2 (70). pp. 53-55.
10. *Lukutin B.V., Obukhov S.G., Plotnikov I.A.* Power converters in electricity supply: study manual. - Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House. 2014. 150 p.
11. *Gelman M.V., Gelman M.M., Preobrazhensky K.A.* Converting Equipment: Study Manual. Chelyabinsk: UrSU Publishing Center. 2009. 425 p.
12. *Kulik V.D.* Power Electronics: Study Manual. - St. Petersburg 2010. 91 s.
13. *Zinoviev G.S.* Power Electronics: Study Manual - Moscow: Youwrite.671p.
14. *Abraham L., Heumann K., Koppelmann F.*Wechselrichter fur Dzehzahlsteurung von Kafiglaufermotoren. AEG–Mitt., 1964. No. 2. P. 89-106.
15. *Volkov A.G.* Mathematical model of AC-AC converter without passive elements in DC-link // Source of the Document International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014). 2014. P. 403-407.
16. *Skamyin A.N., Dobush V.S. A*nalysis of nonlinear load influence on operation of compensating devices // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194 (5), 052023. DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052023.
17. *Kopteva A.V., Starshaya V.V., Malarev V.I., Koptev V.Yu.* Improving the efficiency of petroleum transport systems by operative monitoring of oil flows and detection of illegal incuts. Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019, Volume 1, Proceedings of the XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers under the auspices of UNESCO (St. Petersburg Mining University, Russia, 13-17 May 2019. P. 406-415.
18. *Voytyuk I.N., Zamyatina E.N., Zamyatin E.O.* Increasing the energy efficiency of an enterprise by point compensating of power quality distortions. Proceedings of the International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019). – 2019.
19. *Ustinov D.A.* increase of dynamic stability of alternating current electric drives at short-term violations of oilfield power supply // 12th International Scientific and Technical Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2019, 8601457. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601457.

20. *Turysheva A.V., Baburin S.V.* Justification of power supply system's structure of oil and gas facilities using backup energy sources with associated petroleum gas as the energy carrier // International Journal of Applied Engineering Research. 2016, vol. 11(1), pp. 749-755.
21. *Savard, C., Iakovleva, E.V.* A suggested improvement for small autonomous energy system reliability by reducing heat and excess charges // Batteries, 2019, 5(1), 29. 10.1109/EIConRus.2019.8657097.
22. *Chmilenko, F.V., Rastvorova, I.I.* Improvement of quality of aluminum ingots at electromagnetic processing // Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1118(1), 012030.

УДК 504.064.3

ВОЛКОДАЕВА М.В.,
ВОЛОДИНА Я.А.,
КУЗНЕЦОВ В.А.
Санкт-Петербургский горный университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОБООТБОРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Аннотация. Контроль качества воздушной среды на границе санитарно-защитной зоны предприятий минерально-сырьевого комплекса предусматривает проведение отбора проб и их транспортировку до лабораторий с целью последующего анализа. Мировая практика показала, что в качестве устройств для отбора проб целесообразно использовать пробоотборные пакеты, выполненные из различных материалов и обладающие разнообразными характеристиками. Авторами выявлены критерии, такие как материал, из которого изготавливается устройство, объем пакета, количество, вид и расположение фитингов, оптимизация которых позволяетувеличить время хранения проб, уменьшить диффузию веществ, сделать отбор и транспортировку проб удобнее, снизив вероятность потерь. Также предложен способ регенерации пакетов, обеспечивающий более качественную очистку устройств.

Ключевые слова: пробоотборное устройство; атмосферный воздух; загрязняющие вещества; пробоотбор; экологический мониторинг; регенерация.

VOLKODAEVA M.V.,
VOLODINA YA.A.,
KUZNETSOV V.A.
Saint-Petersburg Mining University

A SAMPLE DEVICE OPTIMIZATION FOR THE PURPOSES OF THE AMBIENT AIRMONITORING

Abstract. Air quality control at the border of the sanitary protection zone of the enterprises of the mineral resource complex provides for sample collection and transportation to laboratories for the purpose of subsequent analysis. World practice has shown that it is advisable to use sample bags made of various materials and having various characteristics. The authors identified criteria, such as the material from which the device is made, its size, number, type and location of fittings, the optimization of which allows to increase the storage time of samples, reduce diffusion of substances, make sampling and transportation of air samples more convenient, reducing the likelihood of losses. Also a method of sample bag regenerating is proposedthat provides better cleaning of devices.

Keywords: sample bag; atmospheric air; pollutants; sampling; environmental monitoring; regeneration.

Предприятия минерально-сырьевого комплекса оказывают негативное воздействие на окружающую среду, в частности являясь источниками выделения в атмосферный воздух широкого перечня загрязняющих веществ [1, 2]. В качестве основных веществ, загрязняющих воздушный бассейн, выступают твердые загрязняющие вещества, оксид углерода, оксиды азота, диоксид серы, летучие органические соединения [3].

С целью контроля качества атмосферного воздуха на предприятиях производятся

периодические замеры уровней загрязняющих веществ как у источников выбросов, так и на границе санитарно-защитной зоны [4]. Определение содержания веществ в промышленных выбросах происходитв соответствии с графиками контроля, утвержденными контролирующими органами, посредством функционирования автоматизированных систем мониторинга (обязательное требование согласно Федеральному закону 7-ФЗ «Об охране окружающей среды») [5, 6]. Для измерения концентраций поллютантов на границе санитарно-защитной зоны необходимым этапом является отбор проб воздуха и доставка их в лабораторию для проведения анализа [7].

Для быстрого отбора проб при наличии чувствительных методов исследования используют отбор проб в различные сосуды и емкости: газовые пипетки, резиновые камеры, шприцы, канистры [8]. Вид сосуда определяется природой анализируемого газа и объемом пробы. Объем газовой пробы должен быть достаточным для проведения анализа выбранным методом, а также дляосуществления повторных определений.

В последние годы для целей экологического мониторинга по всему миру все чаще стали применяться пробоотборные пакеты [9, 10, 11, 12]. Лидерами в этой отрасли принято считать фирмы Restek (США), SKC (США), Cole-Parmer (США), Merck (Германия), GLSciences (Нидерладны). Выпускаемые пакеты представляют собой устройства для отбора проб воздуха, которые используются как для основных газов, так и для улавливания специфических веществ (например, летучих органических соединений) [13]. Они могут быть изготовлены из различных материалов (тедларовая, тефлоновая, лавсановая, фторопластовая, поливинилиденфторидная, фторэтиленпропиленовая, алюминиевая пленка и др.). Пакеты оснащаются фитингами, которые могут также различаться по материалу (как правило, это полипропилен или нержавеющая сталь), из которого изготовлены, по количеству, способу крепления и месту расположения. Емкость устройств может варьироваться от 0,5 до 100 литров и более. Пробоотбор осуществляется с помощью портативных насосов или вакуумных пробоотборников.

Исследование разнообразных пробоотборных пакетов, выпускаемых мировыми лидерами, а также российскими фирмами-изготовителями («Юнитек», НПФ «Экан»), показало, что не существует оптимального устройства для отбора, хранения и транспортировки проб атмосферного воздуха и, в том числе, летучих органических соединений. Некоторые пакеты одноразовые и не подлежат регенерации, другие не способны удерживать необходимый для определения загрязняющих веществ объем, третьи оснащены неудобными для использования фитингами. Таким образом, отсутствие подходящего варианта пробоотборного устройства приводит к поиску технических решений для оптимизации процедуры отбора, хранения, транспортировки проб, а также регенерации использованных пакетов.

Авторами предлагается внести некоторые изменения в конструкцию лавсановых пробоотборных пакетов, а именно - усовершенствовать швы и фитинги устройств. В связи с удаленностью некоторых пунктов наблюдений, а также загруженностью аналитического оборудования в лабораториях оптимальным решением является увеличение времени хранения проб в пакетах. Использование двойных швов положительно сказывается на длительности хранения образцов и меньшей диффузии загрязняющих веществ через швы пакета – наиболее уязвимой части пробоотборного устройства. Существует необходимость более качественной очистки устройств, что возможно достичь путем выявления оптимального способа очистки, а также добавления дополнительного фитинга с противоположной стороны пакета.

При изготовлении пробоотборных пакетов предлагается использовать лавсановую пленку толщиной 50 мкм, так как она выполняет необходимые барьерные функции, предотвращая диффузию веществ через стенки корпуса устройства, а также позволяет уменьшить общий вес пакета.

Также оптимальным решением является применение сразу двух параллельных швов, поскольку это позволяет увеличить время хранения воздушных проб в пакетах до

трех суток. Получать швы следует методом спаивания посредством сварочного аппарата.

Отбор и сброс пробы воздуха производится через фитинги. Авторами предложено использовать два полипропиленовых фитинга, благодаря чему увеличивается «гибкость» пробоотбора – появляется возможность отбора пробы при различных условиях, варьирования способов прикрепления пакета к устройству подачи пробы, а также скорости закачки воздуха в пакет. Более того, при регенерации устройства использование двух фитингов обеспечивает сквозную продувку устройства, улучшая качество очистки.

Решением проблемы потери проб при транспортировке из-за нарушения целостности пакетов является укрепление контура устройства. Такое укрепление становится возможным при помещении в пространство между двух швов и по периметру пакета полой фторопластовой трубки диаметром 1-2 мм.

Качественная регенерация лавсанового пакета для отбора проб позволяет использовать устройства многократно, обеспечивая низкий уровень фоновых концентраций загрязняющих веществ в них. Авторами предложен способ очистки пакетов при помощи озона или азота. Выбор способа регенерации основан на физико-химических особенностях веществ, выступающих в роли очистителей, и подтвержден многократными исследованиями [14, 15].

С точки зрения охраны окружающей среды, материал лавсан может быть переработан и утилизирован. Существует два основных способа переработки полиэтилентерефталата: механический и физико-химический[16]; активно развиваются биологические методы [17]. Более того, важным является возможность переработки полипропилена, включающая этапы сортировки, дробления и температурного воздействия, гранулирования [18].

Таким образом, предлагаемая авторами оптимизация характеристик пробоотборных пакетов позволяет улучшить эксплуатационные свойства устройств, увеличив время хранения отобранных образцов и «гибкость» процедуры пробоотбора, снизить вероятность потери пробы при ее транспортировке. Правильная регенерация лавсановых пакетов позволяет использовать их многократно, обеспечивая получение корректных данных экологического мониторинга. Все вышеперечисленные преимущества пакетов делают возможным проведение исследований на удаленных территориях, что актуально для объектов минерально-сырьевого комплекса, а также выполнять многочисленные отборы проб при контроле качества воздуха на границе санитарно-защитной зоны предприятий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ibrahim W.H.W.* 2018 Air quality assessment on human well-being in the vicinity of quarry site / W.H.W. Ibrahim, E. Marinie, J. Yunus, N. Asra, K. MohdSukor // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 117 012010.
2. *Agienko M.I.* 2017 Eco-analytical Methodology in Environmental Problems Monitoring / M.I. Agienko, E.P. Bondareva, G.V. Chistyakova, O.V. Zhironkina, O.I. Kalinina // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 50 012022.
3. *Мазлова Е.А.* Краткое описание подходов к формированию маркерных показателей при разработке ИТС в области переработки нефти, добычи нефти и газа / Е.А. Мазлова, В.П. Коваленко, О.С. Ежова // Наилучшие доступные технологии. Определение маркерных веществ в различных отраслях промышленности. Сборник статей, 2017. - №8. - С. 79-84.
4. *Gasanov M.A.* 2017 The Concept of Ecologically Oriented Progress and Natural Resource Preservation / M.A. Gasanov, K.A. Kolotov, K.A. Demidenko, E.A. Podgornaya, O.V. Kadnikova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 50 012025.
5. *Reshnyak V.I.* 2017 System aspect course of creation of information and analytical system of environmental monitoring and control / V.I. Reshnyak, S.S. Sokolov, S.G. Chernyi,

T.V. Storchak, Ya.N. Tihomirov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 87 042017.
6. *Volkodaeva M.V.* 2018 Measuring of industrial emission parameters / M.V. Volkodaeva, O.A. Taranina, V.A. Kuznecov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 194 062035.
7. *Akdeniz N.* 2011 Comparison of gas sampling bags to temporarily store hydrogen sulfide, ammonia, and greenhouse gases / N. Akdeniz, K.A. Janni, L.D. Jacobson, B.P. Hetchler // *Transactions of the ASABE* 54 653–661.
8. *Watson N.* 2011 Air Monitoring: New Advances in Sampling and Detection / N. Watson, S. Davies, D. Wevill // *Scientific World Journal* 11 2582–2598.
9. *Kim Y.-H.* 2012 Comparison of storage stability of odorous VOCs in polyester aluminum and polyvinyl fluoride Tedlar bags / Y.-H.Kim, K.-H.Kim, S.-H.Jo, E.-C.Jeon, J.R. Sohn, D.B. Parker // *Analytica Chimica Acta* 712 162–167.
10. *Laor Y.* 2010 Methodological aspects of sample collection for dynamic olfactometry / Y. Laor, Y. Ozer, U. Ravid, A. Hanan, P. Orenstein // *Chemical Engineering Transaction* 23 55–60.
11. *Parker D.B.* 2010 Recovery of agricultural odors and odorous compounds from polyvinyl fluoride film bags / D.B. Parker, Z.L. Perschbacher-Buser, N.A. Cole, J.A. Koziel // *Sensors* 10(9) 8536–8552.
12. *Sironi S.* 2014 Ammonia diffusion phenomena through Nalophan bags used for olfactometric analyses / S. Sironi, L. Eusebio, L. Capelli, E. Boiardi, R. Del Rosso, J.M. Guillot // *Journal of Environmental Protection* 5 949–961.
13. *Kim Y.-H.* 2012 Experimental approach to assess sorptive loss properties of volatile organic compounds in the sampling bag system / Y.-H.Kim, K.-H.Kim // *Journal of Separation Science* 35(21) 2914–2921.
14. *Volkodaeva M.* 2019 On the selection of the lavsan sample bags regeneration for their repeated use / M. Volkodaeva, Ya. Volodina, V. Kuznetsov // *Danish Scientific Journal* 1 65-68.
15. *Волкодаева М.В.* О сравнении результатов измерений концентраций летучих органических соединений при использовании разных методов отбора проб / М.В. Волкодаева, Я.А. Володина // Экологические системы и приборы. - 2017. - №7. - С. 3-6.
16. *Firas Awaja.* 2005 Recycling of PET / Firas Awaja, Dumitru Pavel // *European Polymer Journal* 41(7) 1453-1477.
17. *Lorch M.* New plastic-munching bacteria could fuel a recycling revolution. 2016. URL: https://theconversation.com/new-plastic-munching-bacteria-could-fuel-a-recycling-revolution-55961
18. *Arunachalam Lakshmanan*. 2015 Recycling of Polytetrafluoroethylene (PTFE) Scrap Materials / Arunachalam Lakshmanan, S.K. Chakraborty // *Sintering Techniques of Materials* 9 169-190.

УДК 621.926.001.66

ВОЛКОДАЕВА М.В.,
ТАРАНИНА О.А.
Санкт-Петербургский горный университет

КОНТРОЛЬ ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСАХ

Аннотация. Предприятия алюминиевой промышленности являются источниками выделения в атмосферу полиароматических углеводородов (ПАУ). ПАУ в промышленных выбросах могут находиться, как в газовой составляющей выбросов, так и ассоциироваться с взвешенными веществами, присутствующими в газовоздушной смеси. Данные, полученные на основании исследований количественного состава отходящих газов цехов электролиза показывают, что ПАУ могут присутствовать в газовой фазе при температуре работы газоочистного оборудования. При контроле ПАУ в промышленных выбросах качестве адсорбента возможно использовать оксид алюминия. Сорбционные свойства оксида алюминия зависят от его физико-химических параметров. Пробоотборное устройство, основанное на использовании оксида алюминия в качестве сорбента, позволяет проводить контроль легколетучих ПАУ, находящихся в газовой фазе.

Ключевые слова: промышленные выбросы, полиароматические углеводороды.

VOLKODAEVA M.V.,
TARANINA O.A.
Saint-Petersburg Mining University

CONTROL OF POLYAROMATIC HYDROCARBONS IN INDUSTRIAL EMISSIONS

Abstract. Aluminum industry is sources of release of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) into the atmosphere. PAHs in industrial emissions can be found both in the gas component of emissions and associated with suspended material present in the gas-air mixture. Data obtained on the basis of studies of the quantitative composition of waste gases of potrooms show that PAHs can be present in the gas phase at the operating temperature of gas cleaning equipment. When controlling PAHs in industrial emissions, it is possible to use aluminum oxide as an adsorbent. Sorption properties of aluminum oxide depend on its physical and chemical parameters. The sampling device, based on the use of aluminum oxide as a sorbent, allows monitoring of highly volatile PAHs in the gas phase.

Keywords: industrial emissions, polyaromatic hydrocarbons.

Предприятия алюминиевой промышленности являются источниками выделения в атмосферу широкого перечня загрязняющих веществ (ЗВ), в том числе и таких веществ как полиароматические углеводороды (ПАУ), которые входят в состав смолистых веществ (возгонов каменноугольного пека), выделяющихся в процессах производства алюминия [1, 2, 3]. Данные вещества относятся к группе приоритетных стойких органических загрязнителей, обладают канцерогенными и мутагенными свойствами [4, 5, 6, 7]. В последние годы возрастает интерес к контролю приоритетных ПАУ в промышленных выбросах, в связи с необходимостью дифференциации выбросов ПАУ и их источников с целью идентификации источников поступления полициклических ароматических углеводородов в объекты окружающей среды [8, 9].

Сложность контроля ПАУ в промышленных выбросах заключается в том, что данные соединения могут находиться, как в газовой составляющей выбросов, так ассоциироваться с взвешенными веществами, присутствующими в газовоздушной смеси [10]. Предложенная модель Д. Панкоу и Х. Ямасаки разделения ПАУ между газовой и твердой фракциями дает возможность определить состояние ПАУ в газовоздушной смеси в зависимости от температуры отходящих газов и концентрации взвешенных веществ [11]. Формула, предложенная данными исследователями, показывает зависимость коэффициента разделения ПАУ между твердой и газовой фазами от температуры газа:

$$\log K_p = \frac{m_p}{T} + b_p,$$

где K_p – коэффициент разделения, м^3/мкг,
m_p *и* b_p – коэффициенты;
T – температура, К.

$$K_p = \frac{c_т}{c_п \cdot c_г},$$

где $c_т$ – концентрация аналита, адсорбированного на твердых частицах, нг/м^3;
$c_г$ – концентрация аналита в газовой фазе, нг/м^3;
$c_п$ – общая концентрация твердых частиц, мкг/м^3.

Данная зависимость, полученная на основании исследований количественного состава отходящих газов показывает, что ПАУ могут присутствовать в газовой фазе при температуре работы газоочистного оборудования (ГОУ). Поэтому при контроле ПАУ в промышленных выбросах необходимо применять адсорбционный метод контроля, заключающийся в применении адсорбентов в процессе пробоотбора. В качестве адсорбента возможно использовать оксид алюминия – соединение широко известное своими сорбционными свойствами [12, 13]. Сорбционные свойства оксида алюминия зависят от его физико-химических параметров. При адсорбции ПАУ оксидом алюминия происходит рост адсорбции с увеличением температуры и преобладают хемосорбционные процессы.

Отбор проб в источниках загрязнения атмосферы проводится согласно схеме отбора проб, приведенной ниже.

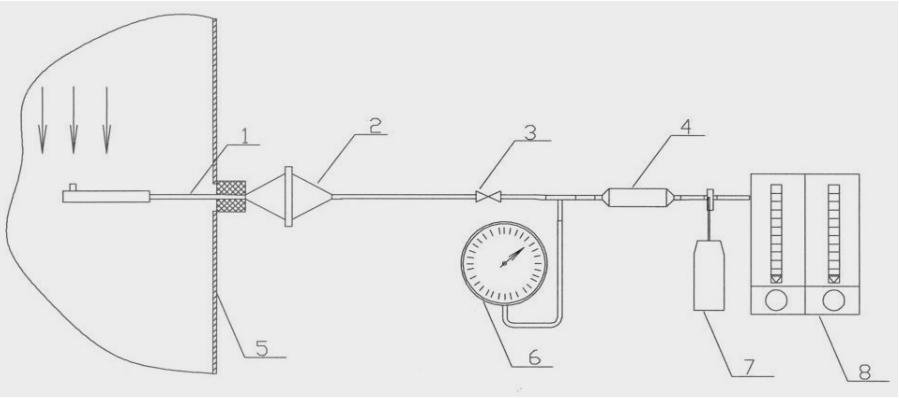


Рисунок 1 – Схема отбора проб:
1 – пробоотборная трубка с фильтровальным патроном, 2 – пробоотборное устройство, 3 – кран, 4 – осушитель газа, 5 – газоход, 6 – вакуумметр, 7 – термометр, 8 – аспиратор

Поскольку в отходящих газах присутствуют взвешенные вещества, то отбор проб ведется с соблюдением условий изокинетичности, что обеспечивает уменьшение неопределенности измерения концентрации ПАУ, адсорбированных на твердых частицах. Соблюдение данного условия обеспечивается подбором скорости отбора проб. В процессе отбора проб ПАУ контролируются такие параметры газовоздушной смеси как температура, давление и влажность с целью с целью приведения измеряемых концентраций к нормальным условиям: T_0 = 273 К, P_0 = 760 мм рт.ст., сухой газ.

Исключение проведения измерения влажности газовоздушной смеси, может привести к завышенным показателям мощности выброса полиароматических углеводородов [14]. Проведение замеров концентрации загрязняющих веществ и параметров газовоздушной смеси не параллельно, а последовательно может повлечь за собой погрешности в оценке мощностей выбросов, поскольку технологические процессы, проходящие на предприятии могут быть не постоянными. Данную проблему решает система непрерывного мониторинга выбросов [15].

Результаты исследования сорбционной емкости оксида алюминия по отношению к ПАУ в динамическом режиме показали, что высота слоя адсорбента для улавливания легколетучих ПАУ должна быть в диапазоне от 1,5 до 3,0 мм. Пробоотборное устройство с данными параметрами обеспечивает степень улавливание легколетучих ПАУ от 85 до 99%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смола В.И.* ПАУ в окружающей среде: проблемы и решения: в 2 ч. Ч. 1. – М.: Полиграф сервис, 2013. – 383 с.

2 *Таранина О.А.* Методы контроля выбросов смолистых веществ (возгонов каменноугольного пека) в атмосферу в рамках производственного экологического контроля на алюминиевых заводах Российской Федерации / О.А. Таранина, В.С. Буркат // Экологические системы и приборы. - 2017. - № 6. - С. 3-7.

3. *Kjos O.S., Aarhaug T.A., Wittgens B., Brunsvik A.* 2014 At-line analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in aluminium primary production *Light Metals* 541-546.

4. *Samburova V., Zielinska B., Khlystov A.* 2017 Do 16 polycyclic aromatic hydrocarbons represent PAH air toxicity, *Toxics* 17.

5. *Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S.M.* 2016 A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation *Egyptian journal of petroleum* 25 107-123.

6. Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans / Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2010. - Vol. 92. – 868 p.

7. *Rengarajan T., Rajendran P., Nandakumar N. et al.* 2015 Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons with special focus on cancer *Asia pacific journal of tropical biomedicine* 5(3) 182-189.

8. *Stogiannidis E., Laane R.* 2015 Source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons by using their molecular indices: an overview of possibilities *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 234 49-133.

9. *Tobiszewski M., Namiesnik J.* 2012 PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources *Environmental pollution* 162 110-119.

10. *Таранина О.А.* Анализ содержания полиароматических углеводородов в газовой и твердой фазах в промышленных выбросах производства алюминия / О.А. Таранина, В.С. Буркат, М.В. Волкодаева // Металлург. - 2019. - № 11. - С. 77-83.

11. *Schummer C., Mothiron E., Appenzeller B.M.R. et al.* 2010 Gas/particle partitioning of currently used pesticides in the atmosphere of Strasbourg (France) *Air Quality, Atmosphere and Health* 3 171-181.

12. *Dang Yu, Liu Yibin, Feng Xiang, Chen Xiaobon, Yang Chaohe* 2019 Effect of dispersion on the adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons over the γ-Al_2O_3 (110) surface *Applied surface science* 486 137-143.

13. *Яковлева Е.Ю.* Влияние химической модификации на адсорбционные и хроматографические свойства оксидов алюминия / Журнал аналитической химии. - 2012. - Т. 67. № 9. - С. 842-848.

14. *Волкодаева М.В.* О возможных ошибках при определении величины мощности

выбросов загрязняющих веществ / М.В. Волкодаева, О.А. Таранина, Я.С. Канчан // Системы контроля окружающей среды. - 2018. - Вып.12(32). - С. 122-127.
15. *Volkodaeva M.V., Taranina O.A., Kuznecov V.A.* 2018 Measuring of industrial emission parameters *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 194(6) 062035.

УДК 621. 313

ЗАВЬЯЛОВ В.С.,
МАЛЬЦЕВА Н.К.
Университет ИТМО
ФЕДОСОВСКИЙ М.Е.,
БОЛДЫРЕВ И.П.,
ШАРШОВ А.Г.
АО «Диаконт»
ДЕГТЯРЕВ В.В.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

НОРМИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЬБЫ РОЛИКОВИНТОВОЙ ПЕРЕДАЧИ

Аннотация. В работе даны определения основных параметров резьбы роликовинтовой передачи необходимых для достижения требуемой кинематической точности и ресурса. Проведен анализ методов контроля резьбовых поверхностей, применяемых в машиностроении и выбрано измерительное оборудование. Была разработана методика контроля внутренней специальной резьбы роликовинтовой передачи.

Ключевые слова: контроль параметров резьбы, шаг резьбы, средний диаметр резьбы, контуромер, роликовинтовая передача, электромеханический привод.

ZAVIALOVV.S..,
MALTSEVA N.K.
ITMO University
FEDOSOVSKY M.E.,
BOLDYREV I.P.,
SHARSHOV A.G.
Diakont
DEGTYAREV V.V.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

STANDARDIZATION AND CONTROL OF THREAD PARAMETERSOF A ROLLER SCREW DRIVE

Abstract. The paper gives definitions of the main parameters of the thread of a roller screw drive necessary to achieve the required kinematic accuracy and resource. The analysis of methods for controlling threaded surfaces used in mechanical engineering is carried out and measuring equipment is selected. A technique was developed to control the internal special thread of the roller screw drive.

Keywords: threadcontrol, threadpi, thread pitch, average thread diameter, roller screw drive, electromechanical drive.

1. Нормирование параметров резьбы роликовинтовой передачи.

В настоящий момент не существует общедоступного международного или национального стандарта на резьбу роликовинтовой передачи. Наиболее близкими стандартами являются ГОСТ 11708-82 [1] и ISO3408-1:2006 [2], однако они не охватывают всех необходимых для обеспечения работы передачи параметров. В рамках данной работы

будут использоваться следующие определения:

Контур резьбовой поверхности роликовинтовой передачи (Xi, Yi) – выявленный профиль резьбовой поверхности роликовинтовой передачи в осевом сечении, полученный в результате одного измерительного хода контуромера.

Виток – участок контура резьбы, относящийся к одному полному обороту точек винтовой линии резьбы относительно оси резьбы.

Образующая резьбы (O_1, O_2) – часть контура резьбовой поверхности п, расположенная между вершиной и впадиной резьбы.

Вершина резьбы (A1, A2) – часть винтовой поверхности роликовинтовой передачи, соединяющая образующие соседних витков по верху ее выступа.

Впадина резьбы (V) – часть винтовой поверхности роликовинтовой передачи, соединяющая образующие относящиеся к одному витку по дну ее канавки.

Вписанная окружность (xi, yi) – окружность заданного диаметра, вписанная во впадину контура резьбы.

Шаг резьбы – расстояние между центрами соседних вписанных окружностей одного контура.

Исходный диаметр резьбы по вписанным окружностям – расстояние между центрами ближайших вписанных окружностей для противолежащих контуров резьбы.

Фильтрованный диаметр резьбы по вписанным окружностям – значение среднего диаметра резьбы, полученное после процедуры фильтрации значений исходного диаметра резьбы по вписанным окружностям.

Длина сканирования – длина измерительного хода контуромера.

Контролируемая длина (Lu) – длина выявленного профиля резьбы после исключения неполных витков.

Длина ролика – длина контакта с сопрягаемой поверхностью.

Действительная величина интервала изменения диаметра по вписанным окружностям на всей контролируемой длине (OD2) – разница наибольшего и наименьшего значений фильтрованного диаметра на всей контролируемой длине.

Действительная величина интервала изменения диаметра по вписанным окружностям на длине ролика (OD2_R) – разница наибольшего и наименьшего значений фильтрованного диаметра на длине ролика.

Погрешность перемещения в пределах длины измерения (Ea) – величина погрешности перемещения в пределах длины измерения.

Интервал накопленной ошибки шагов в пределах длины измерения (Vua) – величина интервала накопленной ошибки шагов в пределах длины измерения.

Отклонение профиля резьбы – расстояние по нормали к номинальному профилю резьбы между точкой выявленного профиля резьбы и номинальным профилем резьбы.

2. Выбор измерительного оборудования.

Работа [3] посвящена измерению резьбы с использованием длинномера. Длинномер позволяет контролировать средний диаметр и шаг резьбы и дает при этом достаточно высокую точность. Описанные в ней методы подходят для резьбы небольшой протяженности, у которой длина меньше диаметра, например, резьбовых калибров.В работе [4] рассмотрено использование томографа для оценки параметров резьбы. Данный метод, с одной стороны, дает наиболее полную оценку параметров детали, с другой стороны имеет достаточно высокую неопределенность измерения MPEE = 4.5 + L/100 мкм, что не позволяет использовать данный метод для контроля гаек РВП.В работе [5] рассматривается измерение резьбы с использование позиционно-чувствительного устройства и лазера. В работе [6] описывается контроль резьбы с использованием методов обработки изображений.

Наиболее перспективным оборудованием для контроля параметров резьбы роликовинтовой передачи является контуромер. Действие прибора основано на принципе

ощупывания исследуемой поверхности щупом твердосплавным и преобразования возникающих при этом механических колебаний щупа в изменения напряжения, пропорциональные этим колебаниям, которые усиливаются и преобразуются в микропроцессоре.

Сканирование контура резьбы в осевом сечении осуществляется на контуромере Mitutoyo SV-C4500. Процесс перемещения щупа при сканировании контура иллюстрируется рис. 1. Щуп в начальном положении по оси Z2 подводится на расстояние 10 мм от плоскости торца детали примерно на уровне оси винтовой поверхности. Щуп опускается до контакта с профилем поверхности нижним измерительным наконечником и сканируется контур X1. Производится изменение направления измерительного усилия, сканируется контур X2. Оператор заполняет заголовок протокола и результат сохраняется на сервер в виде текстового файла.

Файл с координатами точек профиля имеет расширение DAT и содержит следующую информацию: в первой строке файла записаны используемые единицы измерения (как правило мм), во второй строке указано количество точек, составляющих один контур резьбы, в последующих строках записаны координаты X_i, Y_i каждой точки. При наличии нескольких контуров в одном файле после последней точки первого контура аналогичным образом записана информация об остальных контурах. Один измеренный контур содержит до 10 000 точек.

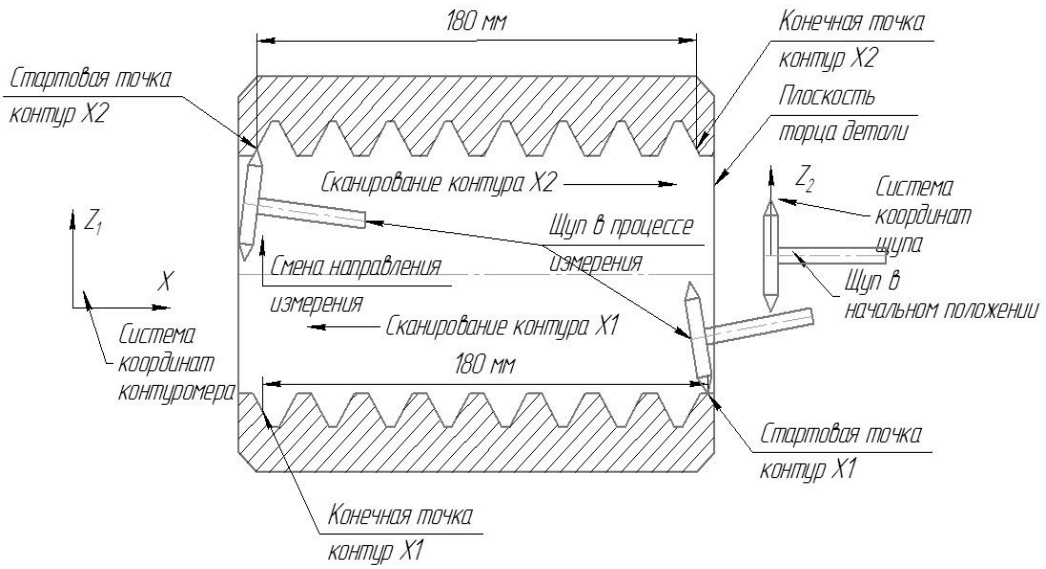


Рисунок 1 – Схема, поясняющая процесс сканирование профиля резьбы

3. Определение выявленного профиля.

После считывания точек из файла в таблицу data.point каждой точке присваивается имя контура к которому она относится. Каждый контур разделяется на участки шириной равной шагу резьбы. Каждый виток делится на пять участков: A_1, O_1, V, O_2, A_2. Участок V определяется как точки, имеющие координату Y меньше Y_V заданной в номинальных данных резьбы. Разделение вершины (A_1, A_2) и образующей (O_1, O_2) производится по фактической точке пересечения этих участков. Для этого выделяются точки, гарантированно относящиеся к заданным участкам по заданной в номинальных данных координате X_A и рассчитывается уравнение прямой для каждого участка. Точка пересечения этих участков принимается за граничную. Расчет граничной точки проводится для левой половины и витка и для правой половины витка.

4. Расчет центров вписанных окружностей.

Координаты центров вписанных окружностей (x_i, y_i) заносятся в таблицу data.center. Расчет координаты центра вписанной окружности происходит итерационно. В

первой итерации за координаты центра (x_0, y_0) принимается точка с координатами равными среднему значению соответствующей координаты для данного витка. После этого рассчитывается зазор между вписанной окружностью и выявленным профилем резьбы по формуле:

$$e_1 = \sqrt{\min\left((x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y)^2\right)} - d_s.$$

После расчета величины зазора производится перерасчет координаты центра по формуле:

$$x''_0 = x'_0 + e \cdot \sin(\alpha),$$
$$y''_0 = y'_0 - e \cdot \sin(\alpha),$$

где: $e = \begin{cases} -e_1, \text{если } e_1 > e_2 \\ e_2, \text{если } e_1 < e_2 \end{cases}$.

При достижении значения $max(e_1; e_2) \leq 10^{-10}$ окружность считается вписанной (рис. 2).

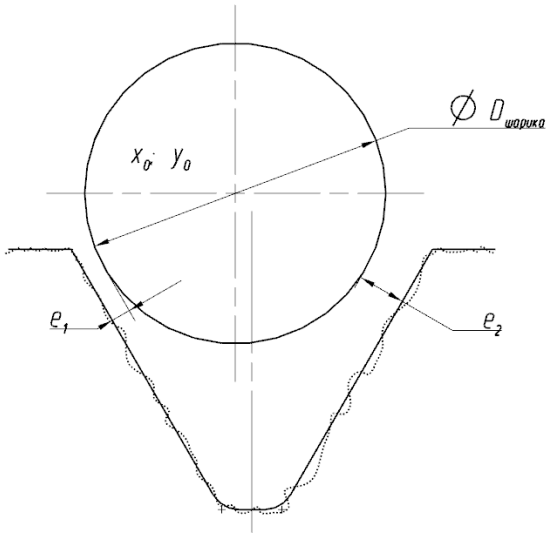


Рисунок 2 - Расчет центра вписанной окружности

5. Расчет параметров резьбы.

5.1. Параметры шага.

Для каждого витка резьбы рассчитывается действительные значения шага резьбы, по формуле:

$$SP_i = x_{i+1} - x,$$

где SP_i – действительное значение i-ого шага резьбы на нижнем / верхнем выявленном контуре,

x_i, $x_{(i+1)}$ – координаты по оси абсцисс центров вписанных окружностей для нижнего/верхнего фильтрованного профиля поверхности резьбы.

Для каждого витка рассчитывается значение накопленной погрешности (рис. 3) шага, используя формулу:

$$CSP_i = CSP_{i-1} + SP_i - SP_{\text{ном}},$$

где CSP_i, CSP_{i-1} – накопленная ошибка на i-ом и предшествующем ему шаге резьбы соответственно на нижнем/верхнем выявленном контуре в пределах длины измерения

SP_i – действительное значение i-ого шага резьбы на нижнем / верхнем выявленном контуре

$SP_{ном}$ – номинальное значение шага резьбы согласно конструкторской документации.

По полученным значениям SP_i рассчитывается уравнение линии тренда для накопленной погрешности:

$$Ea = k \times L_u,$$

где *Ea* – действительное значение погрешности перемещения в пределах длины измерения

k – тангенс угла наклона линии тренда для вычисленных значений накопленной погрешности шага в пределах контролируемой длины

L_u – контролируемая длина.

Величина Интервал накопленной ошибки шагов в пределах длины измерения *(Vua)* рассчитывается по формуле:

$$V_{ua} = \max(CSP_i - k \cdot L_i) - \min(CSP_i - k \cdot L_i).$$

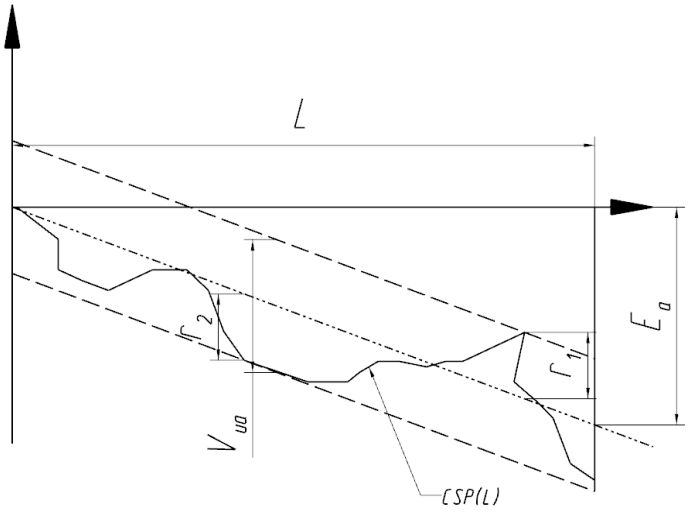


Рисунок 3 - Расчет параметров накопленной погрешности

5.2. Средний диаметр резьбы.

Расчет среднего диаметра резьбы имитирует метод трех проволочек применяемый при контроле наружной резьбы микрометром. В расчете среднего диаметра для одной вписанной окружности нижнего контура участвуют три вписанных окружности для верхнего контура. Для каждого витка резьбы рассчитаем значение среднего диаметра:

$$D2_i = \left(\frac{y_{i-1}^{x1} + y_{i-1}^{x1} + y_{i-1}^{x1}}{3}\right) - y_i^{x2}.$$

Рассчитывается величина колебания среднего диаметра на длине измерения, используя формулу:

$$OD2 = max(D_2) - \min(D_2),$$

где OD2 – действительное значение изменения среднего диаметра резьбы на длине измерения;

$\max(D_2)$, $\min(D_2)$ – максимальное и минимальное значения среднего диаметра резьбы.

Для каждого витка начиная с $n = R/SP$ считается величина колебания среднего диаметра резьбы по формуле:

$$OD2\_R_i = \max_{i-n \to i}(\max_{i-n \to i}(D_2) - \min(D_2)),$$

где OD2_R – действительное значения изменения среднего диаметра резьбы на длине ролика в пределах длины измерения (здесь и далее под длиной ролика стоит понимать отношение длины резьбовой части ролика, указанной в технических требованиях чертежа контролируемого Корпуса РВП, к номинальному шагу резьбы, округленное до ближайшего целого числа по правилам математики),

$\max_{i-n \to i}(D_2)$, $\min_{i-n \to i}(D_2)$ – максимальное и минимальное значения среднего диаметра резьбы на каждом из возможных участков зацепления в пределах длины измерения.

5.3. Параметры профиля.

Для каждой точки выявленного контура резьбы рассчитывается расстояние от точки до ближайшей точки номинального профиля. Для участков O1 и O2 отклонение профиля не должно превышать величины PR_O указанной в таблице номинальных данных. Для участков A1 и A2 за отклонение принимается координата Y точки относительно центра вписанной окружности. Для участка V отклонение сравнивается с допуском из конструкторского файла для каждой точки.

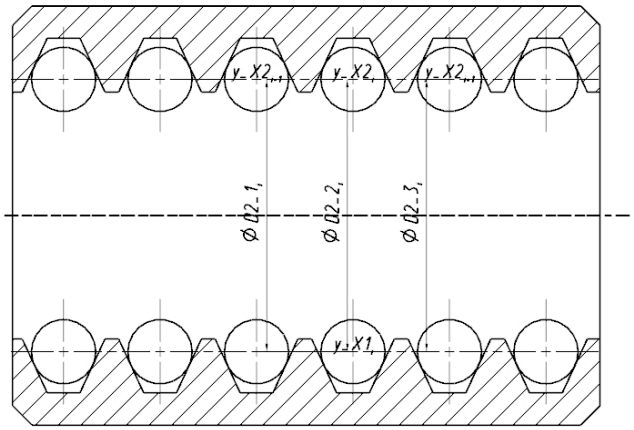


Рисунок 4 - Расчет среднего диаметра

Для каждой точки измеренного контура находим две ближайшие точки каждого контура номинального профиля. По точкам номинального контура разворачиваем систему координат. Координата Y полученной точки показывает нам отклонение от номинала, а координата Y верхнего и нижнего контура показывают допустимое отклонение для данной точки. Полученное значение отклонения и решение о годности/не годности точки записываем в отдельные столбцы таблицы с точками. Для каждого витка определяем процент точек в допуске, максимальное и минимальное значение отклонения по участкам. Результат выводится в виде графика профиля цвет точек определяется отклонением от номинала, с наложенным полем допуска. А также в виде развертки профиля, в которой координата X — это координата профиля, а координата Y – это отклонение от номинала, цвет точек в допуске – зеленый, не в допуске – красный. Результаты всех витков наложены друг на друга и разделены по заходам. На рис 4. приведен пример такой развертки, на котором видно, что большинство точек находятся в допуске и присутствуют лишь отдельные случайные отклонения в зоне перехода одного участка в другой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 11708-82 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР. Основные нормы взаимозаменяемости. РЕЗЬБА. Термины и определения.
2. ISO 3408-1:2006 Ball screws — Part 1: Vocabulary and designation.
3. *Захаренко Ю.Г. и др.* Совершенствование эталонной базы в области метрологического обеспечения резьбовых соединений / Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2016. Т. 16. №. 2.
4. *Косаревский С.В., Латыпов В.Н.* Математическое моделирование комплексного контроля резьбы на основе данных, полученных с устройств компьютерной томографии / Математическое моделирование, 2011. Т. 23. №. 6. С. 68-80.
5. *Tong Q.B., Ding Z.L., Chen J.C., Ai L.L. and Yuan F.* The Research of Screw Thread Parameter Measurement Based on Position Sensitive Detector and Laser.
6. *Rao Z., Huang K. and Mao J. 2013* Screw thread parametermeasurement system based on image processing method *Proc. SPIE* 8911 891109.

УДК 620.191;678.067

МАХМУДОВ Х.Ф.
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

ОБОСНОВАНИЯ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ЭМИССИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ

Аннотация. Проведено измерение поля скоростей распространения упругих волн в массиве гетерогенных пород. Измерение скорости упругих волн в бетонном слое толщиной h = 1500 mm производились на базе 980 mm. Регистрация моментов времени прихода волны производилась по первому вступлению сигналов**.** Осуществлено измерение спектрального состава отклика массива гетерогенных пород и бетонной обделки подземных сооружений на возбуждение его ударом шара, спектр сигнала отклика концентрируется в диапазоне 0,7 - 3,2 kHz. Разработан съемный датчик акустического импульса в комплекте с предварительным усилителем с необходимой амплитудно-частотной характеристикой для установки в скважине диаметром 76 mm на закладной детали.

Ключевые слова: съемный датчик, бетонной обделка, массив гетерогенных пород, трещина, прозвучивание.

MAKHMUDOV KH.F.
Institute of physics and technology. A.F. Ioffe RAS,
Saint Petersburg, Russia

SUBSTANTIATION OF METHODS FOR STRENGTH CONTROL OF SOLID HETEROGENEOUS MATERIALS BASED ON REGISTRATION OF EMISSION PHENOMENA

Abstract. The velocity field of elastic waves propagation in an array of heterogeneous rocks was measured. The elastic wave velocity in a concrete layer with a thickness of h = 1500 mm was measured on the basis of 980 mm. Registration of the time of arrival of the wave was performed on the first entry of signals. The spectral composition of the response of an array of heterogeneous rocks and concrete lining of underground structures to its excitation by the impact of a ball was measured. the spectrum of the response signal is concentrated in the range of 0.7-3.2 kHz. A removable acoustic pulse sensor has been developed, complete with a pre-amplifier with the necessary amplitude-frequency response for installation in a well with a diameter of 76 mm on the embedded part.

Keywords: removable sensor, concrete lining, heterogeneous rock mass, crack, sounding.

ВВЕДЕНИЕ

Нагрузка переводит тело в метастабильное состояние, и трещинообразование является формой релаксации (ее «жесткой моды», лимитирующей процесс при исчерпании более «мягкой моды» – пластической деформации). При зарождении и росте трещин происходит сброс упругой энергии, что и обуславливает их причинность. Образование трещины размера r в среде под напряжением σ приводит к энерговыделению [1]:

$$u \approx \frac{\sigma^2 r^3}{E},$$

где E – модуль упругости.

Сравним энерговыделение на двух стадиях трещинообразования. Зарождение начальных трещин отвечает выделение энергии (отражающее уровень напряжений, размер трещин и упругость материала). На первой стадии эта величина примерно одинакова. На второй стадии, в очаге разрушения действуют повышенные напряжения $\sigma_c \geq \sigma$, что при генерации новых трещин приводит к энерговыделению $u_c \geq u$, причем величина u_c / u непрерывно растет. Таким образом, в твердом теле, импульсный источник однократного механического воздействия порождает сложный акустический процесс, представляющий из себя процесс распространения объемных продольной P и сдвиговой S волн, которые в свою очередь на границах порождают вторичный процесс собственных колебаний образца и регистрация энерговыделения [1] (его изменения) позволяет фиксировать смену стадий и обнаружить переход к предразрывное состояние, а линейная экстраполяция измеренной зависимости u_c / u на нуль времени дает нижнюю оценку остаточного ресурса долговечности $\Delta\tau$ решая обе, поставленные выше задачи прогнозирования.

При оценке устойчивости подземных сооружений основной задачей является определение нагрузок [1-7], действующих на конструктивные элементы горных выработок, в целях оценки их несущей способности при воздействии определенных усилий техногенного и природного характера [8-11]. Нагрузки на конструктивные элементы обусловлены влиянием таких геологических и геомеханических факторов [12-14], как глубина заложения горных выработок, естественное напряженное состояние массива пород [15, 16], геометрические размеры камер и целиков (тупиковый подземный цех), состав и физико-механические свойства пород, структурное строение массива [17].

В процессе натурных экспериментов исследованы акустические свойства бетонной обделки и массива гетерогенных пород подземных сооружений ФГУП «ГХК» («Горно-Химический Комбинат» «Росатом» Россия, г. Железногорск, Красноярский край), в районе скважины № 5. Испытан разработанный нами датчик регистрации импульсов АЭ для установки в скважинах диаметром 76 mm. По результатам этих экспериментов от организации ФГУП «ГХК» «Росатом» получен акт (№ 212-25-60-01/2379 от 15.05.2018 г.) о внедрении (использовании) результатов работы Х.Ф. Махмудова. Выявлены акустические характеристики горных выработок в наиболее типичных узлах [18], а также рассмотрена модель и математический аппарат для оценки и слежения за развитием процессов проявления горного давления в подземных сооружениях [19]. Установлена возможность обнаружения момента начала формирования очага разрушения в подземных сооружениях [20].

ВЫБОР ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА РЕГИСТРАЦИИ АЭ И ПРОЗВУЧИВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОГО ПОРОДНОГО МАССИВА ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

Проведено предварительное измерение поля скоростей распространения упругой волны в породе в районе установки датчика в выбранной скважине (рис. 1). Скорость распространения упругой волны составило величину 5318 m/s, что удовлетворительно согласуется с расчетной скоростью (5505 m/s).

Для измерения энергии источника акустического импульса (АИ) в абсолютной шкале единиц (J) по регистрируемым АИ в лабораторных условиях был проведен анализ энергетического баланса «источник АИ» - «передающая среда» - «приемник АИ» с применением аппарата спектрального анализа. В эксперименте измерялась доля механической энергии, затраченной на возбуждение упругой волны, и независимо измерялось напряжение в упругой волне, по которому рассчитывалась энергия волны. Источником излучения волны служило упругое соударение стального шара (источник

АИ) с поверхностью стеклянного куба (передающая среда). Напряжения в упругой волне измерялись методом фотоупругости (приемник акустического импульса), работоспособность такого способа определения энергии источника упругих волн защищена патентом 5056107 РФ [20].

Сопоставление двух независимых методов [1] определения энергии упругого взаимодействия дало расхождение результатов менее чем на 20 %. То есть для модельного случая практически вся энергия упругого соударения перешла в энергию упругих колебаний куба, который, в свою очередь, обладает практически идеальной передаточной функцией. Был определен также спектральный состав энергии взаимодействия. Эти результаты позволяют определять как параметры источника сигнала, так и структуру передающей с трансформацией сигнала среду. Для адаптации этой методики на подземных сооружениях ФГУП «ГХК» был разработан, изготовлен и калиброван для измерения напряжений упругой волны пьезопленочный приемник акустического импульса (ППАИ) с линейной амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне до 20 kHz [19]. Также разработан и изготовлен съемный датчик акустической эмиссии в комплекте с предварительным усилителем для установки в скважине диаметром 76 mm на закладной детали [19]. (рис 1., №1, рис 5., №2). ППАИ был установлен в подземных сооружениях ФГУП «ГХК» в районе скважины №5 (рис. 1 № 1).

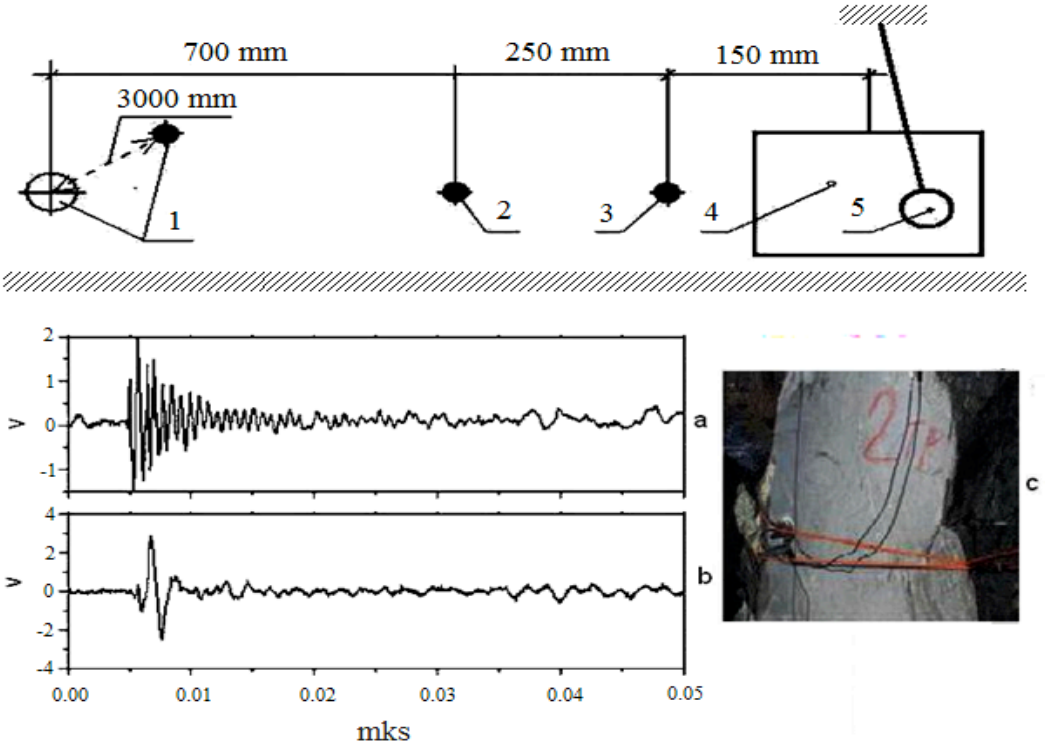


Рисунок 1 - Измерение акустических свойств бетонной обделки и горного массива в районе скважины СГС-5:
1 - скважина, в которой размещен шахтный датчик на глубине 3 m , 2 - пьезопленочный датчик, 3 - запускающий датчик, 4 - места удара (стальная пластина или закладная), 5 - массивный стальной шар a - примеры сигналов, зарегистрированных пьезопленочным датчиком, b - шахтным датчиком, c - фото крепежа контрольного датчика

Им было проведено измерение спектрального состава отклика массива горных пород на возбуждение его ударом шара массой M = 4,684 kg (рис. 1, №5), а также проведена оценка энергии в упругой волне, формируемой от удара шаром. Сопоставление оценки величины упругой энергии (около 0,3 J) с потерей механической энергии при ударе шаром (около 6 J) носит, весьма приближенный характер**.** Это связано, во-первых, с тем, что при возбуждении упругой волны путем удара шаром по поверхности выработки

соударение не чисто упругое (рис. 2), которое сопровождается разрушением породы в месте контакта, на что и идет значительная доля потерянной при соударении механической энергии шара, во-вторых, с тем, что не известна передаточная функция среды, которая может быть определена после исключения первой причины расхождения результатов. Поэтому более корректная оценка энергии производилась путем возбуждения акустического импульса ударом шара, по закладной стальной детали (или стальной пластине) (рис. 1, №4). Определенная таким способом спектральная плотность возбуждения массива горных пород от удара шаром концентрируется в диапазоне 0,7-3,2 kHz (рис. 2, a, b).

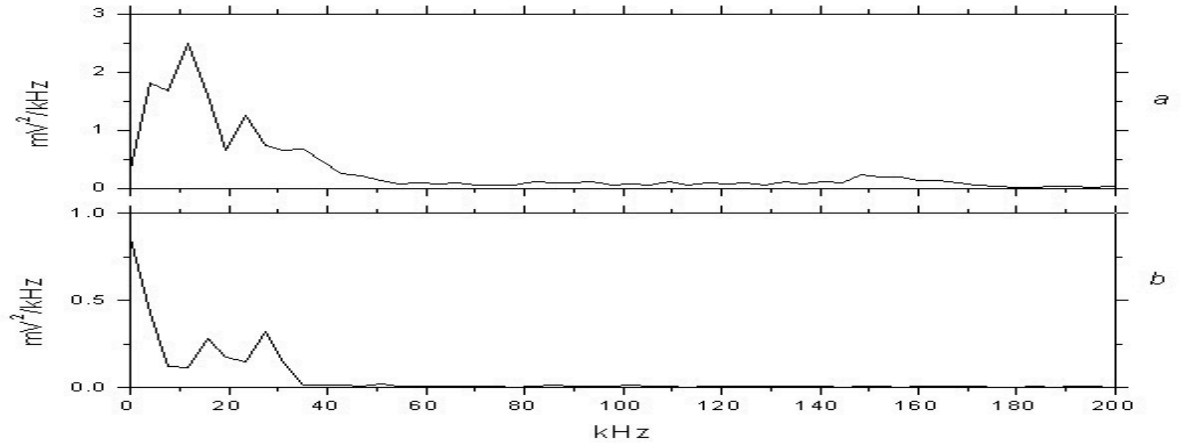


Рисунок 2 - Спектр сигнала, зарегистрированного в месте действия динамического излучателя с наименьшей энергией (a); спектр сигнала, зарегистрированного в месте приема на расстоянии 870 mm (от места удара до шахтного датчика (рис 1. (1), (4)) от излучения (b)

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОННОЙ ОБДЕЛКИ В ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Проанализирована возможность метода акустической эмиссии для регистрации трещинообразования и разрушения гетерогенных пород. Измерение скорости упругих волн в бетонном слое толщиной h = 1500 mm производились на базе 980 mm. Регистрация моментов времени прихода волны производилась по первому вступлению сигналов (рис. 3, a, b).

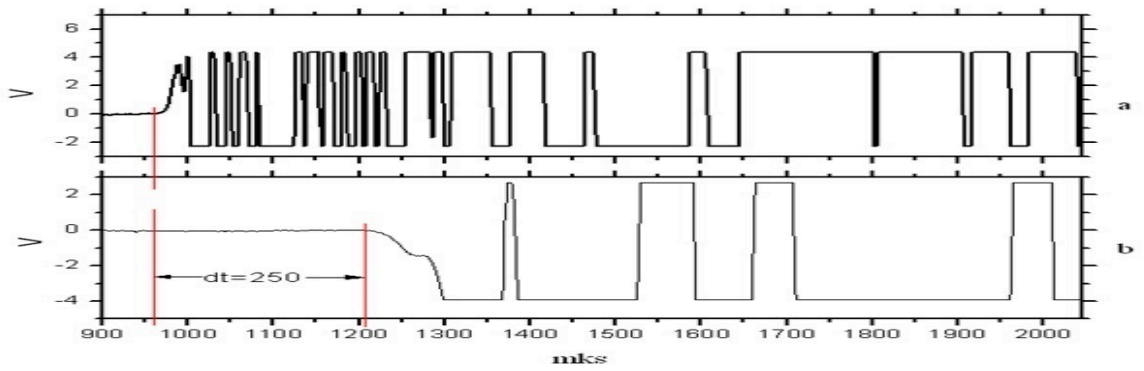


Рисунок 3 - Измерение скоростей упругих волн в бетонном слое:
a - запускающий датчик, b - датчик на расстоянии 980 mm

Согласно данным измерениям скорость в слое бетона равна 3920 m/s. Была произведена также оценка скорости волн в бетоне с помощью расчета модуля упругости E_{eff} для плоской волны: где E – модуль Юнга (для бетона он равен 36.1 kPa), ν –

коэффициент Пуассона (0.22). В результате получили скорость плоской продольной C_L волны в виде:

$$c_L = \sqrt{E_{eff} / \rho}, \quad (1)$$

где ρ – плотность бетона (2200 kg/m^3). Тогда получаем скорость плоской продольной волны в бетоне C_L = 4343 m/s.

Скорость вдоль слоя оказывается меньше скорости плоских волн C_L. Для определения типа волны, скорость которой соответствует измеренной (3920 m/s), необходимо рассчитать дисперсионные кривые для бетонного слоя h = 1500 mm. Для этого необходимо дополнительно получить скорость сдвиговых волн для бетона. Модуль сдвига μ для бетона определялся через модуль Юнга *E* и коэффициент Пуассона ν, как: E = 2μ(1 + ν) => μ = E / 2(1 + ν) = 14.8 kPa. Модуль упругости и коэффициент Пуассона брались из данных о физико-механических свойствах горных пород лаборатории физических проблем разработки пластовых месторождений Горного института им. Плеханова. Скорость сдвиговой C_T волны в бетоне получим по формуле:

$$c_T = \sqrt{\mu / \rho}, \quad (2)$$

и в итоге C_T = 2594 m/s.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для корректного применения метода АЭ при регистрации трещинообразования в гетерогенном массиве необходимо знать размеры и геометрию подземных сооружений, особенности приграничных зон, при разрушении физико-механические свойства пород [24-32], особенности динамического поведения амплитуд сигналов акустической эмиссии, включая параметры блочной структуры [33-35] и поле скоростей распространения звука, наличие и месторасположение тектонических нарушений. Как показывает опыт, первоначально поставленные задачи со временем модифицируются, возникают новые. Например, от локального контроля без определения координат источников АЭ отдельных ответственных или механически неустойчивых элементов объекта [36-38] перейти в дальнейшем к его полному контролю с определением координат источников с энергией выше заданной. Очень важен выбор частотного диапазона регистрации импульсов АЭ, поскольку от частотного диапазона с одной стороны согласно таблице зависит энергетический диапазон разрушения, подлежащего контролю, а с другой стороны, учитывая сильную зависимость коэффициента затухания акустического импульса от частоты, необходимо соответствие характеристик антенны датчиков акустического импульса размерам объекта контроля [18, 19, 39].

В заключение автор выражают благодарность Н.Г. Томилину, Д.В. Савельеву, В.Н. Медведеву, С.Ю. Круглову, А.О. Розанову за плодотворное обсуждение результатов.

ВЫВОДЫ:

Анализ частотного состава АЭ на различных стадиях трещинообразования важен для изучения физики явления потери прочности при разрушении;

- в неповрежденных гетерогенных породах на микроуровне акустические волны излучаются в процессе трещинообразования в зернах гетерогенных пород (0.5–2.00 MHz), когда преодолен локальный предел прочности материала.

- в гетерогенных породах с поверхностью ослабленного механического контакта, чем является, например, существующий разлом, акустические волны излучаются при сдвиге вдоль разлома (0.01–10 kHz), который начинает распространяться, как только преодолено трение на поверхности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петров В.А., Пикулин В.А., Розанов А.О., Савельев В.Н., Станчиц С.А.* Способ определения энергии сигнала акустической эмиссии в твердом теле. Патент Российской Федерации № 2037821, 1995.
2. *Томилин Н.Г., Дамаскинская Е.Е., Павлов П.И.* Физика земли, 2005. N8. С. 69-78.
3. *Козырев А.А., Журавлева О.Г., Федотова Ю.В.* Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, 2015 № 2. С. 108-113.
4. *Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф.* Геология и геофизика, 2017. Т. 58. № 6. С. 915-923.
5. *Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Щербаков И.П.* LAMBERT Academic Publishing, 2014. 68 с.
6. *Lockner D.A., Stanchits S.A.* 2002 *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth* 107 (12) ETG 13-1 - 13-14.
7. *Stanchits S.A., Lockner D.A., Ponomarev A.V.* 2003 Bulletin of the Seismological Society of America 93 (4) 1803-1822.
8. *Куксенко В.С., Мирошниченко М.И., Савельев В.Н., Султонов У.* / Сборник «Экспериментальная сейсмология». - М.: Наука, 1983. С. 2667.
9. *Махмудов Х.Ф., Менжулин М.Г., Захарян М.В., Султонов У., Абдурахмонов З.М.*. ЖТФ, 2015 85. Вып. 11. С. 79-85.
10. *Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Манжиков Б.* ФТПРПИ, 2010. С. 29-40.
11. *Завьялов А.Д.* 2005 ФТТ, Т. 47. №6. С. 1000-1008 ().
12. *Кочарян Г.Г., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М.* Физическая мезомеханика. 2011, Т. 14, №6, С. 63-70.
13. *Мельников Н.Н., Козырев А.А., Панин В.И.* Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2015. № 5. С.425-433.
14. *Adushkin V.V., Oparin V.N.* 2014 *Journal of Mining Science* 48 2 203-222.
15. *Смирнов В.Б., Панамарев А.В., Завьялов А.Д.* Физика земли. 1995, №1, С. 38-58.
16. *Томилин Н.Г., Воинов К.А., Селивоник В.Г., Глотов С.В.* Тезисы докладов VIII международной школы-семинара «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». – СПб. 2010. С. 86-87.
17. *Мансуров В.А., Рустамова М.З., Султонов У., Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф.* ФТПРПИ. 2009. N 4. С. 55-59.
18. *Мельников Н.Н., Козырев А.А.* Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал) Специальный выпуск, 2015. 56. С.7-23.
19. *Махмудов Х.Ф., Савельев В.Н., Савельев Д.В., Медведев В.Н., Круглов С.Ю.* В книге (сборнике): XXIII Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 100-летию ФТИ им.А.Ф. Иоффе и 110-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР А.В. Степанова. – СПб., 2018. С. 136-137.
20. *Савельев В.Н., Розанов А.О., Савельев Д.В., Медведев В.Н., Круглов С.Ю.,* Махмудов *Х.Ф.* В сборнике: VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». - М., 2017. С. 672-673.
21. *Лексовский А.М., Боровиков В.А., Бозоров Н.С., Абдуманонов А., Синани А.Б., Пилецки С.А.* Письма ЖТФ, 2002. 28. 16 С. 90-94.
22. *Rozanov A.O., Savel'ev V.N., Stanchits S.A. 1995 Proceedings of the EAGE 57th Conference and Technical Exhibition, Glasgow, Scotland* B0004.
23. *Розанов А.О., Куксенко В.С., Савельев В.Н, Станчиц С.А., Пикулин В.А.* Письма в ЖТФ, 1993. 19**.** В.4, С. 28-32.
24. *Rzayev A.G., Rasulov S.R.* 2018 *News of the Ural State Mining University* 3 89-97.
25. *Aliev T.M., Rzaev A.G., Rasulov S.R., Guluev G.A.* 2016 *Vestnik Azerbaydzhanskoy inzhenernoy akademii [Bulletin of the Azerbaijan Engineering Academy]* 8(3) 98–101.
26. *Закалинский В.М., Кочанов А.Н., Красюкова Е.В.* В книге: Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр, 2018. С. 96-99.

27. *Зайцев Д.В., Кочанов А.Н., Пантелеев И.А., Панфилов П.Е.* Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2017. Т. 81. № 3. С. 366-369.
28. *Гульельми А.В., Зотов О.Д., Завьялов А.Д.* Физика Земли, 2014. №1. С. 66.
29. *Викулин А.В., Махмудов Х.Ф., Иванчин А.Г., Герус А.И., Долгая А.А.* ФТТ, 2016. 58. №3. С. 547-557.
30. *Викторов С.Д., Кочанов А.Н.* Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2016. № 5. С. 76-83.
31. *Panthi A., Singh H.N., Shanker D.* 2013 *Geosciences* 3 5.
32. *Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В.* От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. - М.: ГЕОС, 2017. - 234 с.
33. *Гиляров В.Л., Дамаскинская Е.Е., Кадомцев А.Г., Рассказов И.Ю.* ФТПРПИ, 2014. № 3. С. 40-45.
34. *Гиляров В.Л.* ФТТ, 2011. 53. № 4. С. 707-710.
35. *Гиляров В.Л.* ФТТ, 2015. 57. № 11. С. 2204-2211.
36. *Носов В.В.* Дефектоскопия, 2014. № 12, С. 24-35.
37. *Носов В.В., Бурако И.Н.* Дефектоскопия, 2004. N2. С. 53-61.
38. *Макеев А.И., Чернышов Е.М.* Строительство и реконструкция, 2018. № 2 (76). - С. 121-134.
39. *Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф.* Актуальные научные исследования в современном мире, 2017. 10-4 (30). С. 145-152.

УДК 622.831.32:534.6:539.219.2

МАХМУДОВ Х.Ф,
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
НОСОВ В.В.
Санкт-Петербургский горный университет
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Аннотация. В данной работе обнаружено возникновение электростатического потенциала при разрушении гранитного (Fang Shan Granitic Diorite) цилиндрического образца (h = 100 мм, d = 50мм) в условиях одноосного деформирования. В процессе эксперимента регистрировались: продольная и поперечная деформация, акустическая эмиссия (АЭ) и электростатический потенциал.

Ключевые слова: электростатический потенциал, акустическая эмиссия (АЭ), деформация.

MAKHMUDOV KH.F.
Institute of physics and technology. A. F. Ioffe RAS,
Saint Petersburg, Russia
NOSOV V.V.
Saint-Petersburg Mining University
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

METHOD OF CONTACTLESS MEASUREMENT OF SMALL POTENTIALS FOR QUANTITATIVE RESEARCH OF POLARIZATION DURING ROCK DEFORMATION

Abstract. We report the study of the stick-slip phenomenon in the experiment on the axial straining of the cylindrical granite sample. The strain, the change of the electric field near the sample surface, and the acoustic emission (AE) information(including the times of detection, the coordinates and amplitudes of signals) were detected during the experiment. For measurements of the electrostatic potential, an electrometer with sensitivity 4×10^{-15} Q/mV in the frequency range of $10^{-5}\ldots10^{5}$ Hz. was designed. The kinetics of damage accumulation and fault formation was studied. In the final stage of the experiment, the electrostatic potential whose appearance coincides with the formation of new faults has been detected.

Keywords: electrostatic potential, acoustic emission (AE), deformation.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В процессе эксперимента регистрировались: продольная и поперечная деформация, акустическая эмиссия (АЭ) и электростатический потенциал (рис.1).

Автоматизированный комплекс позволяет регистрировать следующие параметры АЭ: время, три координаты и амплитуду АЭ-сигнала (M = lg A). Точность регистрации времени сигнала АЭ и используемый локационный алгоритм [1, 2], позволяют определять координаты источника АЭ с точностью до 3 мм [3-4]. Из анализа графика повторяемости определено, что представительными в данном эксперименте являются магнитуды с

M > 6,5. Для бесконтактного измерения статических электрических полей был разработан электрометр, основные параметры которого приведены в табл. 1 [3-7].

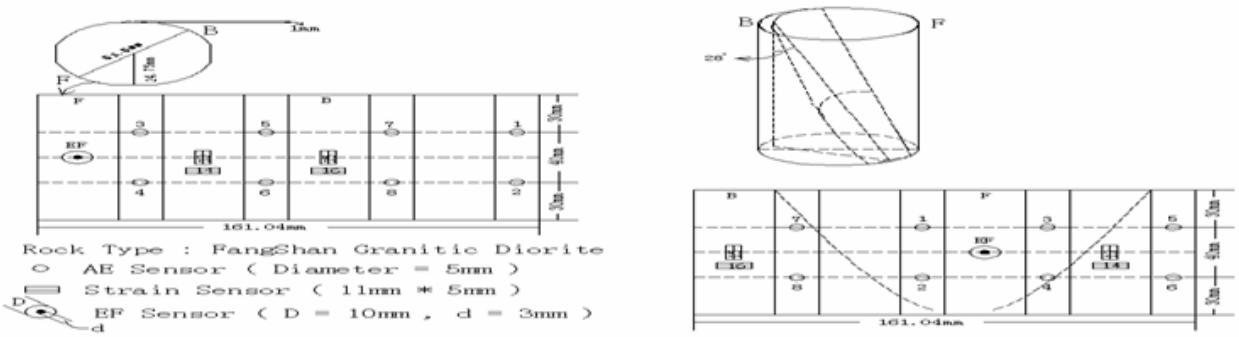


Рисунок 1 - Схема расположения датчиков и плоскости разрыва

Таблица 1.

Основные параметры электрометра

Входная емкость	(4 ± 0,5) · 10–12 Ф
Входное сопротивление	(5 ± 2) · 1015 Ом
Постоянная времени разряда входной цепи	(2 ± 1) · 104 с
Полоса рабочих частот	105 – 10–5 Гц
Чувствительность	(4 ± 1,2) · 10–15 Кл/мВ
Предел измерения потенциала	5 · 10–2 – 7 · 103 мВ

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦА

Нагружение образца проводилось в режиме постоянной скорости подачи плунжера пресса (рис. 2, а). В моменты времени 2660 с и 2980 с проводился принудительный сброс нагрузки с целью проверки возникновения отклика электростатического потенциала на резкое изменение напряжения в образце. Возникновение электростатического потенциала зарегистрировано только в конце эксперимента, за 20 с до конечного разрушения образца. Для исследования этого эффекта представляется необходимым проанализировать кинетику разрушения на основе данных АЭ.

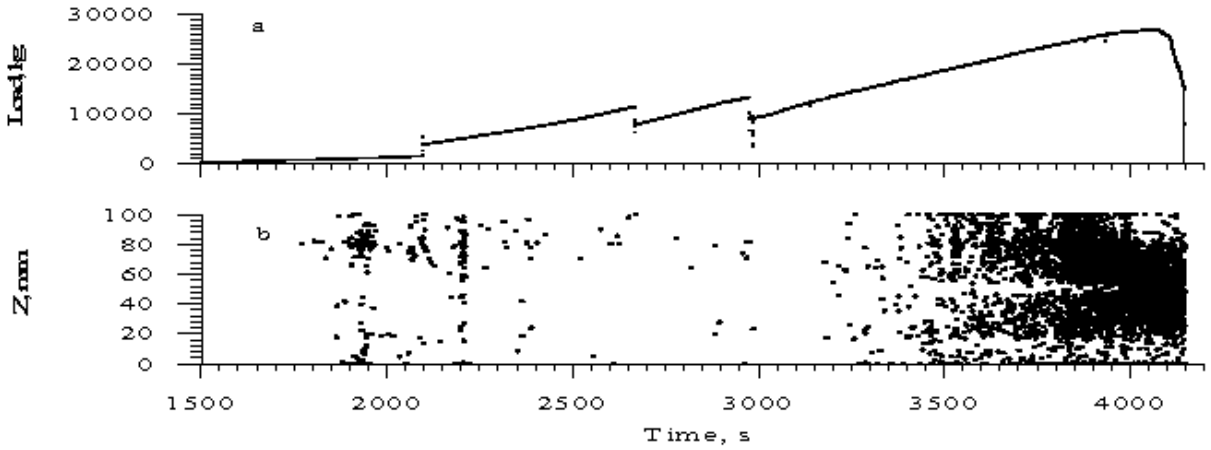


Рисунок 2 - Особенности разрушения образца

Пространственно-временное распределение АЭ событий приведено на рис. 2,б. По его анализу можно предположить следующие особенности процесса разрушения:

На начальной стадии деформирования (t ≅ 1800–2200 с) формируются последовательно два локальных очага разрушения, что обусловлено изначальной

дефектностью структуры. К дальнейшему макроскопическому разрушению образца они не приводят.

Дальнейшее развитие процесса происходит в соответствие с двухстадийной моделью разрушения горных пород [5]: дисперсная стадия накопления дефектов (t ≅ 2250–3600 с) и сменяющая ее очаговая (t > 3600 с).

Обращают на себя внимание следующие особенности: дефицит дефектов (t ≅ 3600–3900 с) в центральной части образца и направленность разрушения сверху вниз (Z), что в совокупности можно интерпретировать как многоочаговый характер заключительной стадии процесса.

Для проверки высказанных предположений использован статистический критерий формирования локального очага разрушения [6], сформулированный на основе используемой двухстадийной модели разрушения горных пород [7]. Согласно данному критерию, признаком начала (t1) формирования очага разрушения является одновременное уменьшение средних временных интервалов (Δt) между хронологически последовательными событиями и увеличение их коэффициента вариации (VΔt). Потеря очагом устойчивости (t2) приводит к образованию более крупного дефекта и может характеризоваться резким увеличением выделяемой мощности АЭ. Последующая релаксация очаговой области (t3) сопровождается одновременным обратным изменением временных, статистических параметров. Рассматриваемый образ очага разрушения может быть выделен только при выполнение двух условий: анализируются не все АЭ-события (рис. 3,а), а только относящиеся к данной очаговой области (пространственная селекция), и их амплитуда соответствует двум соседним рангам разрушения (амплитудная селекция), что вытекает из иерархических представлений о разрушении горных пород [9].

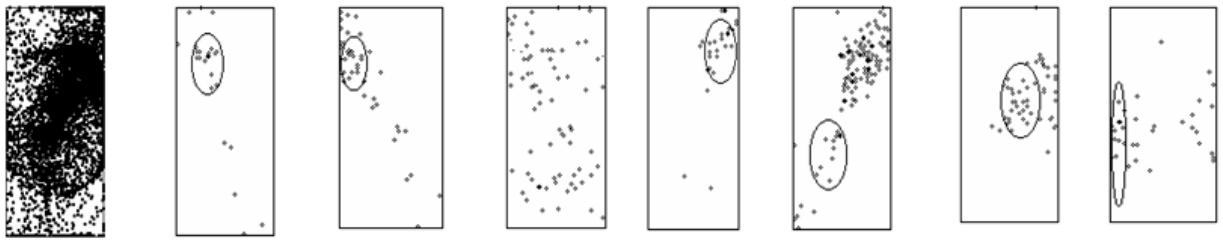


Рисунок 3 - Пространственное распределение источников АЭ (проекция ZY):
а – t = (0–4145) с, M – все; б – t = (1770–1920) с, M – все; в – t = (2160–2208) с, M – все;
г – t = (2300–3450) с, M – все; д – t = (3590–3635) с, M ≥ 7; е – t = (3790–3860) с, M ≥ 7;
ж – t = (4010–4050) с, M ≥ 7; з – t = (4130–4133) с, M – все

Используя вышеописанный критерий, удалось выделить на начальной стадии деформирования два хронологически последовательных (t = 1906 с и t = 2205 с), локальных очага разрушения в верхней левой (проекция ZY) части образца (рис. 3, б, в). Согласно характерному изменению статистических параметров, длительность нестационарного развития (Δτ = t2 – t1) первого очага составила 4 с, а второго 6 с. После стабилизации второго очага (t = 2265 с) наблюдается уменьшение интенсивности АЭ (долговременное увеличение Δt) и переход к дисперсному зарождению дефектов в интервале t ~ 2300–3500 с (рис. 3, д). К моменту времени 3500с завершается дисперсная стадия процесса и разрушение локализуется в верхней правой части образца под углом ≈30 к оси цилиндра (рис. 3, д). Продолжительность стадии формирования очага составила Δτ = 39 с (рис. 4). Выявить очаг удается только при амплитудной селекции (M ≥ 7) анализируемых явлений. После потери очагом устойчивости (t = 3631 с) в его пространственной области и на его периферии продолжается процесс образования дефектов, формирующих плоскость макроразрыва. В момент времени t = 3847 с в формирующейся плоскости макроразрыва в нижней части образца (M ≥ 7, Δτ = 12 с)

теряет устойчивость следующий локальный очаг (рис. 3, е). Третий, последний локальный очаг в плоскости макроразрыва выделяется в средней части образца ($M \geq 7$, $\Delta\tau = 7$ с) в момент времени t = 4049 с (рис. 3, ж). Далее процесс разрушения делокализуется по всей плоскости макроразрыва, который предположительно выходит на боковую поверхность образца (рис. 3, з) за 20 с до разрушения образца.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе используемой двухстадийной модели разрушения горных пород и полученных АЭ-данных можно описать кинетику разрушения образца в рассматриваемом эксперименте. На начальной стадии нагружения процесс разрушения практически сразу локализовался в левой верхней части образца. Используя статистические временные параметры потока дефектов, авторы выявили две соседние пространственные области, в которых со сдвигом во времени сформировались два локальных очага разрушения. Несмотря на выраженную локализацию процесса, подготовка и развитие этих очагов осуществляется в виде двух стадий: квазистационарного накопления дефектов и собственно очаговой, нестационарной. Для выделения этих очагов не потребовалась амплитудная селекция АЭ-событий с малыми амплитудами. Это свидетельствует, что на этой стадии деформирования разрушение не вышло на максимально возможный в данном образце ранг [5]. Данный вывод подтверждается, согласно условию (1) [4], малыми (соответственно 4 и 6 с), значениями длительности нестационарной стадии процесса ($\Delta\tau$) при условии малой нагрузки:

$$\log \Delta\tau = a \log M + b. \quad (1)$$

Появление этих локальных очагов на начальной стадии деформирования объясняется исходной дефектностью образца и, как следует из анализа кинетики процесса, непосредственно не приводит к его макроразрушению. Активности разрушения в данной области в дальнейшем не наблюдается.

После стабилизации очаговых областей процесс зарождения дефектов делокализуется по всему объему образца до момента t ~ 3540 с. К этому времени в правой верхней части образца достигается плотность дефектов, достаточная для зарождения нового локального очага разрушения, который оказывается первым звеном в формировании плоскости макроразрыва, на что указывает его ориентация относительно оси цилиндра. Для его выделения потребовалась амплитудная селекция ($M \geq 7$), что, в совокупности с бóльшим значением $\Delta\tau = 39$ с, свидетельствует о переходе разрушения на более высокий уровень процесса. Зародившаяся плоскость макроразрыва является зоной повышенных локальных напряжений, что стимулирует зарождение в ней новых дефектов, а следовательно, может приводить к появлению новых локальных очагов. Такой очаг со сдвигом по времени относительно предыдущего появляется в нижней части образца в области макроразрыва. Потеря им устойчивости приводит к дальнейшему развитию плоскости макроразрыва. Фактическое формирование этой плоскости завершается разрушением образовавшейся перемычки между рассмотренными очаговыми зонами в центральной части образца. Этот процесс также является кинетическим и проходит в две стадии: стационарной в локализованной области и нестационарной, очаговой. К этому моменту времени макроразрыв уже вышел на свободную поверхность в верхней части образца, о чем свидетельствует резкое снижение активности АЭ в этой зоне. После потери последним очагом устойчивости разрушение делокализуется по всей плоскости макроразрыва, сопровождается началом непрерывного падения внешней нагрузки (t = 4063,05 с) и приводит к атермическому долому образца. Выход макроразрыва на боковую поверхность образца в нижней его части предположительно происходит за 30…20 с до концаэксперимента и по времени совпадает с регистрацией электростатического потенциала.

В заключение анализа кинетики разрушения образца представляет интерес отметить следующее обстоятельство. Период времени нестационарной очаговой стадии

разрушения ($\Delta\tau$) для рассмотренных трех локальных очагов в плоскости макроразрыва последовательно уменьшается (39, 12, 7 с). При условии, что дефектообразование в них относится к одному и тому же рангу процесса, используется одна и та же амплитудная селекция для их выделения ($M \geq 7$), ускорение формирования очага можно объяснить увеличением локальных напряжений вследствие уменьшения живого сечения в процессе развития плоскости макроразрыва.

На основе результатов по деформированию природных диэлектриков, полученных в работе [10-16], было сделано предположение о возможности индуцирования электростатического поля градиентом внутренних напряжений в горных породах. Для проверки этого предположения проводился принудительный сброс нагрузки (рис. 2), вызывающий резкое изменение внутренних напряжения в образце. Но, как уже отмечалось выше, электростатический потенциал был зарегистрирован только в конце эксперимента. Первоначальное плавное отклонение от нулевого значения ($t \cong 4126$ с) сменяется резким изменением, и в момент времени 4133,5 с начинается релаксация возникшего поля. Изменение электростатического потенциала нельзя объяснить уменьшением зазора между антенной электрометра и поверхность образца в результате деформации последнего. Макроскопическая деформация образца началась раньше ($t \cong 4109$ с) и не привела к возникновению электростатического поля. Его появление по времени совпало с выходом плоскости макроразрыва на свободные грани образца (рис. 3, з), т.е. его разделением на части с образованием новых поверхностей. В работах [17-19] экспериментально исследована электризация при раскалывании ионных кристаллов и сделан вывод о том, что электростатическое поле возникает в результате образования противоположных по знаку зарядов на вновь образовавшихся поверхностях кристалла. Аналогичное объяснение можно предположить и в данном эксперименте. Очевидно, что на основании единственного эксперимента нельзя сделать однозначного вывода о механизме возникновения рассматриваемого эффекта, поэтому вышеприведенные рассуждения можно рассматривать только в качестве рабочей гипотезы.

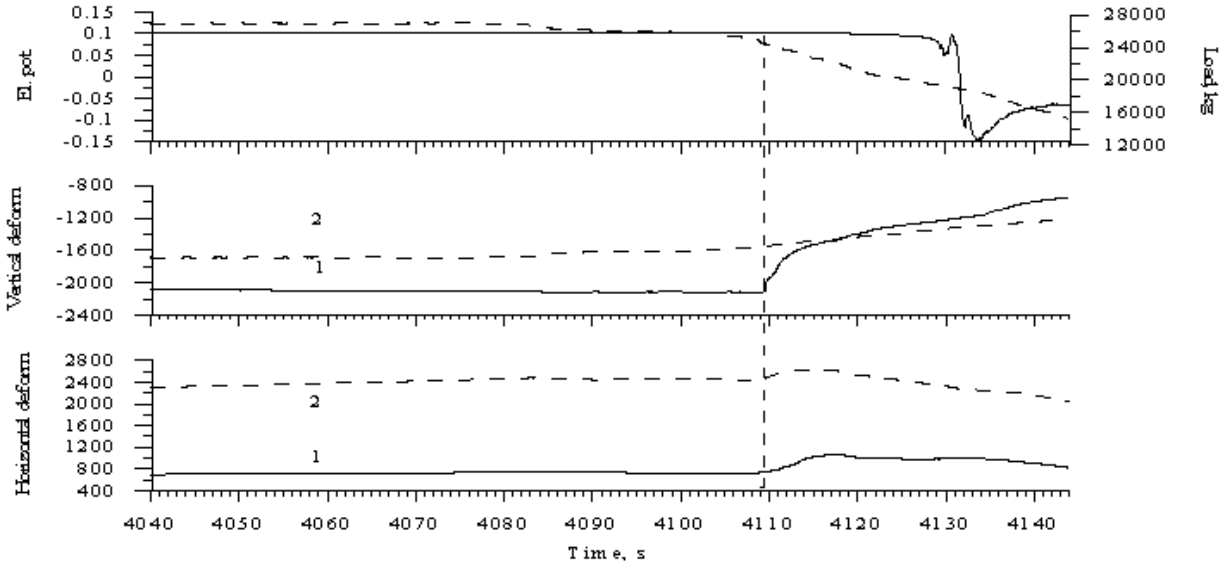


Рисунок 4 - Временные зависимости среднего значения временных интервалов (1), их коэффициента вариации (2) и выделяемой мощности АЭ (3)

ВЫВОДЫ:

Разрушение образца развивается в соответствии с основными положениями двухстадийной модели процесса: как на начальной стадии деформирования, при формировании локальных очагов разрушения, так и на стадии формирования плоскости макроразрыва.

Возникновение электростатического потенциала регистрируется только за 20 с до окончательного разрушения и по времени совпадает с выходом плоскости разрушения на боковую поверхность.

Одно из возможных объяснений механизма зарегистрированного эффекта заключается в появлении противоположных по знаку зарядов на образовавшихся в результате раскола новых свободных поверхностях образца.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Носов В.В., Махмудов Х.Ф.* Контроль прочности неоднородных материалов и метод акустической эмиссии. Актуальные научные исследования в современном мире, 2017. № 10-4 (30). С. 108-125.
2. *Носов В.В., Махмудов Х.Ф.* Структурной неоднородностью материала и неоднородностью поля механических напряжений, и число единичных импульсов акустической эмиссии (АЭ). Актуальные научные исследования в современном мире, 2017. № 10-4 (30). С. 126-144.
3. *Kuksenko V.S., Makhmudov K.F.* 2017 Fracture in heterogeneous materials: experimental and theoretical studies *Russian Geology and Geophysics* 58(6) 738-743.
4. *Kuksenko V.S., Makhmudov K.F., Manzhikov B.T.* 2010 Damage accumulation model for solids and the catastrophy prediction for large-scale objects *Journal of Mining Science* 46(4) 384-393.
5. *Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф.* Физические основы акустико-эмиссионного мониторинг. Актуальные научные исследования в современном мире, 2017. № 10-4 (30). С. 145-152.
6. *Kuksenko V.S., Tomilin N.G., Makhmudov Kh.F., Benin A.V.* 2007 Predicting the loss of stability of loaded structural elements using the method of acoustic emission Technical *Physics Letters* 33(1) 62-64.
7. *Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Манжиков Б.Ц.* Концентрационная модель разрушения твердых тел и прогнозирование катастрофических ситуаций крупномасштабных объектов. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2010. № 4. С. 29-40.
8. *Makhmudov Kh.F.* 2019 Wire-free method of measurements of weak electrostatic values under stationary and dynamic conditions *International Conference Physic A.SPb / J. Phys.: Conf. Ser.* 1400(7) 077057.
9. Мансуров В.А., Султонов У., Рустамова М.З., Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф. Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2009. № 4. С. 55-59.
10. *Makhmudov K.F.* 2011 Thermoactivation mechanism of relaxation of the mechanoelectric effects in solid dielectrics *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* 56 1. 72-77.
11. *Kuksenko V.S., Makhmudov Kh.F.* 2004 *E*ffect of mechanical stress on the polarization of natural dielectrics (rocks) *Technical Physics Letters* 30 7 612-614.
12. *Makhmudov Kh.F., Kuksenko V.S.* 2005 Electromagnetic phenomena entailed by deformation and fracture of dielectric solids *Physics of the Solid State* 47 5 882-8825.
13. *Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Makhmudov Kh.F., Ponomarev A.V.* 1997 The effect of a mechanical field on the polarization of rocks *Doklady Physics* 42 8 420-422.
14. *Савельев В.Н., Махмудов Х.Ф.* Исследование акустических свойств массива гетерогенных пород и бетонной обделки в натурных условиях / ЖТФ, 2020. Т.90 1 143-148.
15. *Kuksenko V.S., Makhmudov K.F., Mansurov V.A., Sultonov U., Rustamova M.Z* 2009 Changes in structure of natural heterogenous materials under deformation *Journal of Mining Science* 45 4 355-358.
16. *Makhmudov Kh.F., Menzhulin M.G., Zakharyan M.V., Sultonov U., Abdurakhmanov Z.M.* 2015 Diagnostics of the loss of stability of loaded constructions and the development of the sites

of breakdown during the action of seismic explosion and air shock waves *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 60 11 1651-1657.
17. *Shcherbakov I.P., Vettegren V.I., Mamalimov R.I., Makhmudov K.F*. 2019 Shockwave-Initiated Emission of Ions from Stressed Granite *Tech. Phys*. 64 3 352-355.
18. *Menzhulin M.G., Makhmudov K.F*. 2019 Analysis of the Dependence of the Break-Down Point on Temperature of Microwave Heating of Loaded Heterogeneous Materials (Rocks) Based on the Formation of Growth of Microcracks *Tech. Phys*. 64 5 615-619.
19. *Shcherbakov I.P., Vettegren V.I., Mamalimov R.I., Makhmudov K.F*. 2018 Mechanism and Dynamics of Fracture of the Stressed Granite Surface by a Shock Wave *Tech. Phys*. 63 7 979-983.

УДК 620.191;678.

МАХМУДОВ Х.Ф
ЩЕРБАКОВ И.П.
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

МЕТОД ФРАКТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И НАНОСЕКУНДНАЯ ДИНАМИКА ИМПУЛЬСОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ, ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН

Аннотация. Построена установка, позволяющая одновременно регистрировать с временным разрешением 10 ns фрактолюминесценцию, электромагнитную эмиссию и деформацию поверхности твердого тела, возникающие при его разрушении под действием ударной волны. На ней исследованы временные зависимости деформации и разрушения пластинки гранита, вызванной электрическим пробоем с энергией 0,2 J в воздухе около ее поверхности. Впервые применили метод фрактолюминесценции для исследования разрушения кварца, гранитов и мрамора под влиянием электрического разряда около их поверхности. Она возникает при релаксации электронного возбуждения через несколько нс после разрыва химических связей. Анализ спектров люминесценции показал, что во время пробега ударной волны часть горной породы испаряется с вылетом ионизированных атомов и электронов.

Ключевые слова: фрактолюминесценция, наносекундная динамика, люминесценция, ударной волны, деформация.

MAKHMUDOV KH.F.,
SHCHERBAKOV I.P.
Institute of physics and technology. A.F. Ioffe RAS,
Saint Petersburg, Russia

FRACTOLUMINESCENCE METHOD AND NANOSECOND DYNAMICS OF LUMINESCENCE PULSES, GEOMATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF SHOCK WAVES

Abstract. A device has been built that allows simultaneous recording of fractoluminescence, electromagnetic emission, and deformation of the solid surface that occurs when it is destroyed by a shock wave with a time resolution of 10 ns. The time dependences of deformation and destruction of a granite plate caused by an electric breakdown with an energy of 0.2 J in the air near its surface were studied. For the first time, the fractoluminescence method was used to study the destruction of quartz, granites and marble under the influence of an electric discharge near their surface. It occurs when the electronic excitation is relaxed a few NS after the chemical bonds are broken. Analysis of luminescence spectra showed that during the shock wave run, part of the rock evaporates with the departure of ionized atoms and electrons.

Keywords: photoluminescence, nanosecond dynamics of, luminescence, shock wave, deformation.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени достигнуты большие успехи в области исследования механизма деформации твердых тел под действием ударных волн [1-4]. Механизм разрушения исследован меньше, о нем судили по результатам исследования поверхности

образцов, полученных при тыльном отколе или по изменению скоростной зависимости профиля поверхности при образовании трещин. Нам впервые удалось исследовать механизм разрушения геоматериалов непосредственно во время действия ударной волны. Эти исследования позволили предложить новый механизм разрушения твердых тел при воздействии ударных волн. Методы акустической и электромагнитной эмиссии широко используются для исследования деформации и разрушения горных пород. В последнее время к ним добавился метод фрактолюминесценции, позволяющий исследовать разрывы связей [5-8] . Конструкция установки, использованной для исследования ФЛ, АЭ и ЭМЭ при ударе представлена на рис. 1.

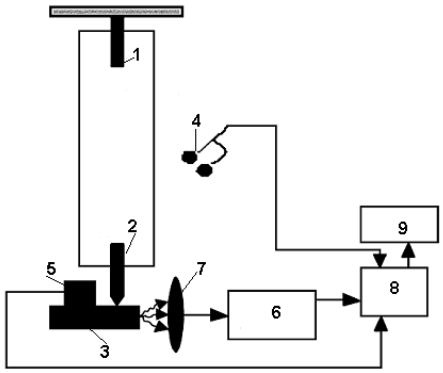


Рисунок 1 - Конструкция установки, использованной для исследования ФЛ, АЭ и ЭМЭ при ударе

Эмиссии возбуждали ударом груза - 1 массой 100 Г, падающего с высоты ≈ 10 см на стальной боек - 2, расположенный на поверхности образца - 3 в его центре. Возникающее излучение фокусировалось на поверхность катода фотоэлектронного умножителя (ФЭУ-136) - 6. Для регистрации ЭМЭ около образцов помещали диполь Герца - 4 с длиной плеча ≈ 50 см. Для измерения скорости волн деформации образцов, на их поверхность на расстоянии 3 мм от места внедрения бойка, устанавливали квадратную пластину из пьезокерамики (CTS – 19) - 5, длина ребер которой составляла 4 мм. Электрическое напряжение на выходе ФЭУ-136, пластине CTS – 19 и диполе Герца подавалось на входы аналогово-цифрового преобразователя –8 (АЦП) ASK – 3106 фирмы «АКТАКОМ» с полосой пропускания 100 МГц. Система запускалась в момент касания груза по бойку. Напряжение на выходе АЦП, через каждые 10 нс в течении 1.3 млс записывалось в память компьютера - 9. Образцами служили кубики из ладожского гранита и мрамора с длиной ребер 20 мм.

МЕТОДЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Однако до сих пор не проводилось совместных исследований этими методами динамики деформации и разрушения горных при воздействии на них ударных волн. В данной работе впервые проведены исследования динамики деформации и разрушения монокристаллов кварца и гранита методами акустической, световой и электромагнитной эмиссии при воздействии на них ударной волны, вызванной электрическим взрывом в этих геоматериалах. Построена оригинальная установка и впервые получены спектры люминесценции гранита, кварца и мрамора под действием ударной волны, вызванной электрическим разрядом в воздухе. Для исследования динамики деформации и разрушения гранита была построена другая оригинальная установка. В ней с интервалом 10 нс одновременно регистрировались временные зависимости интенсивности механолюминесценции, амплитуды деформации образцов геоматериалов по величине напряжения пьезодатчтков на их поверхности и на диполе Герца (радиоантенне), возникающего вследствие пьезоэффекта (рис. 2).

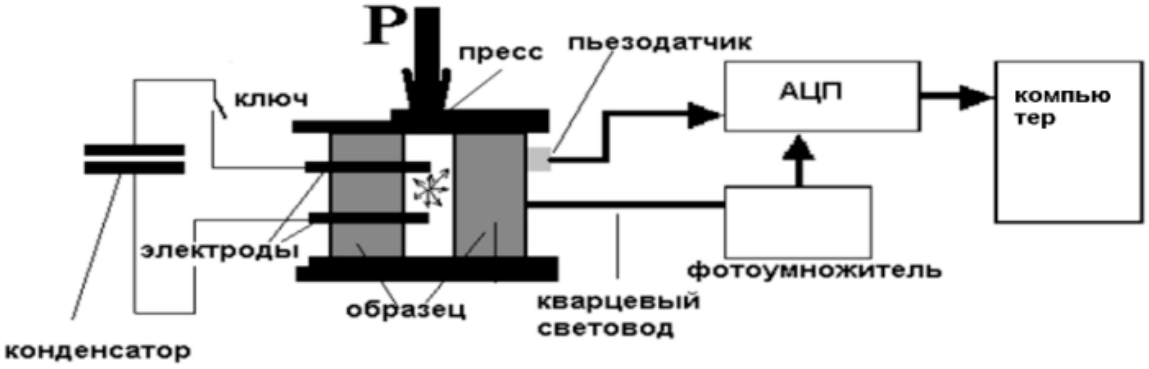


Рисунок 2 - Схема эксперимента

Впервые показано, что при нагружении со скоростями выше скорости звука дислокационный механизм образования микротрещин отсутствует и его место занимает механизм разрушения путем выделения положительно заряженных ионов из искаженных областей кристаллической решетки минералов. Проведено две серии экспериментов с каждым из объектов исследования. Цель первой серии заключалась в том, чтобы при электрическом взрыве около поверхности образца создать ударную волну, получить спектры люминесценции плазмы и исследовать ее состав. Для ее достижения была построена установка, в которой конденсатор емкостью 40 мкФ заряжался до 2 кВ, что соответствует запасенной энергии 80 Дж. После разряда конденсатора с поверхности образцов вылетали струи плазмы длиной до ~ 0,8 м. Излучение плазмы попадало на вход кварцевого световода, второй конец которого располагался перед входным окном спектрометра AvaSpec-ULS3648. Это позволило получить детальные спектры плазмы, время существования которой составляло несколько мкс. Проследить за динамикой фрактолюминесценции в таких условиях не удалось, поэтому во второй серии экспериментов емкость конденсатора и вторичная обмотка трансформатора были подобраны таким образом, чтобы за время измерения разряд не приводил к разрушению образца на фрагменты, и можно было плавно менять мощность ударной волны. Как показали измерения, энергия разряда, удовлетворяющая такому условию, составляет ~ 0,2 Дж, а мощность – 2·105 Вт. Для исследования временной зависимости выделяемой при разряде энергии, использовали пояс Роговского, соединенный с емкостью на входе аналогоцифрового преобразователя. Это позволило измерить временную зависимость тока и мощности, выделяемой при горении дуги. Колебания образца под действием ударной волны регистрировали с использованием пластины из пьезокерамики ЦТС-19 с линейными размерами 2×2 мм, толщиной 1 мм. Для изучения временной зависимости выделения струй плазмы перед образцом устанавливали один из концов кварцевого световода, а второй конец располагали перед поверхностью фотокатода фотоэлектронного умножителя ФЭУ-136. Напряжения на пьезокерамике и выходе фотоумножителя подавали на вход аналогоцифрового преобразователя - АСК-3106 и через каждые 10 нс записывали в память компьютера для дальнейшего анализа и обработки. В результате впервые с временным разрешением 10 нс удалось проследить за последовательными актами разрушения, время существования каждого из которых не превышало несколько нс.

ДИНАМИКА ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ТЕЛА (ГРАНИТА) ПОД ВЛИЯНИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН

Ударную волну возбуждали электрическим разрядом в воздухе около поверхности пластинок. Оказалось, что ударная волна вызывает выделение нескольких сотен струй плазмы длина которых достигает несколько десятков сантиметров. Интенсивность струй варьирует в несколько десятков раз. Время выделения каждой струи меньше 10 нс. Среднее значение интервала времени между их выделением составил 45 мкс. Анализ

спектра показал, что плазма состоит из возбужденных положительно заряженных ионов и атомов Si, O, Ca, Al, Fe, N. Атомы Si, O, Ca и Al входящих в состав структурной формулы кварца и гранитов [9-11].

ДИНАМИКА ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ТЕЛА (ГРАНИТА) ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Построена установка, позволяющая одновременно регистрировать с временным разрешением 10 ns фрактолюминесценцию, электромагнитную эмиссию и деформацию поверхности твердого тела, возникающие при его разрушении под действием ударной волны. На ней исследованы временные зависимости деформации и разрушения пластинки гранита, вызванной электрическим пробоем с энергией 0,2 J в воздухе около ее поверхности. Найдено, что пробой вызывает появление в граните ударной волны, скорость которой составляет ~ 5 km/s. Ударная волна вызывает выделение с ее поверхности плазмы, состоящей из атомов и ионов, входящих в состав гранита. Предполагается, что появление плазмы вызвано кумуляцией энергии ударной волны в микропорах, содержащихся в граните [12].

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАРЦА ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

При разрушении кварца под действием ударной волны, вызванной электрическим взрывом, образуется плазменная струя. Анализ спектра люминесценции показал, что она состоит из атомов и катионов элементов, которые входят в состав кварца и примесей в нем.

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ГРАНИТА ПОД ВЛИЯНИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Показано, что при сильных искажениях кристаллической решетки в скоплениях дислокаций возможно пересечение электронных уровней основного и возбужденного состояний межатомных связей. Это может приводить к их ионизации и распаду, вызывающему выделение положительно заряженных ионов. Плазма, вылетающая из гранита, тоже состоит из положительных ионов.

Это позволяет предложить следующий механизм разрушения гранита под действием ударной волны. Пробегая через скопления дислокаций или около других сильных искажений кристаллической решетки минералов, эта волна «дотягивает» деформированные межатомные связи до их распада, в результате которого из гранита вылетают положительно заряженные ионы. Этот механизм не включает в себя явление зарождения и роста микротрещин путем последовательного разрыва связей под влиянием термических флуктуации. Разрушение происходит атермическим путем и не зависит от температуры и скорости нагружения [13].

ЭМИССИЯ ПЛАЗМЫ, ВЫЛЕТАЮЩЕЙ ИЗ ГЕТЕРОГЕННОГО ТЕЛА (ГРАНИТА) ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ОКОЛО ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

Электрический пробой воздуха около пластинки гранита вызывает последовательное выделение нескольких сотен струй плазмы, состоящей из электронов, положительно заряженных ионов и атомов Si, O и др. Длительность выделения каждой из струй не превышает ~10 ns, а величина интервала между ними изменяется от ~10 до ~300 mus. Предполагается, что ударная волна увеличивает деформацию кристаллической решетки в скоплениях дислокаций до таких значений, при которых начинают пересекаться уровни основного и возбужденного состояний. Это приводит к переходам между электронными уровнями, распаду межатомных связей и вылету положительно заряженных ионов и электронов [14].

ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ КВАРЦА ПОД ВЛИЯНИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

С использованием метода инфракрасной Фурье-спектроскопии исследовано строение осколка, образовавшегося после разрушения монокристалла кварца под действием ударной волны. Волна инициирована электрическим пробоем воздуха в отверстии внутри монокристалла. Установлено, что на поверхности осколка образовался слой толщиной ~0.15 mum, состоящий из «диаплектического стекла» - кварца с сильно искаженной кристаллической решеткой. Под ним располагается слой толщиной ~2 mum, в котором кристаллическая решетка кварца сжата.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОГЕННОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА (ГРАНИТА)ПОД ВЛИЯНИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Методами инфракрасной, рамановской и фотолюминесцентной спектроскопии исследовано строение двух видов гранитов (плагиогранита и аляскита) до и после воздействия ударной волны. Установлено, что ударная волна вызвала трансформацию кристаллов кварца и полевых шпатов, из которых состоят эти граниты, в диаплектические стекла [15].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адушкин В.В., Спивак А.А.* Геомеханика крупномасштабных взрывов. - М.: Недра, 1993. - 319 с.
2. *Фортов В.Е.* Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества / Успехи Физических Наук, 2007. Т.177. Вып. 4. С. 347-368.
3. *Kanel G.I., Razorenov S.V., Fortov V.E.* Shock-Wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter. N.Y.: Springer. 2004. 322 p.
4. *Малыгин Г.А. Огарков С.Л. Андрияш А.В.* Дислокационно-кинетическая модель формирования и распространения интенсивных ударных волн в кристаллах / Физика твердого тела, 2013. Т. 55. Вып. 4. С. 721–728.
5. *Веттегрень В.И., Воронин А.В., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П.* Люминесценция кварца под действием ударной волны / ФТТ, 2014. Т.56 (2). С. 315-317.
6. *Веттегрень В.И., Воронин А.В., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П.* Динамика деформации и разрушения гетерогенного тела (гранита) под влиянием электрического разряда / ФТТ, 2014. Т.56 (5). С. 981-985.
7. *Менжулин М.Н., Махмудов Х.Ф.* Анализ зависимости предела прочности от температуры сверхвысокочастотного нагрева нагруженных гетерогенных материалов (скальных пород) на основе образования роста микротрещин / ЖТФ, 2019. Т.89(5). С. 665-669.
8. *Махмудов Х.Ф.* Всследование динамики роста трещин в угленосных породах при импульсных воздействиях / Современные наукоемкие технологии, 2015. № 12-3. С. 426-428.
9. *Менжулин М.Н., Махмудов Х.Ф.* Термокинетическая модель разрушения гетерогенных материалов и особенности ее численной реализации при воздействии высокочастотными электромагнитными полями / Журнал технической физики, 2017. Т. 87. № 7. С. 1040-1048.
10. Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Щербаков И.П Термокинетическая модель и динамика микротрещин в горных породах. физика конденсированных сред. LAMBERT Academic Publishing. 2014, стр. 68, ISBN: 978-3-659-50302-3.
11. *Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Щербаков И.П.* Термокинетическая модель формирования дефектов и динамика микротрещин в горных породах. Коллективная монография: в 9-ти томах. Под научной редакцией О.П. Чигишевой. - Ростов-на-Дону, 2014. Т.3. С. 159-187.

12. *Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х.Ф.* Иициированная ударной волной эмиссия ионов из напряженных гранитов / Журнал технической физики, 2019. Т. 89. № 3. С. 388-391.
13. *Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х.Ф.* Динамика разрушения напряженных гранитов под влиянием ударной волны / В сборнике: Восемнадцатая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» , 2017. С. 334-336.
14. *Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х.Ф.* Наносекундная динамика разрушения напряженного гранита под влиянием ударной волны / Журнал технической физики, 2017. Т. 87. № 8. С. 1182-1184.
15. *Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х.Ф.* Влияние напряжения на эмиссию ионов, инициированных ударной волной из гетерогенного материала (гранита) / Физика твердого тела, 2017. Т. 59. № 3. С. 556-558.

УДК 621.793: 620.199: 001.18

НОСОВ В.В.
Санкт-Петербургский Горный университет
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Аннотация. Рассмотрены вопросы оптимизации нормативных документов, методического и программного обеспечения средств акустико-эмиссионного контроля и диагностирования в современных условиях интеллектуализации и цифровизации. В центре внимания при разработке нормативных документов должен стоять результат применения метода акустической эмиссии (АЭ) её пользователями, которые основное его назначениевидят в диагностировании и оценке ресурса объекта контроля. Данный критерий совершенствования методического обеспечения не всегда строго выдерживается и сводится к обоснованию благоприятных условий разработки, изготовления и реализации акустико-эмиссионных приборов, информационно-измерительных систем и комплексов.Отмечено повышение роли интеллектуального нейросетевого подхода к решению практических задач неразрушающего контроля и диагностирования. Приведены принципы оптимизации и классификация математических моделей, применяемых при разработке систем АЭ диагностирования.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; диагностика; метод акустической эмиссии; оптимизация, математическое моделирование; оптимизация.

NOSOV V.V.
Saint-Petersburg Mining University
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

METHODOLOGICAL ASPECTS OF ACOUSTIC EMISSION CONTROL

Abstract. The issues of optimization of regulatory documents, methodological and software of acoustic emission monitoring and diagnostics in modern conditions of intellectualization and digitalization are considered. The focus on the development of regulatory documents should be the result of the application of the method of acoustic emission (AE) by its users, who see its main purpose in diagnosing and evaluating the resource of the monitoring object. This criterion for improving methodological support is not always strictly adhered to and is reduced to justifying favorable conditions for the development, manufacture and sale of acoustic emission devices, information-measuring systems and complexes. An increase in the role of an intelligent neural network approach to solving the practical problems of non-destructive testing and diagnosis is noted. The principles of optimization and classification of mathematical models used in the development of AE diagnostic systems are given.

Keywords: non-destructive testing; diagnostics; acoustic emission method; optimization, mathematical modeling; optimization.

Нормативные документы призваны оптимизировать технические решения и работу специалистов [1]. В центре внимания при разработке нормативных документов должен стоять результат применения метода акустической эмиссии (АЭ) её пользователями, которые основное его назначениевидят в диагностировании и оценке ресурса объекта контроля. Данный критерий совершенствования методического обеспечения не всегда

строго выдерживается исводится к обоснованию благоприятных условий разработки, изготовления и реализации акустико-эмиссионных приборов, информационно-измерительных систем и комплексов.

Показательно рассмотрим противоречия с формулированного в п. 2.53 [2] определения «акустико-эмиссионный образ-характерный набор воспроизводимых признаков сигналов АЭ, относящийся к конкретному объекту, контролируемому определенной акустико-эмиссионной аппаратурой при регламентированных условиях контроля». Во-первых, это образ сигнала, отдалённый от проблемы АЭ оценки состояния объекта, его излучающего. Во-вторых, привязываться к АЭ аппаратуре и условиям контроля - значит делать этот образ неустойчивым к влиянию дестабилизирующих факторов, а значит не информативным для диагностирования, а набор признаков сигналов АЭ - не воспроизводимым. Модель (образ) должна быть информативной, тогда она становится базой для решения проблемы. Поэтому предлагается определение: «Акустико-эмиссионный образ - это модель объекта, излучающего сигналы АЭ, параметры которой связаны с параметрами сигналов АЭ, функциональными характеристиками, параметрами состояния или ресурсом объекта контроля, которые могут быть определены независимо от аппаратуры АЭ и конкретных условий АЭ испытаний». Следствием неверного понимания образаявляется смешивание определений контроля и диагностики, отдаляющее от понимания важности диагностических моделей и некорректное назначение единиц измерения контролируемых сигналов. В частности, примечание к п. 3.8. [3] «Амплитуду сигнала акустической эмиссии измеряют в вольтах» следует заменить на «Амплитуду сигнала акустической эмиссии измеряют в децибелах», как игнорирующее процедуру преобразования акустического сигнала в электрический, поскольку в вольтах измеряется только электрический сигнал, акустический сигнал-упругие механические колебания, измеряются в метрах. Для решения проблемы предлагается использовать сформулированные в [4] принципы информационной оптимизации диагностирования.

Особенностью промышленной революции в современных условиях цифровизации является повышение роли интеллектуального нейросетевого подхода к решению практических задач [5, 6]. При детальном анализе решения сложных оптимизационных задач становится очевидной абсолютность неопределённости и относительность лишь степени её допустимости. Снять неопределённость можно только информацией, а приблизиться к желаемому результату (цели) – двигаясь в направлении, определённом на основе достоверной оптимизирующей информации. Лучшей формой такой информации являются количественные сведения, получаемые с помощью математического моделирования. Применительно к задаче неразрушающего контроля и технической диагностики это предполагает ориентацию методов оптимизации информационно-измерительных систем на построение универсальных многоуровневых математических моделей, пригодных для обеспечения выработки ценной измерительной или диагностической информации. Например, прочностной ресурс существенно неопределен и связан с неопределённостью не только напряжённого состояния, но и другими не менее значимыми факторами, влияющими на процесс накопления во времени повреждений материала. Разброс (неопределённость) ресурса связан со структурной и силовой неоднородностью (технологические факторы), статистической природой термических флуктуаций (физико-статистические факторы). Неопределённость ресурса затрудняет выработку решений, обеспечивающих безопасность и рентабельность производства, то есть оптимизирующих производственные процессы. Прогнозирование остаточного ресурса является актуальной общетехнической сверхзадачей диагностирования, сложно решаемой по причине существенного влияния и трудности учёта фактора времени.

Сложность перехода от реального объекта к его модели и обратно представляют основную проблему в организации мыслительного процесса и построении математических моделей. Для решения проблемы необходимо раскрыть содержание, форму и условность перехода, многовариантность возможного и недостижимость

абсолютно точного решения, связь погрешностей решения и методов их минимизации с этапами абстрагирования. Идеальное решение само по себе условно и в соответствующей степени также неопределенно из-за ограниченного осознания (неосознанной неопределённости) объекта, цели и задач решения. Методологической основой для достижения цели являются принципы информационной оптимизации [7-8]:

1. Принцип неопределённости. Реальный объект (сигнал, объект диагностирования, исследования, изучения и пр.) бесконечно сложен, в значительной степени недоступен, скрыт, не определён. Неопределённость абсолютна, относительна только степень её осмысления и допустимости.

2. Принцип вариативности (квантования неопределённости). Абсолютно точный диагноз невозможен, абсолютно точная расшифровка сигнала или распознавание состояния технического объекта не достижимо и в действительности может быть получено только несколько приближающихся к нему вариантов диагноза, количество которых (квантов неопределённости) задаёт степень осознанной неопределённости решения диагностической задачи и предполагаемую точность диагноза.

3. Принцип информативности. Поиск оптимального решения задач диагностики происходит посредством обоснованного выбора наиболее предпочтительного (оптимального) из вариантов диагноза на основе рациональной генерации снижающих неопределённость сведений (информации) об объекте диагностирования.

4. Принцип информативного моделирования (преемственности, последовательности, иерархичности и законченности). Генерация (выработка) информации производится посредством определения параметров математических моделей, полученных в результате последовательного построения и логически обоснованного переходаот взаимосвязанных и иерархически подчинённых задачам диагностирования моделей объекта контроля по порядку убывания их информативности с повышением уровня абстрагирования.

Каждый из перечисленных принципов подчинён предыдущему. Доминирует принцип неопределённости, особенно актуализируемый в эпоху цифровизации и угрожающей технологической сингулярности. На осознание и снижение неопределённости должен быть направлен процесс разработки средств контроля и технического диагностирования, однако полностью неопределённость неустранима и всегда присутствует. Социально-экономическое осознание достаточности снижения неопределённости задаёт допустимую неопределённость - квант неопределённости. Неопределённость квантуется, а полученное количество квантов неопределённости (вариантов решения реальной задачи) формируется степень осознанной неопределённости получаемого решения. В отличии от общей неопределённости, эта степень уже конкретна, всегда ограничена и, применительно, например, к измерениям, равна отношению измеряемого диапазона к цене деления шкалы прибора или измерительного инструмента. Информативность (количество информации) определяется соотношением диапазона и кванта неопределённости и рассчитывается по формулам теории информации (Шеннона, Хартли). Для выбора предпочтительного варианта в процессе исследования необходимо добывать только информативные сведения, достаточные для снятия неопределённости в осознанной степени, а сведения, не выполняющие эту функцию, должны отбрасываться (отфильтровываться), как избыточные (шум), усложняющие решение задач. Принципы информационной оптимизации создают потребность в формировании вектора информативной преемственности (вариативно-преемственной предпочтительности). Получаемые в процессе исследования или обучения компетенции должны обеспечить информативную фильтрацию сведений и способствовать формирования этого вектора, направляющего в построении моделей,связующего между принципами информационной оптимизации**.** Главным свойством моделиобъекта изучения становится её информативность, делающая адекватность, как способность получать решение с заданным квантом неопределённости, производной от информативности и сформулированных

принципов оптимизации. Таким образом, решение задач неразрушающего контроля и диагностирования является информационным процессом генерации управляющей информации, позволяющим определиться с оптимальной конструкцией приборной системы, своевременной заменой, ремонтом или продлением срока эксплуатации объекта диагностирования.

В решении задач контроля и диагностикисложных технических объектовнаиболее практически ценными представляются диагностические модели, пригодные для прогнозирования поведения технических объектов в будущем, то есть оценки ресурса объекта контроля. Способность такой оценки должна рассматриваться, как критерий оптимизации математических моделей приборов и систем, а классифицируя модели по этому информационно-прогностическому критериюследует различать:

1. Статистические модели (регрессионные, корреляционные и др.) - количественно описывают связи между случайными величинами без раскрытия качества (физической сути) этой связи. В настоящее время получили наибольшее распространение в областях техники, характеризуемых опережающим развитием экспериментальных методов исследования и возможностью их автоматизации;

2. Эвристические модели - логико-интуитивные, логически законченные, однако существенно некорректные, полученные, чаще всего, при первом, поверхностном осмыслении имеющихся количественных связей между ранее кажущимися несвязанными факторами - основы политических социальных и астрологических прогнозов;

3. Детерминированные модели (рассматривают взаимосвязь наиболее существенных, как правило, небольшого количества факторов с установлением границ её приемлемости) - широко используются в областях традиционной классической физики, механики сплошных сред, жидкости и газа, деформируемого твёрдого тела, термодинамике, созданных в «некомпьютерные» времена, и методиках расчёта, основанных на их закономерностях (например, метод конечных элементов);

4. Детерминированно-статистические математические модели, которые одновременно описывают закономерно повторяющуюся и случайную составляющие взаимосвязи большого количества факторов. Основа современных интеллектуальных технологий, обладающих повышенной обобщающей способностью за счёт широкой структурно-статистической вариативности. Разделяются на:

- эмпирически модифицированные детерминированные модели. Модификация детерминированных моделей производится с целью расширения границ приемлемости рассматриваемых функциональных и физических связей. Примером модификации является используемое при проектировании введение в формулы прочностного расчёта различных эмпирических коэффициентов нагрузки, долговечности, и т.д.;

- структурно-вероятностные модели (основаны на введении аналитического понятия микроэлемента структуры и универсальных физических нано-констант и положений молекулярной физики, статистической и квантовой механики, микромеханики, термодинамики, математической статистики). Эти модели позволяют физически обосновать выбор наиболее значимых факторов, определить границы их значимости, установить степень прогнозируемости исследуемого явления и вероятность прогноза. Используются при разработке технологических процессов и методов диагностирования.

Оценку эффективности решения задач в области диагностики и контроля необходимовыполнять путём оценки её прогностической ценности-возможности предсказания состояния объекта в будущем и прогнозирования остаточного ресурса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система нормативных документов в строительстве.
http://www.construction-technology.ru/3/
2. ISO 12716-2001.

3. ГОСТ Р 8.965—2019 Акустико-эмиссионные приборы, информационно-измерительные системы и комплексы.
4. *Носов В.В.* Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов / Дефектоскопия, 2016. № 7. С. 52-67.
5. *Голубев С.С.* Перспективы и вызовы четвёртой промышленной революции для приборостроения и метрологии в области неразрушающего контроля и технической диагностики / XXII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике «Трансформация неразрушающего контроля и технической диагностики в эпоху цифровизации. Обеспечение безопасности общества в изменяющемся мире» Сб. тр. Москва, 3-5 марта 2020 г. – М.: Издательский дом «Спектр», 2020. - 358 с., ил, с. 17-20.
6. *Макаренко А.В.* Машинный интеллект и анализ сложных данных в задачах неразрушающего контроля / XXII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике «Трансформация неразрушающего контроля и технической диагностики в эпоху цифровизации. Обеспечение безопасности общества в изменяющемся мире» Сб. тр. Москва, 3-5 марта 2020 г. – М.: Издательский дом «Спектр», 2020. - 358 с., ил, с. 21-22.
7. *Носов В.В.* Автоматизированная оценка ресурса образцов конструкционных материалов на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии / Дефектоскопия, 2014. № 12. С. 24-35.
8. *Носов В.В.* Математическое моделирование в приборных системах. Учебное пособие. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. - 88 с.

УДК 620

НОСОВ В.В.,
АРТЮЩЕНКО А.П.
Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Аннотация. Контроль и диагностика технических объектов различных областей промышленности таких, как например: котлы, сосуды, работающие под давлением, технологические трубопроводы и т.д. направлены на обеспечение надежности, безопасности и эффективности их эксплуатации. Современные технические объекты представляют собой сложные сооружения, использование которых возможно только при наличии автоматизированных систем управления сложными техническими процессами. Эксплуатация таких систем должна быть основана на результатах технических исследований основного металла трубопроводов и металла сварных соединений. Ресурс и безопасность работы подобных технических объектов различных отраслей промышленности определяются их прочностью. Представительной характеристикой прочности и показателем одного из свойств надежности объекта является время до его разрушения, лимитируемое моментом накопления критической концентрации повреждений. Для определения времени до разрушения объекта необходимо,используя многоуровневую модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии, определить входящие в неё нанохарактеристики прочности материала. Определение данных нанохарактеристик может быть полезным в области исследований по выявлению механизмов физико-химических процессов, происходящих в материалах в периоды изготовления и эксплуатации, для последующей оптимизации технологических процессов изготовления материалов. Для обеспечения возможности доступного взаимодействия с многоуровневой моделью временных зависимостей параметров акустической эмиссии требуется проведение мероприятий по усовершенствованию существующего программного обеспечения до такого уровня, на котором программное обеспечение смогло бы обеспечить автоматизированный процесс определения нанохарактеристик прочности материала и времени до разрушения объекта с минимальной неопределенностью.

Ключевые слова: контроль; диагностика; оценка ресурса; программное обеспечение; каскадная модель; объектно-ориентированное программирование; неоднородность; повреждаемость; акустическая эмиссия; прочность; микромеханическая модель; многоуровневая модель; модель временных зависимостей параметров; диагностические параметры; технические объекты.

NOSOV V.V.,
ARTYUSHENKO A.P.
Saint-Petersburg Mining University,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

AUTOMATION OF ESTIMATION OF THE RESIDUAL RESOURCE OF TECHNICAL OBJECTS BASED ON THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

Abstract. Monitoring and diagnostics of technical objects in various fields of industry, such as

boilers, pressure vessels, process pipelines, etc. are aimed at ensuring the reliability, safety and efficiency of their operation. Modern technical objects are complex structures that can only be used if there are automated systems for managing complex technical processes. The operation of such systems should be based on the results of technical studies of the base metal of pipelines and the metal of welded joints. The service life and safety of such technical objects in various industries are determined by their strength. A representative characteristic of strength and an indicator of one of the properties of reliability of an object is the time until its destruction, limited by the moment of accumulation of critical damage concentration. To determine the time to destruction of an object, it is necessary, using a multi-level model of time dependencies of acoustic emission parameters, to determine the nanoparameters of material strength included in it. The determination of these nanoparameters can be useful in the field of research to identify the mechanisms of physical and chemical processes occurring in materials during production and operation, for subsequent optimization of technological processes for manufacturing materials. To enable accessible interaction with a multi-level model of time dependencies of acoustic emission parameters, measures are required to improve the existing software to a level where the software can provide an automated process for determining the nanoparameters of the material strength and time to destruction of the object with minimal uncertainty.

Keywords: control; diagnostics; service life estimation; software; cascade model; object-oriented programming; heterogeneity; damageability; acoustic emission; strength; micromechanical model; multi-level model; model of time dependencies of parameters; diagnostic parameters; technical objects.

Сооружение сложных технических объектов таких, как например: магистральные газопроводы, атомные энергетические установки и т.д. требует больших материальных и финансовых вложений. Недостаточная надежность подобных систем ведетк риску увеличения доли затрат по сравнению с общими затратами на проектирование, производство и применение этих систем. Кроме того, нарушение работы подобных систем приводят к очень тяжелым последствиям. Для обеспечения возможности минимизации подобных рисков ведется развитие методов диагностирования, опирающихся на разработку программного обеспечения диагностических систем, предназначенных для автоматизированного определения остаточного ресурса технических объектов и нанохарактеристик прочности материалов. Перспективным эти разработки стали на основе многоуровневой модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии. В следствие того, что из-за сложности необходимых математических вычислений актуальность многоуровневой модели временных зависимостей параметров акустической эмиссиине возрастает, разработка программного обеспечения несет с собой, в том числе, цель упроститьпроцесс взаимодействия пользователя с данной моделью. Готовое программное обеспечение должно обладать понятным и современным интерфейсом, должно обеспечивать необходимый для полноценных контроля и диагностики функционал и возможность автоматизированного определения результатов.

Многоуровневая модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии.

Поиски возможности практического использования нано технологий диагностирования для оценки состояния технических объектов выделяет среди прочих метод акустической эмиссии (АЭ) и информационно-кинетический подход к АЭ диагностированию как наиболее перспективный с точки зрения наблюдения за процессом роста повреждаемости и оптимизации производственных технологий [1-5]. Основанный на многоуровневой модели временной зависимости параметров АЭ, оценке параметров интенсивности упругого однородного разрушения представительных структурных элементов изделия и универсальных прочностных наноконстант, подход объединяет

традиционный экспериментальный подход к оценке ресурса [6-7] и кинетические представления о разрушении, позволяет отделить влияние на АЭ материала макро- и нано-факторов, по разному связанных с прочностью и акустико-эмиссионной активностью материала. В качестве АЭ характеристик прочности выступают многомодельные многоуровневые концентрационно-кинетические АЭ-показатели прочности, устойчивые к влиянию дестабилизирующих факторов АЭ контроля. Практическое применение подхода подробно описано в работах [8], где показана возможность эффективной оценки ресурса разнообразных технических объектов на основе информационно-кинетического подхода к их акустико-эмиссионному диагностированию. В качестве методологической основы взята многоуровневая модель временных зависимостей параметров АЭ, описывающая их поведение в условиях прочностной и метрологической неоднородности. Связь модели с результатами традиционных усталостных испытаний позволяет объединить результаты АЭ контроля с широкой базой справочных данных, обеспечив снижение неопределённости в оценке ресурса опасных технических объектов.

Разработка программного обеспечения ведется на основе каскадной модели (Waterfall), которая относится к классическому пониманию разработки программного обеспечения. Процесс разработки является жестким и линейным, имеет четкие цели для каждого этапа, новая фаза начинается по завершению предыдущей. Преимуществами каскадной методологии являются децентрализация и строгий контроль над сроками и качеством исполнения.

Следуя каскадной модели, разработчик переходит от одной стадии к другой строго последовательно. Сначала полностью завершается этап «определение требований», в результате чего получается список требований к программному обеспечению. После того как требования полностью определены, происходит переход к проектированию, в ходе которого создаются документы, подробно описывающие способ и план реализации указанных требований. После того как проектирование полностью выполнено, программистом выполняется реализация полученного проекта. После этого производится тестирование и отладка продукта; на этой стадии устраняются все недочёты, появившиеся на предыдущих стадиях разработки. После этого осуществляется внедрение программного продукта.

Для классической модели разработки программного обеспечения выделяют следующие этапы (рис. 1):

- *анализ требований проекта.* Определяются программные требования для информационной предметной области системы.

- *проектирование.* Разрабатывается и формулируется логически последовательная техническая характеристика программной системы. Детализация системы.

- *реализация ПО.* Воплощение полноценного проекта.

- *тестирование продукта.* Тестовая эксплуатация продукта

- *интеграция системы.* Включает установку и приёмку продукта.

- *поддержка.* Предоставление технической помощи по продукту после запуска и в процессе эксплуатации.

Рисунок 1 – Этапы разработки программного обеспечения в классической модели

Для создания программного обеспечения был выбран язык объектно-ориентированного программирования C++. Данный язык программирования обладает рядом важных преимуществ для реализации данного проекта, таких как:

- высокая производительность;
- кроссплатформенность;
- многопоточность;
- универсальность.

Ранее кафедрой приборостроения электромеханического факультета Горного университета было разработано программное обеспечение для определения нанохарактеристик прочности материалов и остаточного ресурса технических объектов, но так как задача обеспечения автоматизации процессов не была решена, необходимо дальнейшее проведение работ по разработке и оптимизации программного обеспечения.

Для описания процесса накопления повреждений используется микромеханическая модель разрушения, согласно которой временная зависимость поврежденности материала в условиях мелкодисперсного роста концентрации микротрещин C имеет следующий вид:

$$C(t) = C_0\left(1 - exp\left[-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\theta_{ср}(\bar{t})}\right]\right),$$

где t – текущее время; C_0 – начальная концентрация структурных элементов в материале до разрушения; $\theta_{ср}$ – среднестатистическое время ожидания разрушения одного структурного элемента, задаваемое формулой Журкова, при начальном условии $C(0) = 0$.

Формула Журкова в условиях растяжения при постоянстве напряжения имеет вид:

$$\theta_{ср} = \tau_0 exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right),$$

где $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с – период атомных колебания; U_0 – энергия активации процесса разрушения; γ – структурно-чувствительный коэффициент; σ – напряжение; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Из-за неоднородности структурного и напряженного состояний материала среднестатистические значения времени разрушения его структурных элементов в общем случае неодинаковы. Таким образом, для различных элементов параметр θ принимает различные значения. Для характеристики неоднородности состояния материала вводятся различные виды функции распределения параметра γ по структурным элементам $\psi(\gamma)$.

Переход к макроскопическому разрушения материала происходит, когда число разрушенных структурных элементов достигает предельного уровня, например 1% от числа начальных: $C/C_0 = 0{,}01$.

Для вычисления времени до разрушения технического объекта необходимо определить значения величин, входящих в уравнение, таких как: зависимость напряжения от времени, температуру, величину энергии активации U_0 (постоянна для конкретного материала) и параметры функции $\psi(\gamma)$. Для нахождения параметров функции $\psi(\gamma)$ используются результаты регистрации временных зависимостей информативных параметров АЭ $\xi(t)$, полученных при нагружении объекта контроля в области упругих деформаций с постоянной скоростью. Значения параметров АЭ принимают пропорциональными числу разрушенных структурных элементов.

Исходя из вышеперечисленных условий формируется многоуровневая модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии, которая имеет следующий вид:

$$N_\Sigma(t) = V \iiint_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u)\, du\, df\, d\Delta t \cdot C_0 \int_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \psi(\omega)\left\{1 - exp\left[-\int_0^t dt' / \theta\left(U_0, \omega(t')\right)\right]\right\} d\omega, \qquad (1)$$

где $\theta(U_0, \omega(t') = \tau_0 exp\{[U_0 - \gamma\sigma(t')]/(KT)\}$ – формула Журкова С.Н.

Каждый из входящих в (1) диагностических параметров имеет определённую физическую природу и зависит от различных факторов:

- параметр:

$$V\iiint_{\Delta t,f,u}\Phi(\Delta t,f,u)\ \ \mathrm{d}u\mathrm{d}f\mathrm{d}\Delta t\cdot C_0,$$

где V– контролируемый объём материала (макроуровень), $\Phi(\Delta t,f,u)$ – функция плотности распределения сигналов АЭ по длительности пауз Δt, частоте f и амплитуде u, C_0 – концентрация структурных элементов в материале, характеризует количество источников АЭ, то есть потенциально «слышимых» аппаратурой АЭ структурных элементов в материале при их разрушении (микроуровень);

- параметр U_0 (энергия активации процесса разрушения молекулярных связей) не зависит от состояния структуры материала, определяется характеристиками межатомного взаимодействия (химических связей) структурного элемента (наноуровень);

- параметр γ (активационный объём), является характеристикой молекулярной структуры (наноструктуры) материала (наноуровень);

- $\omega = \gamma\sigma/KT$ – параметр, характеризующий снижение энергии активации процесса разрушения, является прочностной нано-характеристикой структурных микроэлементов (наноуровень). Параметры γ и ω слабо чувствительны к химической природе материала;

- соотношение параметров функции $\psi(\omega)$ характеризует степень неоднородности прочностного состояния материала на молекулярном уровне.

В результате анализа требований к разрабатываемому программному обеспечению были определены следующие основные пункты требований:

- автоматизированное построение временных зависимостей диагностических параметров;

- автоматизированное определение линейного участка зависимости логарифма числа импульсов от времени (этап однородного разрушения) в качестве интервала для аппроксимации;

- автоматизированная аппроксимация зависимости регистрируемого числа импульсов АЭ от времени теоретической кривой для определения параметров функции распределения $\psi(\omega)$.

Исходя из поставленных требований, можно выделить актуальные задачи проектирования разрабатываемого программного обеспечения:

- разработка алгоритма автоматизации процесса определения этапа однородного разрушения (процесса определения линейного участка зависимости логарифма числа импульсов от времени);

- разработка алгоритма автоматизации процесса определения оптимальных значений параметров функции распределения $\psi(\omega)$для определения значения остаточного ресурса технического объекта с минимальной неопределенностью.

Таким образом, создание предлагаемого программного обеспечения, основанного на многоуровневой модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии, обеспечит упрощение процесса взаимодействия потенциального пользователя с моделью и даст возможность потенциальному пользователю автоматизировано оценивать остаточный ресурс технических объектов с минимальной неопределенностью и проводить информативнуюоценку прочностных свойств материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петров В.А.* Сравнительный анализ методик определения ресурса / В.А. Петров, Г.В. Петров, О.Ю. Рыжов // Труды СПбГПУ. Министерство образования Российской Федерации. - СПб. 2005. №494: Технологические и транспортные системы. Логистика. С. 8-14.

2. *Буйло С.И.* Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики: монография / Издательство Южного федерального университета, 2017. С. 184.

3. *Stepanova K., Kinzhagulov I., Iuferev R., Levkova Y., Kovalevich A.* 2019 The results of the defect formation control in welded joints during friction stir welding by acoustic emission. Quality Management and Reliability of Technical Systems *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 666(1) 012010.
4. *Stepanova L.N., Kabanov S.I., Ramazanov I.S., Chernova V.V.* 2019 Acoustic-Emission Procedure for Rejecting Defectsin Multiple-Pass Girth Welds *Russian Journal of Nondestructive Testing* 55 898-908.
5. *Савельев В.Н., Махмудов Х.Ф.* Исследование акустических свойств массива гетерогенных пород и бетонной обделки в натурных условиях // Журнал технической физики, 2020. Т. 90, Вып. 1. С. 141-148.
6. *Borovkov A.I., Mamchits D.V., Nemov A.S., Novokshenov A.D.* 2018 Problems of Modeling and Optimization of Variable-Hardness Panels and Structures Made of Layered Composites *Mechanics of Solids* 53(1) 93-100.
7. *Гибаленко А.Н., Трофинчук Т.С.* Оценка живучести металлоконструкций при моделировании факторов эксплуатации / Вестник днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта, 2016. №2 (62). С. 119-128.
8. *Носов В.В.* Контроль прочности неоднородных материалов методом акустической эмиссии / Записки Горного института, 2017. Т. 226. С. 469-479.

УДК 620.179.1

ПЕРЕТЯТКО С.А.
Санкт-Петербургский горный университет

АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ОСНОВЫ МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕНТРАЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ

Аннотация. В данной статье рассматриваются примеры потери работоспособности различного оборудования, что этому поспособствовало, и основы методики акустико-эмиссионного контроля с использованием концентрационно-кинетических показателей прочности, на основании которогоможетосуществиться прогноз состояния оборудования, в том числе на начальном этапе микротрещенообразования.

Ключевые слова: теплоэнергетическое оборудование, котел, турбина, трубопровод, прочность, трещины, акустические эмиссия, концентрационно-кинетические показатели.

PERETYATKO S.A.
Saint Petersburg Mining University

ANALYSIS OF THE CAUSES OF FAILURE OF HEAT AND POWER EQUIPMENT AND THE BASICS OF ACOUSTIC EMISSION CONTROL METHODS USING CONCENTRATION-KINETIC STRENGTH INDICATORS

Abstract. This article discusses examples of loss of performance of various equipment, which contributed to this, and the basics of the method of acoustic emission control using concentration-kinetic strength indicators, on the basis of which a forecast of the condition of the equipment can be made, including at the initial stage of micro-cracking.

Keywords: heat and power equipment, boiler, turbine, pipeline, strength, cracks, acoustic emission, concentration-kineticindicators.

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблем повышения надежности, безотказности и эффективности влияет на результаты выполнения таких задач как постепенная замена основных фондов и сокращение затрат на ремонтно-восстановительные работы. Разброс по времени наработки рабочих объектов может составлять от сотен до тысяч часов.Стареющий парк технологического оборудования требует более частых, длительных и масштабных ремонтных работ, что в свою очередь приводит к возникновению сложностей в анализе, составлении и прогнозе работ по техническому состоянию теплоэнергетического оборудования и не всегда является эффективным. Существующие методики не опираются на статистический подход, что делает их малоинформативными. Повысить качество контроля возможно, создавая новые методики, по оценке состояния объектов. Проанализировав причины отказа основного теплоэнергетического оборудования, можно отметить обобщающую их черту – снижение прочности. В данной статье рассматриваются примеры потери работоспособности различного оборудования, что этому поспособствовало, и основы методики акустико-эмиссионного контроля с использованием концентрационно-кинетических показателей прочности, на основании которого можетосуществиться прогноз состояния оборудования, в том числе на начальном этапе микротрещенообразования.

ТУРБИНЫ

Турбины являются устройствами, которые работают при экстремальных значениях температуры и давления. Появление трещин на поверхности роторов можно связать с термической усталостью, которая возникает как следствие циклического нагружения [1].

Повреждение роторов может привести к серьезным авариям. Согласно [2], одним из самых ярких примеров аварий из-за неисправностей роторов является станция «Галлатин» (США). Причиной послужили исходные металлургические дефекты. Во время пуска турбины произошло увеличение образовавшихся трещин до критического размера. Спустя 4 месяца был осуществлен следующий пуск турбины из холодного состояния, при котором ротор разрушился. Повреждение ротора на Сургутской ГРЭС-2 в 1994 году также связано с образованием трещины. На этот раз сквозная трещина поразила область второй ступени. Причиной послужила сначала по механизму малоцикловая, а затем многоцикловой усталости.

Следующая, немаловажная часть турбины – лопатки, которые также являются накопителями напряжения, причиной появления которых могут быть центробежные силы, давления пара и температуры пара. В статье [3] расследовалась причиной внезапной остановки газовой турбины, при рядовом утреннем пуске, стал облом лопатки. Авторами был сделан вывод, что причиной усталостного разрушения лопатки были фреттинговый износ и переходные процессы в камере сгорания, близкие к резонансному состоянию самих лопаток. S.J. Ghosh [4] также отмечал, что трещины наблюдались в пяти лопастях шестой ступени низкого давления, и отказ был связан с фреттингом и усталостью.

Также следует отметить, что старение материала лопатки протекает неоднородно, в выходной кромке – интенсивнее, так, как и нагружается она сильнее. Причиной по которой происходят изменения в макроструктуре, является воздействие высокотемпературного потока. Это влияет на показатели прочностных и пластических характеристик материала в этих зонах [5].

КОТЛЫ

Паровые котлы предназначены для выработки насыщенного и перегретого пара. Незапланированная остановка в его работе также сильно сказывается на производительности.

Частыми причинами отказа, из-за снижения прочности, являются трещины из-за низкого качества сварных швов. Например, при обследовании неисправностей на стенках водогрейных котлов было выявлено, что по всей длине труб происходило разрушение в виде микротрещин. Экспериментальные данные показали, что микротрещенообразование распространялось от внутренней поверхности к наружной [6]. Характер распространения указывает на водородоинициируемое растрескивание. Кроме того, наличие полостей и несплошностей уменьшало площадь поперечного сечения труб, что приводило к увеличению интенсивности напряжений, которое выходя за пределы текучести материала, привело к растрескиванию труб.

ТРУБОПРОВОДЫ

Еще одним важным объектом является трубопровод. Снижение эксплуатационной стойкости может произойти из-за протекающих процессов коррозии, приводящих к утонению стенки трубы и появлению концентраторов напряжения, деформационного старения, снижение как механических характеристик, так и прочности, что пагубно влияет на способности сопротивляться возникновению и развитию трещин, которые могут способствовать разрушению трубопровода при рабочих или испытательных давлениях [7].

Одной из главных проблем труб, изготовленных из различных материалов, является расстройство стыковых соединений, происходящее, в основном, в начале эксплуатации, в том числе, более половины приходится на сварной шов [8]. Причинами выделяют – некачественное выполнение швов, а также, проведение данных видов работ в

летнее время, при высокой температуре.

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕНТРАЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ

Как можно отметить, снижение прочности зачастую становиться основной причиной повреждения объектов. Для своевременного контроля оборудования, а также определения времени, которое потребуется для достижения предельного состояния, используются неразрушающие методы контроля (НК). Они помогают производить обследование оборудования, не влияя на его свойства и работоспособность. Помимо этого, неоспоримым преимуществом некоторых методов НК является то, что для проведения контроля не требуется какая-либо подготовка поверхности, скорость выполнения проверки выше, чем у активных методов НК. Данные методы являются «экспресс методами», к ним относятся: метод акустической эмиссии, магнитной памяти металла и тепловой метод. Акустико-эмиссионный метод зачастую выделяют как наиболее перспективный, в том числе и для теплоэнергетического оборудования [9, 10]. Также, авторы упоминают, что недостатком традиционных методов являются трудности при классификации опасности объектов и расчете остаточного ресурса. Мнение о том, что «научно обоснованных норм по допустимости размеров дефекта с точки зрения механики разрушений и прочности оборудования в широкой практике не существует» является справедливым. Данную проблему представляется возможным решить, создав методику контроля теплоэнергетического оборудования, которая использовала бы концентрационно-кинетические показатели прочности. Данный подход, обладая достаточной точностью, позволяет определять ресурс старого и нового оборудования [15].

Такой подход объединяет традиционный экспериментальный подход к оценке ресурса и кинетические представления о разрушении. С его помощью можно оценить влияние различных факторов материала, связанных с прочностью и АЭ активностью, на акустическую эмиссию.

Микромеханическая модель временных зависимостей параметров АЭ имеет вид:

$$\xi(t) = k_{AE}\, C(\gamma, \sigma, T, t),$$

где $\xi(t)$ – временная зависимость параметра АЭ, k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент, имеющий смысл акустически активного объёма (макроуровень), $C(\gamma, \sigma, T, t)$ – временная зависимость концентрации микротрещин (микроуровень), определяемая активационным объёмом γ, напряжениями σ и температурой T на термофлуктуационно распадающихся атомно-молекулярных связях (нано-уровень).

Прочность в данной математической модели, характеризуют концентрационно-кинетические АЭ-показатели прочности. Данные коэффициенты обладают стойкостью перед дестабилизирующими факторами акустико-эмиссионного контроля (табл. 1).

Таблица 1.

Концентрационно-кинетические АЭ-показатели прочности

АЭ-показатель	Микромодель	Нано-модель	Особенность оценки, патентная защищенность
X_{AE}	$d\ln\xi(t)/dt$	$\gamma\dot{\sigma}/KT$	А.С. N 1467458
Y_{AE}	$d\ln\xi(t)/d\sigma(t)$	γ/KT	Патент N 2270444
kY_{AE}	$d\ln\xi(t)/dF(t)$	$k\gamma/KT$	–
W_{AE}	$d\ln\xi(t)/dK_н(t)$	$\omega = \gamma\sigma/KT$	Патенты NN 2445616, 2525584

Данная модель также описывает разрушение при прочностной неоднородности, которая присуща оборудованию и также описывается в статьях [2, 3, 5].

Согласно микромеханической модели, модель процессов накопления концентрации микротрещин в гетерогенных материалах:

$$C(t) = C_0 \int_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \psi(\omega) \left\{ 1 - exp\left[- \int_0^t \frac{d\bar{t}}{\theta(\omega(\bar{t}))} \right] \right\};$$

ψ(ω) – описывает разрушение при прочностной неоднородности, представляет собой функцию плотности распределения параметра ω по структурным элементам контролируемого объёма V материала (рис. 1).

Графическое распределение можно разбить на две части, где «колокол» - область малых, незначительно изменяющихся значений ω, принадлежи наиболее долговечностным структурным элементам, «хвост» - область распределения бо̀льших значений и значительное изменение значений ω, принадлежи наименее долговечностным структурным элементам [16].

Рисунок 1 - Моделирование прочностной неоднородности материала

ВЫВОД

Решение данных проблем контроля теплоэнергетического оборудования невозможно без глубокого анализа методологии разработки систем диагностирования, физических основ разрушения и явления акустической эмиссии. При разработке алгоритмов обработки результатов АЭ-регистрации следует опираться на последовательное построение логических связанных, иерархически подчиненных информативных моделей процессов и явления, определяющих работоспособность объекта контроля и значения параметров АЭ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ghosh S.J., Srivastava A.* 2006 Cracks in steam turbine components *Russian Journal of Nondestructive Testing* 42 134-146.

2. *Смирнов А.Н., Быкова Н.В., Абабков Н.В., Фенстер Б.Р.* Анализ повреждаемости роторов паровых турбин (обзор) / Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2014. № 2(102). С. 38-46.

3. *Yeon-Sun Choi, Kyu-Hwa Lee*. 2010 Investigation of blade failure in a gas turbine *Journal of Mechanical Science and Technology* 24 1969–1974.

4. *Ghosh S.J.* 2004 Failure investigation of a low-pressure turbine blade *Journal of Failure Analysis and Prevention* 73-77.

5. *Бердник О.Б., Царева И.Н., Кириков С.В., Тарасенко Ю.П.* О необходимости локального анализа высоконагруженных зон лопаток турбин / VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Сборник материалов. — М.: ИМЕТРАН, 2017. — С. 761-763.

6. *Parikshit Munda, Subodh Kumar, Amit Prakash, MdMurtuja Husain, Rajnikanth V., Ghosh Chowdhury S.* 2016 Failure Investigation of Boiler Water Wall Tubes of a Thermal Power Station // Journal of Failure Analysis and Prevention 16 9-18.
7. *Плешивцев В.Г., Пак Ю.А. и Филиппов Г.А.* Факторы снижающие конструктивную прочность металла труб и перспективы создания новых трубных сталей для тепловых сетей / Третья научно-практическая конференция «Тепловые сети. Современные практические решения». — М.: ЭНИВ, 2008.
8. *Ярошенко Ю.В.* Анализ причин аварийности водопроводных сетей и пути ее снижения. - М.: Высш. Шк., 2013. — 79 с.
9. *Быкова Н.В., Абабков Н.В., Смирнов А.Н., Быков И.С.* Неразрушающий контроль качества металла паровых турбин. Современное состояние и перспективы / Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2015. № 4(110). С. 45-52.
10. *Edited by Kishi T.,Ohtsu M., Yuyama S.* Acoustic Emission - Beyond the MILLENIUM (15th International Acoustic Emission Symposium). Oxford: Elsevier Science, 2000.
11. *Белкин А.П., Степанов О.А.* Диагностика теплоэнергетического оборудования: учебное пособие. 3. - СПб.: Лань, 2018. — 240 с.
12. *Чепкасова О.А., Селезнева А.А., Садилов А.И., Лосев Д.А.* Критерии работоспособности деталей и узлов оборудования / Молодой ученый, 2015. №23. С. 258-260.
13. *Березин П.О., Абрамов И.Л.* Контроль и диагностика теплоэнергетического оборудования / VIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Россия молодая». — Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2016. С. 325-330.
14. *Дубов А.А.* Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / Безопасность труда в промышленности, 2003. № 3. С. 46-49.
15. *Носов В.В., Самигуллин Г.Х., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А.* Микромеханическая модель акустической эмиссии как методическая основа прогнозирования разрушения сварных соединений / Нефтегазовое дело, 2016. Т. 14. № 1. С. 244-253.
16. *Носов В.В.* Контроль прочности неоднородных материалов методом акустической эмиссии / Записки Горного института, 2017. Т. 226. С. 469-479.

УДК 004.932.2

ПОТАПОВ А.И.,
МИХАЙЛОВ А.А.
Санкт-Петербургский горный университет
РОГАЧЕВ В.А.
Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ СИГНАЛОВ

Аннотация. Оценивание степени размытости является важным шагом на пути улучшения качества изображения. В настоящей работе произведены оценки размытости и методов восстановления точечных сигналов на изображении. На примерах точечных объектов показывается, эффективность разных методов по восстановлению зашумлённых и размытых изображений.

Ключевые слова: расфокуссированное изображение, конволюция, деконволюция, анализ изображений.

POTAPOV A.I.,
MIKHAILOV A.A.,
Saint-Petersburg Mining University
ROGACHEV V.A.
A.F. Mozhaysky Military-Space Academy

ANALYSIS OF POINT SIGNAL RECOVERY METHODS

Abstract. Evaluating the degree of blurring is an important step towards improving image quality. In this paper, estimates of blurring and methods for restoring point signals in the image are made. Examples of point objects show the effectiveness of various methods for restoring noisy and blurred images.

Keywords: defocused image, convolution, deconvolution, image analysis.

Восстановление искаженных изображений является важной проблемой в задачах обработки изображений – как с теоретической, так и с практической точек зрения. Частными случаями являются размытие из-за дрожания камеры, атмосферной турбулентности, расфокусированности оптики, различных методов обработки изображения (сглаживание, масштабирование). В этом случае информация об объектах на изображении теряется. Пиксели содержащие объекты размываются в пятно. Если при этом радиус размытия большой, то всё изображение может принимать однородный цвет. При этом информация перераспределяется по определенному закону и поэтому ее можно восстановить с некоторыми ограничениями. Другими словами, можно сказать что, в ходе процесса искажения любой пиксель исходного изображения отображается в случае расфокусировки в пятно. Закон, по которому один пиксель размывается в пятно и называют функцией искажения или PSF (Point spread function, т.е. функция распределения точки). Размерность этой функции, обычно меньше размерности самого изображения (рис. 1).

а) б) в)

Рисунок 1 - Выделенная строка с сигналами:
а) до искажения; б) после размытия и добавления шума в) восстановленная по методу Винера

Модель процесса искажения можно описать следующим образом:

$$g(x, y) = h(x, y) \cdot f(x, y) + n(x, y),$$

где: $f(x, y)$ – исходное изображение до обработки,
$h(x, y)$ – искажающая функция,
$n(x, y)$ –шумовая составляющая,
$g(x, y)$ – результирующее изображение (смазанное или расфокусированное изображение).

Тогда задача восстановления сводится к нахождению наилучшего приближения $f'(x, y)$ исходного изображения. Для восстановления искаженных изображений рассматривались следующие методы: инверсная фильтрация, фильтр Винера, регуляризация по Тихонову, метод слепой деконволюции. Для выбранных методов проводился ряд экспериментов по размытию и зашумлению изображений с различными точечными сигналами. А также их восстановлению.

Исследования позволили провести оценку эффективности восстановления, показали преимущества фильтра Винера и Тихонова, а также зависимость эффективности восстановления точечных сигналов от уровня шумовой составляющей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gonzalez Rafael, Woods Richard* Digital Image Processing, (4ed Edition), Pearson Edition, 2017, 1192 p.
2. *Fergus Rob, Singh Barun, Hertzmann Aaron, Roweis Sam T., and Freeman William T.* Removing Camera Shake from a Single Photograph, in Proc. ACM SIGGRAPH, New York, NY, USA, 2006.
3. *Schuler Christian J., Hirsch Michael, Harmeling Stefan and Scholkopf Bernhard* 2016 Learning to Deblur *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*. 38 7 1439–1451.
4. *Levin Anat, Weiss Yair, Durand Fredo and Freeman William T.* 2009 Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on. 2009* 1964–1971.

УДК 620.178.153

СЯСЬКО В.А.,
УМАНСКИЙ А.С.,
КОНДРАТЬЕВ А.В.
Санкт-Петербургский горный университет
НИКАЗОВ А.А.
ООО «КОНСТАНТА», Санкт-Петербург

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ

Аннотация. В статье освещены существующие проблемы измерения твердости динамическими методами в РФ. Рассмотрены физические основы методов и состояние их метрологического обеспечения, на основании чего предложены необходимые мероприятия, которые обеспечат требуемую достоверность результатов измерения твердости металла и повысит безопасности эксплуатации сложного оборудования высокотехнологичных производств.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, твердость, динамический метод Либа, безопасность.

SYASKO V.A.,
UMANSKY A.S.,
KONDRATEV A.V.
Saint-Petersburg Mining University
NIKAZOV A.A.
“CONSTANTA”, Saint-Petersburg

PROCURING OF RELIABLE MEASUREMENTS OF METAL HARDNESS

Abstract. The article discusses the existing problems of dynamic hardness measurements in Russian Federation. The physical fundamental sofmeasuring methods and their metrological assurance are considered. Necessary steps are proposed to assure required true quantity value of hardness measurement sand the operational safety of complex equipment in high-tech industries will be increased.

Keywords: non-destructive testing, hardness, dynamic hardness measurements by Leeb, security.

Введение

Обеспечение надежной работы трубопроводов, насосов, турбин и другого оборудования напрямую зависит от состояния металла. Как известно, в ходе эксплуатации при длительном тепловом воздействии агрессивных жидкостей, протекании токов и воздействии внешней среды происходят изменения микроструктуры металла, что ведет к снижению механических свойств стали. Для обеспечения безаварийной работы оборудования, для которого принимаются решения о продлении срока службы (ресурса) в соответствии с РД 03-484-02 [1], необходим регулярный контроль элементов неразрушающими методами.

Одной из важнейших механических характеристик, определяющих состояние металла, является его твердость. Измерения твердости широко распространены в промышленности при контроле эксплуатационных характеристик изделий в процессе производства и эксплуатации при наличии соответствующих методик. Контроль

твердости сталей, как правило, осуществляется по методам Бринелля, Виккерса или Роквелла. Установки, обеспечивающие измерение значений твердости по этим шкалам представляют стационарные установки. При контроле твердости элементов оборудования, находящихся в эксплуатации, необходима вырезка специальных образцов, которая приводит к увеличению количества сварных соединений и нарушению целостности структуры оборудования.

Ввиду этого в текущей практике контроля твердости сталей все чаще применяются малогабаритные переносные твердомеры, реализующие динамический метод измерения. Они обладают малыми габаритами и возможностью использования вне центральных заводских лабораторий непосредственно на поверхности металлических изделий объектов энергетики и т.п.

Основная часть. В существующих отечественных твердомерах, реализующих динамический метод измерения, твердость определяют по параметрам отскока падающего ударника. Принцип их работы близок к методу измерения твердости HL по Либу, который был разработан в 70-х годах прошлого века сотрудниками компании Proceq [2]. Суть метода заключается в измерении соотношения скоростей v_i падающего ударника до и после соударения с поверхностью исследуемого образца (рис. 1). Твердость по Либу HL рассчитывается в соответствии с формулой:

$$HL = (v_R/v_A) \cdot 1000,$$

где v_R – скорость отскока, v_A – скорость удара.

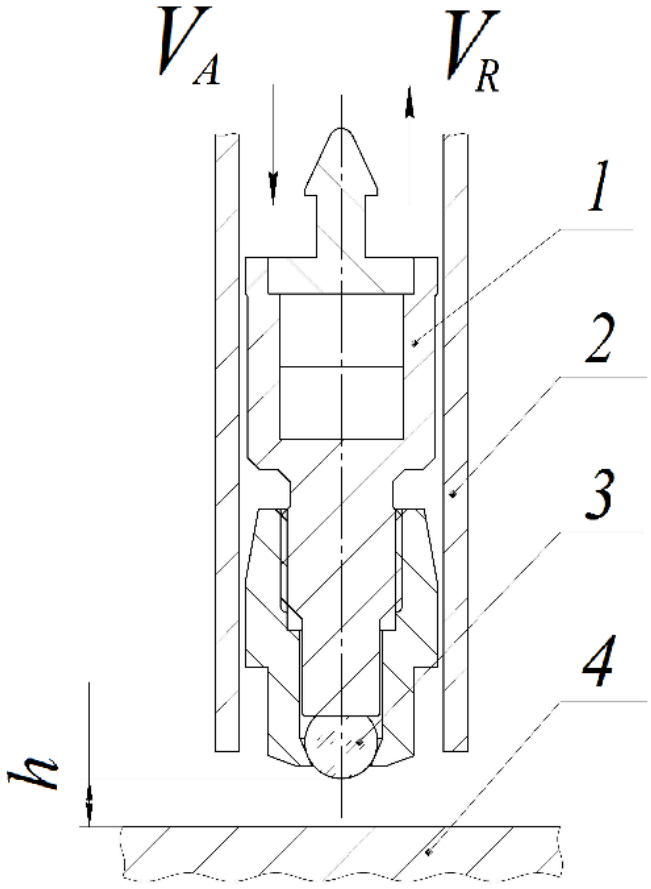


Рисунок 1 - Схема измерения твердости по Либу:
1 – корпус ударника, 2 – направляющая трубка, 3 – сферический наконечник индентора , 4 – испытуемый образец

На сегодняшний день существует несколько различных шкал твердости по Либу для преобразователей, отличающиеся формой наконечника (радиусом R) и массой ударника M, а также его кинетической энергией E_A при падении. Метод стандартизован в

США и Европе: DIN 50156 (1-3), ASTM A956, ISO/DIS 16859 (1-3) [3-5]. Приборы, основанные на этом методе, позиционируются как портативные твердомеры для практически всего спектра конструкционных металлов и сплавов: от алюминия до закаленных сталей.

В перечисленных стандартах строго определены технические параметры твердомеров, реализующих метода Либа:

- обозначение шкал: HLx (В зависимости от параметров ударника x = D, S, E, DL, D+15, C, G);

- нормируемые параметры (в качестве примера, для шкал D, E):

а) кинетическая энергия удара E_A = 11,5 мДж;

б) скорость удара ν_A =2,05 м/с;

в) максимальное расстояние наконечника индентора от поверхности образца при измерении скорости 2,00 мм;

г) масса ударника M = 5,45 г;

д) радиус наконечника R=1,5 мм;

е) параметры образца: масса не менее 5 кг, толщина не менее 25 мм (незакрепленный) и 3 мм (закрепленный).

В Российской Федерации динамические твердомеры вносятся в Госреестр СИ под видом твердомеров по стандартизованным шкалам. При этом происходит подмена понятий, т.к. поверка проводится по мерам твердости соответствующих шкал для статических твердомеров. По сути, имеет место градуировка шкалы прибора путем подгонки нужных коэффициентов пересчета таким образом, чтобы его показания соответствовали значениям измеряемых мер. В то же время, если таким прибором провести измерения мер той же шкалы, но из другого материала, то он выдаст неверные значения. В результате, прибор дает правильные результаты измерений только на материалах, аналогичных тем, из которых изготовлены меры, на которых он был поверен. При этом в описаниях типа, свидетельствах о поверке и руководствах по эксплуатации таких приборов не удалось найти ограничений их применимости для разных типов материалов. Таким образом, пользователи приборов вводятся в заблуждение относительно возможностей их использования и метрологических характеристик. Данный факт представляется весьма опасным, учитывая количество продаваемых в РФ приборов такого типа и отрасли, в которых они используются.

В качестве примеров использования сертифицированных динамических твердомеров, как средств измерений по другим шкалам твердости, можно привести отраслевые нормативные документы:

1. Инструкция Росэнергоатома: РД ЭО 0027-2005 [6]. В приведенном документе в п. 5.3.1 прямо сказано: «Приборы, основанные на методе Лееба, используют для определения твердости по шкале Бринелля, Виккерса или Роквелла».

2. Руководящий документ ОАО РЖД РД 32 ЦВ 050-2005 [7]. В этом документе в п. 4.1.6.3.дана ссылка на применение динамического твердомера МЕТ-Д1 [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] для измерения твердости по Виккерсу: «Контроль твердости наплавки износостойких поверхностей. Контроль твердости наплавки износостойких поверхностей 240 ....300НВ проводить твердомером портативным динамическим типа МЕТ-Д1, зарегистрирован в Госреестре средств измерений № 22736-02».

3. Инструкция Федеральной службы по экологическому и атомному надзору СО 153-34.17.440-2003 [8] в приложении Р п. 1.5 сказано: «При использовании переносных приборов с относительно неглубоким внедрением шарика (менее 0,2 мм), например, типа ТЭМП-1, рекомендуется следующее число измерений».

4. Методические указания по проведению экспертизы промышленной безопасности ОАО «Сургутнефтегаз» МУ 21У-003-2004 [9] в пункте 5.13 Твердометрия сказано «Механические характеристики могут быть определены косвенными методами после измерения твердости с помощью ударных переносных твердомеров ВПИ-3МБ (ТБД-1)

для определения твердости стальных изделий в единицах Бринелля НВ. Для определения твердости стальных изделий по ВиккерсуHRC используются приборы… ТДМ-1, ТЕМП-2 и др., отвечающие требованиям ГОСТ 22761 и ГОСТ 22762».

В Госреестр средств измерений на сегодняшний день внесено более 2-х десятков твердомеров, обозначенных как «динамические», «портативные», «малогабаритные» или «переносные». Несмотря на довольно большую историю разработки и применения динамических твердомеров, в России до сих пор не существует единства в терминологии, а также отсутствует унификация их конструкции и рабочих характеристик.

В соответствии с [4] числа твердости HL являются первичными при измерениях методом Либа. Также твердомеры по Либу имеют возможность пересчета в наиболее часто используемые шкалы твердости по стандартизованным в Европе и США таблицам соответствия для наиболее распространенных групп материалов, в частности для различных типов сталей, медных сплавов, бронз, алюминиевых сплавов и т.д.

Требования и ограничения к использованию таблиц пересчета регламентированы международным стандартом ISO 18265 [10].

Негативные последствия сложившейся в РФ практики поверки твердомеров Либа по мерам других шкал твердости проявляются также в том, что отечественные «динамические» твердомеры, успешно прошедшие поверку в РФ, не могут применяться за рубежом, в частности в Европе. Причиной этого является отличие параметров преобразователей и градуировка приборов по статическим мерам твердости.

Из всего вышеперечисленного следует, что твердомер, который по своей конструкции, методу измерений, форме индентора, алгоритму расчета значений твердости и другим существенным параметрам не соответствует стандарту на данную шкалу твердости, не может быть поверен по этой шкале в рамках существующих поверочных схем. Приборы, реализующие динамические методы измерения твердости (в частности, метод Либа) ни по одному из существенных для методов измерения твердости параметров не соответствуют действующим стандартам на методы измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу и Шору, и, вследствие этого, не могут быть внесены в Госреестр средств измерений и поверяться как твердомеры по этим шкалам.

Заключение: сложившаяся в РФ практика использования динамических твердомеров для контроля состояния изделий из сталей и сплавов при продлении срока эксплуатации высокотехнологичного оборудования может стать причиной выхода его из строя и возникновения аварийных ситуаций. Во избежание этого необходима разработка нового стандарта на основе [3-5]. В этом случае измерение твердости по шкале Либа будет строго регламентировано, а конструкция и рабочие параметры «портативных динамических твердомеров» различных производителей будут унифицированы. Кроме того, следует внести соответствующие требования в нормативные документы, регламентирующие контроль состояния изделий из металлов и сплавов. Предлагаемые мероприятия позволят значительно повысить уровень промышленной безопасности и вероятность безаварийной работы оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 03-484-02 «Положение о порядке продления срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах», утвержденное постановлением Госгортехнадзора России 05.08.2002г. №43.
2. *Leeb D.* 1978 New dynamic method for hardness testing of metallic materials *VDI-Report* 308 123-128.
3. ISO/DIS 16859-1 "Metallic materials - Leeb hardness test - Part 1: Test method".
4. ISO/DIS 16859-2 "Metallic materials - Leeb hardness test - Part 2: Verification and calibration of the testing devices".

5. ISO/DIS 16859-3 "Metallic materials - Leeb hardness test - Part 3: Calibration of reference test blocks".
6. РД ЭО 0027-2005 Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости.
7. РД 32 ЦВ 050-2005 Методика выполнения измерений надрессорной балки, боковых рам, пружин и рессорного комплекта при проведении плановых видов ремонта тележек 18-100.
8. СО 153-34.17.440-2003 Инструкция по продлению срока эксплуатации паровых турбин сверх паркового ресурса.
9. МУ 21У-003-2004 Методические указания по проведению экспертизы промышленной безопасности насосов центробежных типа ЦНС с истекшим сроком службы и определению возможности их дальнейшей эксплуатации.
10. ISO 18265 "Metallic materials — Conversion of hardness values".

УДК 622.236.22

ЦЕНЕВ А.Н.,
Главный инженер НПП “ИННОТЕХ”
КОРОБКОВ Г.Е.,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
НОСОВ В.В.
Санкт-Петербургский горный университет

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА И ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОРЫВОВ ПРОТЯЖЕННЫХ АНОДНЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

Аннотация. В работе представлен мониторинг комплексной системы защиты от коррозии магистральных газопроводов, а также предложен способ обнаружения прорывов протяженных анодных заземлителей с помощью приборного обследования в определенном диапазоне частот, с целью предотвращения наложения фоновых частот сторонних сооружений. Рассмотрен комплекс работ по обнаружению мест повреждений протяженных анодных заземлений. Предложено решение проведения оценки эффективности работы системы электрохимической защиты магистрального газопровода по результатам приборного обследования.

Ключевые слова: коррозия, магистральный газопровод, дефект, электрохимическая защита, антикоррозионное покрытие, протяженный анодный заземлитель, пассивная защита, безопасная эксплуатация.

TSENEV A.N.,
INNOTECH Ltd.
KOROBKOV G.E.,
Ufa State Petroleum Technological University
NOSOV V.V.
Saint-Petersburg Mining University

MONITORING COMPLEX PROTECTION TECHNICAL CONDITION OF THE MAIN GAS PIPELINE AND BREAKDOWNS OF EXTENDED ANODE GROUNDERS DETECTION

Abstract. The paper presents monitoring of a complex system of protection against corrosion of main gas pipelines, as well as a method for detecting breakouts of extended anode earthling devices using an instrument survey in a certain frequency range, to prevent the overlap of background frequencies of third-party structures. The complex of works on the detection of damage sites of extended earth anode is considered. A solution for evaluating the effectiveness of the main gas pipeline electrochemical protection system based on the results of a device is proposed.

Keywords: corrosion, main gas pipeline, defect, electrochemical protection, anti- corrosion coating, extended anode earthing, passive protection, safe operation.

Процессы коррозии на участках магистральных газопроводов прежде всего обусловлены снижением эффективности работы комплексной защиты от коррозии трубопровода [1-3, 6-11], которая состоит из пассивной и активной защиты трубопроводов. Эффективность работы пассивной защиты магистрального газопровода прежде всего зависит от технического состояния

изоляционного покрытия. Однако, на основании результатов проведения мониторинга технического состояния пассивной защиты участков трубы, в большинстве случаев, имеются ее сквозные повреждения, как в верхней, так и в опорной части. Это объясняется совместным действием множества факторов: химическим составом грунта, механических напряжений и перепадами температур. Повреждения элементов активной катодной защиты - протяженных анодных заземлителей, обеспечивающих в свою очередь поддержание значения защитного потенциала стенки трубы, обусловлено разрушением их целостности при производстве земляных работ на трассах трубопроводов. При этом ремонтно-строительные организации, благодаря которым произошло разрушение целостности анодов, как правило, пытаются повреждения скрыть [1, 5-15]. В результате эффективность катодной защиты снижается, что может привести к началу коррозии на трубопроводе. В этой связи остро встал вопрос о разработке приборного комплекса для проведения мониторинга без вскрытия грунта, который должен включать в себя определение состояния изоляции трубы, обнаружение дефектов изоляции и их ранжирование по размерам повреждений, определению глубины залегания трубы и соответствие ее проектному положению (Рисунок 1), с одновременным обнаружением мест повреждений и разрывов протяжённых анодных заземлителей по трассе.

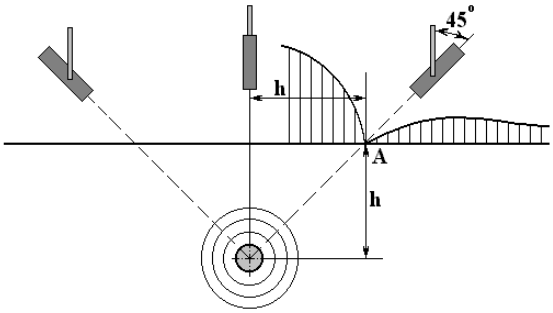


Рисунок 1 – Определение глубины залегания трубопровода

Преимущество разрабатываемого комплекса включает в себя возможность ранжирования дефектов изоляции по физическим размерам без вскрытия трубопровода, высокую помехозащищенность селективных индикаторов при проведении работ вблизи воздействий сторонних сооружений, работающих на 10 кВ, 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, 500 кВ, а также проведение сплошной оценки состояния изоляции, что в итоге приведет к значительному снижению количества шурфов при проведении экспертизы промышленной безопасности магистральных газопроводов с целью их дальнейшей безопасной эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Защита трубопроводов от коррозии: Том 1: Учебное пособие / Ф.М. Мустафин [и др.]. СПб.: Недра, 2005. Т.1. 620 с.: ил.

2. *Ценев А.Н., Назарова М.Н., Носов В.В., Шарнина Г.С.* Мониторинг технического состояния изоляционных покрытий МГП в зоне постоянного действия блуждающих токов. Деловой журнал Neftegaz.RU. 2018. № 12. С. 58-60.

3. *Ценев А.Н., Носов В.В., Назарова М.Н.* Поиск повреждений изоляционных покрытий магистральных газопроводов без вскрытия в зоне постоянного действия блуждающих токов. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S5-2. С. 430-438.

4. *Ценев А.Н., Носов В.В.* Формирование устойчивого адгезионного слоя за счет химического взаимодействия изоляционного покрытия с металлом стенки магистрального газопровода для предотвращения коррозионных повреждений. В сборнике: НЕФТЕХИМИЯ - 2019 материалы II Международного научно-технического и инвестиционного форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. 2019. С. 133-136.

5. *Ilinykh M.V., Nazarova M.N., Akimova E.V., Palaev A.G.* Assessment of technical condition of underwater transitions of main pipelines in real//IOP Conference Series: Earth and Environmental

Science. DOI: 10.1088/1755-1315/194/7/072003. – 2018. - Volume 194, Issue 7, 15 November. – 072003. – ISSN: 17551307.
6. *Хафизов А.Р., Назарова М.Н., Ценев А.Н., Ценев Н.К.* О роли строительных и металлургических дефектов в разрушении магистральных трубопроводов//Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. -2017. -№ 3. - С. 24-31. – ISSN: 2221-2701.
7. *Назарова М.Н., Понкратова В.В.* Риск-ориентированный подход к обеспечению безопасной эксплуатации газопроводов системы газораспределения// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. - №7. – С. 484-489. – ISSN 0236-1493.
8. *Nosov V. V.* On the Principles of Optimizing the Technologies of Acoustic-Emission Strength Control of Industrial Objects// Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016, 2016, Vol. 52, No. 7, pp. 386–399.
9. *Назарова М.Н., Болобов В.И.* Физико-механические свойства стального магистрального нефтепровода после длительной эксплуатации// В сборнике: Труды VII Евразийского симпозиума по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата Пленарные доклады. 2014. С. 134-137.
10. *Tsenev A.N., Nosov V.V., Akimova E.V.* Fault location method for unexposed gas trunk line insulation at stray current constant effect area//International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2017, IPDME 2017 Сер. "IOP Conference Series: Earth and Environmental Science" 2017. С. 092028. – ISSN: 17551307.
11. *Харисов Р.А., Кантемиров И.Ф., Мустафин Ф.М.* Метод экспертной оценки для определения оптимальной конструкции защитных покрытий трубопроводов//Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2009. № 4 (78). С. 74-83.
12. *Харисов Р.А., Кантемиров И.Ф.* Проведение экспертной оценки для защитных покрытий трубопроводов//Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2010. № 1. С. 5.
13. *Ценев Н.К., Митрофанов О.А., Ценев А.Н., Кудояров Р.У.* Влияние дефектов на разрушение резервуаров и магистральных трубопроводов. В сборнике: Обеспечение промышленной безопасности при эксплуатации резервуаров и резервуарных парков. Ассоциация "Башкирская Ассоциация Экспертов"; ОАО "Газпром нефтехим Салават"; ФБГОУ ВПО "Уфимский государственный нефтяной технический университет". 2011. С. 143-152.
14. *Коробков Г.Е., Сайфутдинов А.И.* Безаварийная эксплуатация подводных переходов МНП. Деловой журнал Neftegaz.RU. 2018. № 12. С. 48-51.
15. *Коробков Г.Е.* Метод фононной диагностики на магистральных газопроводах. Деловой журнал Neftegaz.RU. 2019. № 4. С. 64-67.

УДК 620.179.1617

ШИХОВ А.И.,
ПОТАПОВ А.И.,
ДУНАЕВА Е.Н.
Санкт-Петербургский горный университет

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ БЕТОНЫХ И АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация. Технический уровень применяемых методов и средст контроля оказывает влияние на результат строительно-монтажных работ. Одной из главных задач подрядных организаций, в процессе укладки дорожного покрытия, является оперативное определение параметров асфальтобетонных покрытий дорожной одежды. Качество устройства асфальтобетонного покрытия позволяет увеличить срок службы и снизить затраты на ремонтные работы дорожных одежд. В данной работе рассмотрен ряд методови средствнеразрушающего контроля качества бетонных и асфальтобетонных покрытий. Приведены некоторые характеристики дефектов бетонных и асфальтобетонных покрытий. Основное внимание уделено методам георадиолокации, вихретоковому, радиационному и акустическому методу контроля. Рассмотрены приборы реализующие данные методы.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; дефекты бетонных и асфальтобетонных покрытий; георадилокация; вихретоковый контроль; радиационный контроль; акустический контроль.

SHIKHOV A.I.,
POTAPOV A.I.,
DUNAEVA E.N.
Saint-Petersburg Mining University

NONDESTRUCTIVE QUALITY TESTING OF CONCRETE AND ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS

Abstract. The technical level of the applied methods and controls has an impact on the result of construction and installation works. One of the main tasks of contractors in the process of paving is to quickly determine the parameters of asphalt pavement. The quality of the asphalt pavement device allows you to increase the service life and reduce the cost of repairing road surfaces.A number of methods and means of nondestructive quality testing of concrete and asphalt concrete pavements are considered. Some characteristics of defects of concrete and asphalt concrete pavements are given. The main attention is paid to ground-penetrating radar methods, eddy-current, radiation and acoustic, also the devices implementing these methods are considered.

Keywords: nondestructive control; defects of concrete and asphalt concrete pavements; ground-penetrating radar; eddy-current testing; radiation testing; acoustic emission testing.

Широкое распространение в практике контроля качества материалов и изделий получили неразрушающие физические методы и средства контроля, при этом наибольшее применение они получили при контроле изделий и конструкций из металлов [1-5].

Однако для неразрушающего контролядефектов бетонных и асфальтобетонных покрытий данные методы использовать не представляется возможным из-за специфических свойств бетона и асфальтобетона, в основном из-за высокой неоднородности структуры данных материалов.

Несмотря на появление в последнее время большого количества материалов, применяемых при строительстве высоконагруженных оснований, бетонные или асфальтобетонные покрытия до сих пор остаются основными. Но как каждый материал они имеют ряд недостатков, которые связаны с особенностями изготовления, состава, физических свойств и нарушением технологии изготовления.

Основные возникающие дефекты при эксплуатации и изготовлении бетонных и асфальтобетонных покрытий приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Дефекты бетонных и асфальтобетонных покрытий

Вид дефекта	Краткое описание
Пыление и отслоение поверхностного слоя	При недостаточной прочности бетонного или асфальтобетонного покрытия, на поверхности образуется кремнеземная пыль, которая осаждается на всех поверхностях при эксплуатации
Расслаивание	При значительном колебании температуры и влажности расслоение может происходить на глубину до 3 мм
Вздутие	При преждевременном уплотнении на глубине от 1 мм до 3 мм может образовываться крупная пора, заполненная воздухом или водой
Появление раковин	При неправильном применении щелочеактивных наполнителей появляются раковины величиной до 50 мм, причем процесс появления достаточно длительный
Трещины	При нарушении технологии укладки бетонного или асфальтобетонного покрытия или под воздействием внешних неблагоприятных факторов могут образовываться трещины, в которые попадают вода, соли и другие вещества, усиливающие коррозию.

Все эти и другие дефекты подлежат диагностике для выявления и последующего их устранения.

Существующие методы диагностики позволяют с большей или меньшей точностью контролировать параметры бетонного и асфальтобетонного покрытия и развитие в них различных дефектов, а также производить их паспортизацию в режиме реального времени.

Одним из методов применяемых для контроля бетонных и асфальтобетонных покрытий является георадиолокация. Данный метод основан на отражении электромагнитной волны от границ неоднородностей в изучаемой среде, на которых скачкообразно изменяются электрические свойства: электропроводность и диэлектрическая проницаемость. Георадар излучает электромагнитные сверхширокополосные импульсы, которые распространяясь в исследуемой среде, отражаются от объектов и слоев принимаются антенной, усиливаются и преобразовываются в цифровой код для дальнейшего анализа полученных данных на компьютере. Задачи георадиолокации разбиваются на два класса:

Первый класс – структурные задачи, то есть определение геологической структуры грунтовой среды, где в качестве модели выбирается слоистая среда с неизменными электрофизическими параметрами внутри каждого слоя.

Второй класс – поисковые задачи, то есть поиск локальных неоднородностей, где в качестве модели выбирается слоистая среда с локальными неоднородностями в форме цилиндра, сферы или эллипса.

Существует две основные технологии георадарного обследования: георадарное профилирование и георадарное зондирование. При георадарном профилировании

намечается профиль, по которому затем проходит оператор с георадаром, при этом антенны приёмника и излучателя находятся на фиксированном расстоянии друг от друга. При георадарном зондировании расстояние между антеннами постепенно увеличивается. При этом оставаться неизменным может либо положение оси георадара при одновременном разносе обоих антенн в разные стороны, либо положение передающей антенны.

Вихретоковый метод основан на зависимости амплитуды, фазы, переходных характеристик и спектра частот токов, возбуждаемых в изделии, от его формы и размеров, физико-механических свойств и сплошности материала, расстояния до датчика, частоты и скорости перемешений, в том числе вибраций. Для неразрушающего контроля толщины бетонного и асфальтового покрытия разработан прибор Стратотест 4100, в основу которого положен вихретоковый принцип действия. Перед укладкой дорожных покрытий «измерительные отражатели» с помощью липкого слоя крепятся на основание. В качестве «измерительных отражателей» используется листы из алюминиевой фольги, которые, с одной стороны, имеют липкий слой для крепления к подложке. После укладки дорожного покрытия «отражатели» служат ориентирами для датчика прибора.

Радиационный метод основан на ослаблении или отражении (обратном рассеянии) ионизирующих излучений. Прошедшее через измеряемый материал излучение содержит информацию о толщине и регистрируется детектором излучения. Далее электрический сигнал, пропорциональный интенсивности излучения, с детектора поступает в схему измерения. Для контроля плотности бетонных и асфальтобетонных покрытий применяется прибор Troxler-4640B. При этом исключается влияние слоев, находящихся под асфальтобетонным слоем, что очень важно, поскольку работа ведется по схеме поверхностных измерений: капсула с источником и счетчик находятся на поверхности. Чтобы добиться независимости результата измерения плотности тонкого верхнего слоя от плотности подстилающих слоев, разработчики прибора использовали 2 системы счетчиков Гейгера-Мюллера, одна из которых измеряет отражение гамма-излучения в пределах верхней части находящейся под датчиком среды, а другая – суммарное отражение в пределах верхней и нижней частей. Оказывается, что по их разности можно определить среднюю плотность материала в верхнем тонком слое. Использование радиоизотопов при проведении измерений накладывает определенные ограничения на использование самого аппарата. Все они связаны с техникой безопасности самого оператора дефектоскописта.

Акустический метод неразрушающего контроля основан на свойстве акустических волн по-разному отражаться от объектов разной плотности, а также от границ разных сред. Метод настолько обширен и многогранен, что невозможно описать все возможные варианты и методы контроля в рамках одной статьи, поэтому дадим оценку лишь некоторым, наиболее распространенным приборам. В большинстве случаев говоря об акустическом контроле, подразумевают ультразвуковой метод. Существующие приборы используют различные методики получения информации об объекте контроля, которые можно разделить по методам возбуждения, приема и параметрам ультразвуковой волны, а также способам интерпретации полученных результатов.

Ультразвуковой низкочастотный дефектоскоп А1220 МОНОЛИТ предназначен для решения задач толщинометрии и дефектоскопии сложных материалов, таких как бетон, горный камень, асфальт. Он позволяет проводить тестирование эхо-методом при одностороннем доступе к объекту контроля используя при этом объемные волны. Значительный интерес для неразрушающего контроля асфальтобетонных покрытий представляют динамический плотномер грунтов ДПГ-1 и плотномер асфальтобетона ПАБ-1 [7].

В этой небольшой обзорной статье были упомянуты только самые распространенные методы и приборы неразрушающего контроля, которые можно использовать для дефектоскопии бетонных и асфальтобетонных покрытий. Приборы

менее распространенные либо слишком дорогие, либо их использование весьма специфично и сложно нами не рассмотрены. Сюда можно отнести инфракрасный тепловой метод, электрохимический, механический и другие, которые подробно рассмотрены в работах [8-13].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов И.А.* Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. - М.: Наука, 1966.
2. *Ермолов И.Н.* Неразрушающий контроль. В 5 кн. Книга 2. Акустические методы контроля: Практическое пособие / Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под редакцией В.В. Сухорукова. - М.: Высшая школа, 1991. С. 280-283.
3. *Алешин Н.П.* Ультразвуковая дефектоскопия. Справочное пособие / Н.П. Алешин, В.Г. Лупачев. - Мн.: Выш. шк., 1987. С. 250-257.
4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева, т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. - М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
5. *Nosov V.V.* 2017 Control of inhomogeneous materials strength by method of acoustic emission *Journal of Mining Institute* 226 469-479.
6. *Потапов А.И.* Радиоволновые методы и средства неразрушающего контроля природной среды, материалов и изделий. Том 6. Физические основы и применение радиоволнового контроля природной среды, материалов и изделий / А.И. Потапов, В.А. Сясько, В.И. Матвеев, И.Ф. Кацан, Г.В. Дмитриенко. - СПб.: Политехника-принт, 2017. С. 500-510.
7. Измеритель плотности асфальтобетона ПАБ. Руководство по эксплуатации. НКИП.408011.100РЭ. Челябинск, Интерприбор, 2008.
8. *Потапов А.И.* Неразрушающие физические методы и средства контроля природной среды, материалов и изделий. Том. 15. Физические основы, методическое, приборное и метрологическое обеспечение тепловых методов неразрушающего контроля материалов и изделий / А.И. Потапов, В.А. Сясько, О.Н. Будадин, С.С. Сергеев. - СПб.: Политехника-принт, 2019. С. 342-354.
9. *Потапов А.И.* Неразрушающие физические методы и средства контроля природной среды, материалов и изделий. Том. 16. Физические основы, методическое, приборное и метрологическое обеспечение тепловых методов неразрушающего контроля материалов и изделий / А.И. Потапов, В.А. Сясько, О.Н. Будадин, С.С. Сергеев. - СПб.: Политехника-принт, 2019. С. 103-115.
10. *Сясько В.А.* Неразрушающий контроль качества покрытий и его метрологическое обеспечение. Том 8. Общая характеристика покрытий / В.А. Сясько, А.И. Потапов, С.С. Голубев. - СПб.: Политехника принт, 2017. С. 380-384.
11. *Сясько В.А.* Неразрушающий контроль качества покрытий и его метрологическое обеспечение. Том 9. Общая характеристика покрытий / В.А. Сясько, А.И. Потапов, С.С. Голубев. - СПб.: Политехника принт, 2018. – 448 с.
12. *Сясько В.А.* Неразрушающий контроль качества покрытий. Том 10. Неразрушающий контроль физических и физико-механических характеристик покрытий / В.А. Сясько, А.И. Потапов, С.С. Голубев, К.В. Гоголинский. - СПб.: Политехника принт, 2018. – 612 с.
13. *Сясько В.А.* Неразрушающий контроль качества покрытий. Том 11. Неразрушающий контроль адгезионных характеристик и дефектоскопия покрытий / В.А. Сясько, А.И. Потапов, С.С. Голубев. - СПб.: Политехника принт. 2018. – 544 с.

УДК 621.3:658.56

ЩИГИРЕВ Д.Е.
ООО НПП «Энерготехника»

О ВОПРОСАХ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И СРЕДСТВАХ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ГОРНОДОБЫВЮАЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация. Ранее, вопрос качества электрической интересовал лишь инженеров отдельных областей и не был приоритетным как у энергетических, так и у промышленных организаций. Но постепенно ситуация изменилась: непрерывный научный прогресс, различные новые виды электроприемников заставили нас по-новому взглянуть на данную проблему.

Ключевые слова: качество электроэнергии, средства измерений, метрология, современный подход.

SHCHIGIREV D.E.
Energotechnica Ltd.

POWER QUALITY IN THE MINING INDUSTY. POWER QUALITY METERS

Abstract. Previously, the issue of power quality was of interest only to engineers in certain areas and was not a priority for both energy and industrial organizations. But gradually the situation changed: continuous scientific progress, various new types of electric receivers, forced us to take a new look at this problem.

Keywords: power quality, power quality meters, metrology, modern approach.

Введение

Качество электроэнергии (КЭ) – это совокупность ее свойств, определяющих воздействие на электрооборудование, приборы и аппараты и оцениваемых показателями качества электроэнергии (ПКЭ), численно характеризующими уровни электромагнитных помех (ЭМП) в системе электроснабжения (СЭС) по частоте, действующему значению напряжения, форме его кривой, симметрии и импульсам напряжения. Сейчас это понятие, которое невозможно игнорировать в связи с его практической значимостью [1].

Общие сведения о качестве электрической энергии

Основными показателями КЭ являются:

- Отклонение частоты;
- Отклонение напряжения;
- Колебания напряжения и фликер;
- Несинусоидальность тока и напряжения;
- Несимметрия токов и напряжения;
- Случайные события (провалы, прерывания, перенапряжения).

Снижение качества электроэнергии приводит к отрицательным последствиям, среди которых следует отметить:

- Увеличение потерь активной и реактивной мощности;
- Сокращение срока службы электрооборудования;
- Увеличение капитальных вложений в СЭС;
- Нарушение условий нормального функционирования электроприемников и потребителей в целом;

- Нанесение ущерба окружающей среде и здоровью человека.

Зачастую, проблемы, связанные с качеством ЭЭ, не решаются просто и требуют разностороннего подхода для каждой конкретной ситуации. Отсюда возникают определенные сложности с получением некоего универсального алгоритма, позволяющего описать точный порядок действий для каждого конкретного случая. На данный момент, специалисты сначала производят измерения ПКЭ в проблемных точках и на их основании, зная однолинейную схему электроснабжения и нагрузки основного электрооборудования, предлагают различные мероприятия по обеспечению КЭ (методические, организационные и технические).

Специфика горнодобывающей отрасли

Российская Федерация богата сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами – нефть, газ, алюминий, никель, золото, алмазы и прочие полезные ископаемые добываются на ее территории. Но вместе с тем, все эти богатства рассредоточены по всей стране, и, зачастую, месторождения находятся в труднодоступных местах и с суровым климатом. И тут сразу появляется вопрос: от какого источника получать электроэнергию? В большинстве случаев питание таких предприятий осуществляется от энергосистемы. Но, вспомнив о труднодоступности территорий, очень велика вероятность столкнуться с ситуацией, когда сети попросту не могут обеспечить бесперебойное электроснабжение электроэнергией, требуемого качества. Причин этому будет несколько: электрическая удаленность от источника, дефицит генерируемых мощностей, высокий уровень износа оборудования и другие. Существует еще один вариант электроснабжения – собственная генерация. Это позволяет избежать потерь при передаче, так как станция строиться в непосредственной близости от месторождения, также пропадает вопрос дефицита генерируемой мощности. Но есть и другая сторона медали – необходимо предоставить технико-экономическое обоснование данного решения, решить вопрос поставки топлива, на котором будет работать электростанция. К тому же, появляется серьезный вопрос регулирования частоты в данной децентрализованной системе, не имеющей связи с ЕНЭС.

Перейдем от снабжения электрической энергией, к ее потреблению. С одной стороны, большое количество резко-искажающей нагрузки (яркий пример: дуговая сталеплавильная печь), а с другой – асинхронные двигатели, которые крайне чувствительны к этим искажениям. В итоге, для того, чтобы обеспечить такое предприятие «качественной» электроэнергией, необходимо решить непростую задачу.

Измерение ПКЭ

В теории, при правильном подходе еще на момент освоения нового месторождения, проблем с КЭ можно избежать, но на практике обычно все получается по-другому. Так с чего же начать решение возникшей проблемы? В первую очередь необходимо выявить какой из ПКЭ не соответствует нормам. В этом нам помогаютспециальные приборы – анализаторы качества электрической энергии, которыеусловно можно разделить на две группы: мобильные и стационарные.

Для обеспечения непрерывного мониторинга качества электрической энергии используются стационарные средства измерений, имеющие соответствующие конструктивные и функциональные особенности (рис. 1). В ряде случаев такие приборы, если они соответствуют стандартам на счетчики электрической энергии, используются и для измерений количества (учета) электрической энергии [2]. Стационарные средства измерений качества электрической энергии могут использоваться автономно или функционировать в составе более сложных средств измерений – измерительных систем непрерывного мониторинга качества электрической энергии (рис. 2). Последнее направление в настоящее время быстро развивается, так как позволяет существенно повысить уровень автоматизации и производительности контроля и анализа качества электрической энергии, а следовательно, добиться улучшения оперативности и

эффективности в управлении качеством электрической энергии [3]. Кстати говоря, данные системы привлекают все большее внимание сетевых компаний (ПАО «ФСК»).

Рисунок 1 - Стационарные средства измерений качества электрической энергии «Ресурс-UF2-4.30»

Рисунок 2 - Аппаратно-программный комплекс измерительной системы непрерывного мониторинга качества электрической энергии

Для краткосрочных испытаний электрической энергии (сертификационных, периодических, арбитражных, технологических и др.), а также для проведения различных научно-исследовательских работ используются наиболее приспособленные для этих мероприятий мобильные приборы (рис. 3, 4). В таких приборах среди конструктивных особенностей ценится удобство транспортирования и подключения к объекту исследования, а среди функциональных возможностей выделяются разнообразие форм и наглядность представления результатов измерений, а также наличие возможности получения дополнительной (по отношению к стандартным требованиям) измерительной информации, включая мгновенные значения измеряемых сигналов.

Рисунок 3 - Анализатор качества электрической энергии «Ресурс-PQA-M»

Рисунок 4 - Анализатор качества электрической энергии «Ресурс-PQA-L»

Рассмотренные группы приборов являются представителями двух разных концепций конструирования средств измерений. В данном случае указанные модификации анализатора взаимно дополняют друг друга и позволяют охватить весь спектр организационно-технических мероприятий и измерительных задач при испытаниях электрической энергии. Более традиционные приборы первой группы в большей степени подходят для использования внутри помещения. Они являются более информативными и удобными в работе. Приборы второй группы более неприхотливы, они в больше степени подходят для использования вне помещений благодаря расширенному диапазону рабочих

температур, а также в загрязненной среде и объектах с ограниченным свободным пространством, так как имеют меньшие габаритные размеры. Приборы обеих групп имеют одинаковые метрологические характеристики и функциональные возможности, что позволяет с одинаковым успехом использовать их при проведении основных видов испытаний электрической энергии.

Инструментальный контроль качества электроэнергии на объекте проводится на протяжении определенного временного интервала: сутки, неделя, иногда месяц. Следует отметить, что окончательный вывод о соответствии КЭ нормативным требованиям представляется возможным только при проведении измерений длительностью в 7 полных суток. Измерения ПКЭ, к примеру – характеризующие напряжение, проводятся на 10-минутных объединенных интервалах времени.Это означает, что все измеренные за 10 минут значенияПКЭ усреднялись до единственной величины (с учетом того, что основной интервализмерения составляет 0,2 с или 10 периодов промышленной частоты, за 10 минут снимается3000 точек, которые усредняются до единственной величины). Таким образом, за одни суткиполучается лишь 144 значения регистрируемых ПКЭ. По окончанию измерений можно проанализировать полученные результаты на соответствие требованиям ГОСТ [4] и выявить проблемные точки.

Заключение

Подводя итог, следует еще раз еще раз отметить, что проблема низкого КЭ с каждым годом все более остро возникает в различных областях народного хозяйства, в том числе и горнодобывающей промышленности. Использование мощных вентильных преобразователей, дуговых сталеплавильных печей, сварочных установок и прочих искажающих потребителей, помимо своей экономичности и технологичности, ведет к ухудшению КЭ. Справиться с этим помогает правильных подход: измерения, анализ, выявление проблемы и проведение мероприятий по улучшению КЭ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карташев И.И.* Управление качеством электроэнергии: учебное пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. - 347 с .
2. *Ильяшенко Е.В.* Многофункциональные средства измерений для учета и контроля качества электрической энергии / Е.В. Ильяшенко, О.М. Евдокимова, В.В. Швецов // ИСУП, 2011, №6.
3. *Щигирев Е.А.* Анализ состояния и тенденции развития контроля качества электрической энергии / Е.А. Щигирев, В.В. Киселев, Е.В. Ильяшенко // Энергоэксперт, 2014, №2.
4. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

СЕКЦИЯ 6.
ТРАНСПОРТ И ЛОГИСТИКА В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ

УДК 656.081

АФАНАСЬЕВ А.С.
Санкт-Петербургский Горный университет
ЕВТЮКОВ С.А.,
ЧУДАКОВА Н.В.
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ЭКСТРЕННОГО ТОРМОЖЕНИЯ АТС КАТЕГОРИИ M_1

Аннотация. В статье рассматривается влияние совокупности факторов таких как: фактическая загруженность АТС, наличие систем ABS, EBD, BAS, прицеп до 750 кг, состояние поверхности дорожного покрытия и сезонности шин, наиболее влияющих на параметры процесса экстренного торможения АТС категории M_1. Экспериментальным исследованием определены фактические значения установившегося замедления $j_{уз}$и время его нарастания $t_{вр}$, а также проведен их сравнительный анализ с рекомендуемыми нормативными значениями. Представлены коэффициенты, корректирующие установившееся замедления $Kj_{уз}$ и время его нарастания $Kt_{вр}$, а также обоснована целесообразность введения их в основные расчетные зависимости с целью повышения достоверности и объективности выводов исследования реконструкции ДТП. Представлены разработанные математические модели прогнозирования величин установившегося замедления и его времени нарастания.

Ключевые слова: дорожно-транспортное происшествие, экспертиза ДТП, параметры процесса торможения, установившееся замедление, время нарастания установившегося замедления, экстренное торможение, системы активной безопасности.

AFANASYEV A.S.
Saint-Petersburg Mining University
EVTYUKOV S.A.,
CHUDAKOVA N.V.
Saint Petersburg State University of Architecture and
Civil Engineering

EXPERIMENTAL STUDY OF FACTORS INFLUENCING THE PARAMETERS OF THE EMERGENCY BRAKING PROCESS VECHICLE CATEGORY M_1

Abstract. The article contains various factors, such as: the actual workload of the vehicle, the presence of ABS, EBD, BAS systems, trailers up to 750 kg, the condition of the road surface and seasonal tires, which most affect the parameters of the emergency braking of the vehicle M1 category. An experimental study established the actual values established for the deceleration and the time of its occurrence, as well as a comparative analysis with the recommended standard values.The coefficients correcting the steady-state deceleration and the time of its rise are presented, as well as the feasibility of introducing them into the main calculated dependencies in order to increase the reliability and objectivity of the conclusions of the investigation of the accident reconstruction.The developed mathematical models for predicting the values of steady-state deceleration and its rise time are presented.

Keywords:road accident, expertise of road accident, braking process parameters, developed

deceleration, time of increase of the developed deceleration, emergency braking, active vehicle safety systems.

Дорожно-транспортные происшествия – это неотъемлемая часть эксплуатации автомобильного транспорта и весомая по значимости причина смертности людей в мирное время. По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) ежегодно в мире погибают более 1,35 млн. человек и 50 млн. получают ранения [7].

При исследовании ДТП в экспертной практике используются усредненные значения установившегося замедления и времени его нарастания, разработанные и утвержденные ВНИИСЭ МЮ СССР более 40 лет назад [6, 9, 10, 11, 12] и нормативные, согласно ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» [13]. Но для автомобилей, оснащенных системами ABS, EBD и BAS применять такие значения не совсем корректно, так как это может привести к не достоверному результату.

Поэтому, в целях повышения достоверности и объективности выводов экспертного исследования при реконструкции ДТП, необходимо уточнить величины установившегося замедления и времени его нарастания, а также разработать методику реконструкции ДТП по параметрам процесса торможения АТС категории M_1, оснащенных системами ABS, EBD и BAS [1, 2, 5].

Для проведения экспериментальных исследований и определения фактических значений установившегося замедления и времени его нарастания для АТС категории M_1 методом априорного ранжирования была произведена выборка наиболее значимых факторов, таких как: x_1 – коэффициент колеса с дорогой; x_2 – загруженность ТС; x_3 – наличие систем ABS, EBD, BAS; x_4 – тип сезонности шины; x_5 – наличие прицепа до 750 кг. Достоверность степени влияния факторов подтверждено коэффициентом конкордации $W = 0,71$ [3, 4].

Эксперимент проводился в дорожных условиях, согласно [9] и с помощью контрольно-измерительного прибора «Эффект-02».

В ходе проведенного теоретического и экспериментального исследования, авторами обоснована целесообразность введения в основные расчетные зависимости коэффициентов, корректирующих установившееся замедления АТС $Kj_{уз}$ и время его нарастания $Kt_{вр}$, используемые в экспертной практике, с учетом исследуемых факторов по формулам 1 и 2 [15, 16].

$$Kj_{уз} = \frac{j_{уз}^{ф} = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)}{j_{узн}} \quad (1)$$

$$Kt_{вр} = \frac{t_{вр}^{ф} = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)}{t_{врн}} \quad (2)$$

В результате экспериментального исследования были получены математические модели для величин установившегося замедления $j_{уз}$ и времени его нарастания $t_{вр}$для транспортных средств категории M_1 с достоверностью аппроксимации, находящейся в пределах R = 91-98 % [14]:

$$y_{jуз(о-з)} = 3,37048 + 0,885714x_1 + 0,406536x_2 + 0,758857x_3 + 0,1985x_1x_3 - 0,140333x_1x_4 - 0,74975(x_2)^2 - 0,95175x_1(x_2)^2, \quad (3)$$

$$y_{tвр(о-з)} = 0,156262 + 0,0487381x_1 + 0,02625x_2 + 0,0112619x_3 - 0,00288889\,x_4 + 0,01125x_1x_2 + 0,002x_1x_3 - 0,02275(x_2)^2 + 0,00875x_2x_3 - 0,02975x_1(x_2)^2 - 0,0015\,x_1x_2x_3\,, \quad (4)$$

$$y_{jуз(в-л)} = 5,60057 + 0,666579x_2 + 0,208489x_3 - 0,320513x_1x_2 + 0,0695625x_1x_4 + 0,0536875x_1x_5 + 0,477422(x_2)^2 - 0,112763x_2x_3 + 0,106088x_2x_5 + 0,0601875x_3x_4 - 0,102232(x_4)^2 - 0,195328x_1(x_2)^2 + 0,0672657x_1x_2x_4 + 0,225684x_1x_2x_5 - 0,268542(x_4)^3, \quad (5)$$

$$y_{tвр(в-л)} = 0,274783 + 0,0262522\,x_1 + 0,0169398\,x_2 + 0,00388616\,x_3 - 0,0046875\,x_4 + 0,0024442\,x_5 - 0,0106125\,x_1x_2 - 0,0038125\,x_1x_3 + 0,001375\,x_1x_4 + 0,0144844(x_2)^2 - 0,0031125\,x_2x_3 - 0,001875\,x_3x_4 - 0,00660937x_1(x_2)^2 - 0,00615937\,x_1x_2x_3 - 0,007125\,x_1x_2x_4 + 0,00139688\,x_1x_2x_5 + 0,00125\,x_1x_3x_4 - 0,00514687\,x_2x_3x_4. \quad (6)$$

Таким образом, экспериментальное исследование подтвердило выдвинутую гипотезу о закономерности влияния совокупности факторов на формирование величин установившегося замедления и времени его нарастания для АТС категории M_1, а предложенные к использованию корректирующие коэффициенты практически значимы, т.к. позволят уточнить параметры процесса торможения АТС категории M_1, повысить точность и достоверность экспертного исследования реконструкции ДТП. Разработанные математические модели позволяют прогнозировать установившееся замедление и время его нарастания для АТС категории M_1 с учетом систем ABS, EBD, BAS в случаях, когда проведение натурного эксперимента не представляется возможным в ходе расследования ДТП или требуется его аналитическое исследование, например, при внедрении в учебный процесс.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев А.С., Евтюков С.А., Чудакова Н.В.* Исследование параметров процесса торможения ТС категории М1 при реконструкции ДТП / А.С. Афанасьев, С.А. Евтюков, Н.В. Чудакова // Вестник гражданских инженеров, 2019. № 4 (75). С.113-116.
2. *Афанасьев А.С., Чудакова Н.В.* Уточнение параметров процесса торможения ТС категории М1 в условиях эксплуатации Северо-Западного региона / Мир транспорта и технологических машин, 2019. С. 88-95.
3. *Афанасьев А.С., Чудакова Н.В.* Анализ существующих методик реконструкции дорожно-транспортных происшествий // Научная дискуссия: вопросы технических наук, 2017. Вып. № 4 (44). С. 44-48.
4. *Афанасьев А.С., Чудакова Н.В.* Влияние внешних воздействующих факторов на установившееся замедление автомобиля при проведении дорожно-транспортной экспертизы / Известия международной академии аграрного образования, 2017. Вып. №32. С. 23-27
5. *Афанасьев А.С., Чудакова Н.В.* Теоретическое исследование параметров торможения, влияющих на реконструкцию ДТП / Российская наука в современном мире. Сборник статей XII международной научно-практической конференции, 2017. С. 60-63.
6. *Боровский Б.Е.* Безопасность движения автомобильного транспорта. - Л: Лениздат, 1984. - 304 с.
7. ВОЗ призывает к активизации усилий по борьбе с основными причинами смертности в городах / Всемирная организация здравоохранения.
https://www.who.int/ru/news-room/feature-stories/detail/new-who-report-to-bolster-efforts-to-tackle-leading-causes-of-urban-deaths.
8. ГОСТ 33997-2016. Межгосударственный стандарт. Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки (утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18.07.2018 N 708-ст) // Консультант Плюс.
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_135713/.
9. *Григорян В.Г.* Применение в экспертной практике параметров торможения автотранспортных средств: метод.рекомендации для экспертов. - М.: ВНИИСЭ, 1995. 10 с.
10. *Евтюков С.А., Пучкин В.А.* Судебная автотехническая экспертиза дорожно-транспортных происшествий. - СПБ.: ИД «Петрополис», 2017. – 416 с.
11. *Пушнов А.В., Каплиев А.А., Миронова Ю.А.* Применение параметров замедления автомобилей иностранного и отечественного производства в экспертной практике: Методические рекомендации. Ч.2. - М.: ГУЭКЦ МВД России, 2003. – 128 с.
12. Судебная автотехническая экспертиза: Пособие для экспертов-автотехников, следователей и судей. Ч.2 / Под ред. В.А. Иларионова. – М.: ВНИИСЭ, 1980. – 491 с.
13. Технический регламент таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» от 09.11.2011 № 877. – 465 с.

14. *Afanasyev A.S., Evtyukov S.A., Chudakova N.V.* 2019 The method of reconstruction of an accident according to the parameters of the braking process of vehicles of category M1 under operating conditions of the North-West region *Journal of Physics: Conference Series* 1-6.
15. *Afanasyev A.S., Chudakova N.V.* 2019 Experimental study and evaluation of parameters of M1 vehicle braking process *Journal of Physics: Conference Series* 1-6.
16. *Afanasyev A.S., Chudakova N.V.* 2018 Study of braking performance of M1 category vehicle within autotechnical expertise *J. Phys.: Conf. Ser.* 1118 012001.

УДК 656.051

АФАНАСЬЕВ А.С.
Санкт-Петербургский горный университет
ЕГОШИН А.М.
Военная академия материально-технического обеспечения
АЛЕКСЕЕВ С.В.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА НА ДОБЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ

Аннотация. В статье представлена имитационная модель организации движения технологического транспорта на добывающем предприятии, исследование которой позволит обосновать использование технических средств управления движением и избежать возникновения.

Ключевые слова: управление движением транспорта, технологический транспорт, имитационная модель.

AFANASYEV A.S.
Saint-Petersburg Mining University
EGOSHIN A.M.
Military Academy of logistics
ALEKSEEV S.V.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

SIMULATION MODEL OF THE ORGANIZATION OF TECHNOLOGICAL TRANSPORT MOVEMENT AT THE MINING ENTERPRISE

Abstract. The article presents a simulation model of the movement of technological transport at the mining enterprise, the study of which will allow to justify the use of technical means of traffic management and avoid the occurrence.

Keywords: traffic management, technological transport, simulation model.

В имитационную модель организации движения на сети дорог добывающего предприятия с использованием автоматизированной системы технических средств управления движением закладываются частные имитационные модели работы технических средств по организации дорожного движения на объекте и участке автомобильной дороги, а также информационная модель управления дорожным движением [1, 2]. В качестве управляющей программы используется алгоритм работы технических средств по организации дорожного движения на объекте и участке автомобильной дороги [3].

Структура имитационной модели организации движения ТС на сети дорог добывающего предприятия, включающая несколько блоков, показана на рис. 1.

Имитация происходит в едином модельном времени, при этом начальным временем T_0 является время начала работы предприятия (сети дорог) на текущий рабочий день, а конечным $T_{кон}$ – время окончания его работы.

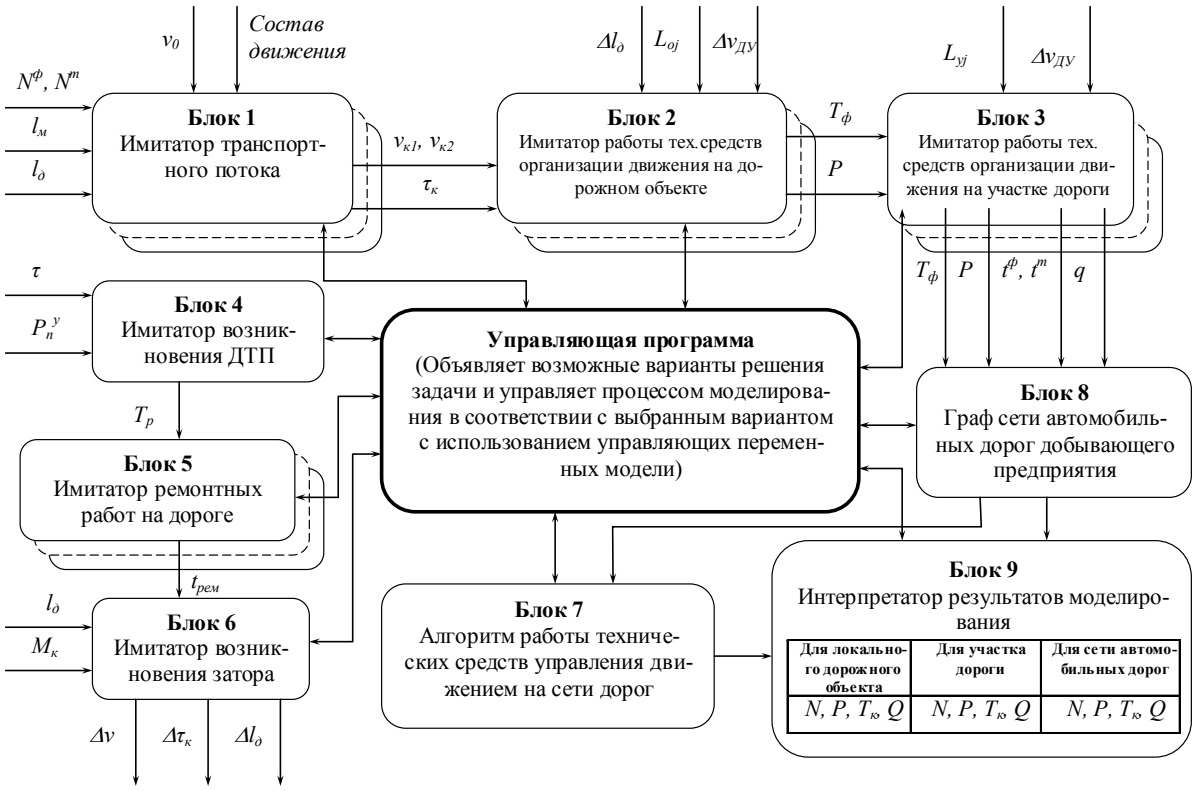


Рисунок 1 – Структура имитационной модели организации движения транспорта на сети автомобильных дорог добывающего предприятия

С помощью *блока 1* имитируется транспортный поток.

В этом блоке по известным исходным данным, законам распределения случайных величин, описанным при моделировании движения транспортных средств (ТС) на объекте и участке дороге, рассчитываются их тип и скорость, а также временной интервал между их прибытием.

Имитация военно-транспортного потока включает следующие этапы:

Моделирование интервалов времени между ТС отдельно в различные направления движения (τ_1) и (τ_2)[4].

Имитация интервалов времени организована с помощью метода обратных функций по зависимости:

$$\tau = \frac{-1}{\overline{N}} ln\, \xi \ , \tag{1}$$

где ξ – равномерно распределенное число в интервале *(0;1)*;

$\overline{N}$ – средняя интенсивность движения ТС внутри предприятия в рассматриваемый промежуток времени.

Имитация типа транспортного средства.

Тип транспортного средства определяется с использованием процедуры Монте-Карло. Событие, означающие появление транспортного средства (по грузоподъемности, габаритам или маркам) устанавливается исходя из неравенства [4]:

$$\sum_{i=1}^{v} P_i < \xi \le \sum_{i=1}^{v+1} P_i \tag{2}$$

где P_i – вероятность появления в составе транспортного потока ТС i - го типа;

ξ – случайное равномерно распределенное число.

Моделирование скорости движения ТС по участку дороги [4]:

$$\widetilde{v}_k = \sigma_{vk} \xi + \overline{v}_k , \tag{3}$$

где $\widetilde{v}_k$ – скорость транспортного средства в частной реализации модели;

σ_{vk} – среднеквадратичное отклонение скорости транспортного средства;

ξ –случайное значение нормированной нормальной величины $\xi \in (0;1)$;

$\overline{v}_k$ – среднее значение скорости транспортного средства.

Расчет времени прохождения ТС участка (объекта) дороги (пересечения, примыкания, дефиле, однопутного участка и т.д.).

Время прохождения участка дороги (объекта) ТС i-го вида в различные стороны (t_{1i}) и (t_{2i}) определяется отдельно по зависимости:

$$t_{ji} = \frac{l_i + L_{об}}{\widetilde{v}_k}, \tag{4}$$

где $L_{об}$ – протяженность участка (объекта) дороги;

l_i – длина отдельного ТС;

j – направление потока.

Блоки 2 и 3 выполняют имитацию дорожного движения на участках дороги. Причем количество и данные этих блоков равны количеству и данным объектов и участков дороги [5].

Блок 4 реализует процедуру возникновения ДТП.

В результате розыгрыша случайного события с учетом известной вероятности возникновения ДТП на объекте (участке) делается заключение о работоспособности объекта (участка).

Механизм моделирования предусматривает розыгрыш случайного числа и его сравнение с вероятностью ДТП, т.е. [6]

$$\xi \geq (1 - P_{раб}), \tag{5}$$

где ξ - равномерно распределенное случайное число на отрезке от 0 до 1 (при $\xi \geq \overline{P}_{ДТП}$ на участке дороги возникло ДТП).

В *блоке 5* моделируется работа по содержанию, ремонту и реконструкции дорог предприятия [7, 8]. Данные мероприятия требуют затрат времени на восстановление участка $t_{рем}$, моделирование которого производится путем розыгрыша случайного числа в интервале вероятного времени производства ремонтных работ [$t_{рем,min}$;$t_{рем,max}$].

В *блоке 6* осуществляется моделирование ситуации, характеризующей скопление транспортных средств на одном или нескольких объектах или участках дорог предприятия [9].

Этот процесс может быть смоделирован следующим рекуррентным соотношением:

$$\begin{cases} N_j > P_{фj} \\ (M_{вх} - M_{вых})d + \sum_{i=1}^{n} L_{дисти} \geq L_{уч.j} \end{cases}, \tag{6}$$

где N_j - интенсивность движения на j-м участке дороги, авт./ч;

$P_{фj}$ - фактическая пропускная способность j-го участка дороги, авт./ч;

d - динамический габарит, км;

$L_{дисти}$ - дистанция между i-м и $i+1$-м ТС на j-м участке ВАД, км;

n - количество ТС на j-м участке дороги, ед.;

$L_{уч.j}$ - протяженность j-го участка дороги, км;

$M_{вх}$ – количество ТС, вошедших на *j*-й участок дороги, авт.;

$M_{вых}$ – количество ТС, вышедшее с *j*-го участка дороги, авт.

В *блоке 7* осуществляется реализация алгоритма работы технических средств управления движением на сети дорог [10, 11, 12].

В *блоке 8* происходит наложение данных о движении ТС на граф сети автомобильных дорог предприятия [13, 14].

Блок 9 интерпретирует результаты моделирования.

В нем данные об интенсивностях движения на объектах, участках, сети дорог предприятия сравниваются с данными пропускных способностей этих объектов, участков и сети дорог в целом [15]. Кроме того, представляются данные о времени движения ТС и пропущенных объемах движения по объектам, участкам и сети автомобильных дорог в целом. При этом вероятные участки возникновения скоплений транспортных средств могут быть визуализированы на карте (схеме) сети дорог добывающего предприятия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Afanasyev A.S., Egoshin A.M., Alekseev S.V.* 2018 Justification of logistical approach application in road safety management *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 194 072001.
2. *Афанасьев А.С., Алексеев С.В., Егошин А.М.* Обоснование применения логистического подхода в моделях управления безопасностью дорожного движения. - СПб.: Санкт-Петербургский горный университет. Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018, 2018.
3. *Afanasyev A., Panfilov D.* 2017 Estimation of Intersections Traffic Capacity Taking into Account Changed Traffic Intensity *Transportation Research Procedia* 20 2-7.
4. *Belyaev A.I., Afanasyev A.S.* 2016 Efficiency of vehicle operation *International journal of economics and financial issues* 2(6) 24-30.
5. *Ермошин Н.А., Лазарев Ю.Г.* Математическая модель обоснования сети автомобильных дорог в интересах развития экономики и обеспечения военной безопасности / Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму Издательство: Научно-производственное объединение специальных материалов (Санкт-Петербург).
6. *Safiullin R., Kerimov M., Afanasyev A.* Methodology for the improvement of control functions for traffic of road vehicles using systems of the automatic recording of administrative violations / Architecture and engineering. - Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2017.
7. *Afanasyev A.S., Egoshin A.M., Alekseev S.V.* 2019 The choice substantiation method of road construction equipment for mining enterprises *Journal of Physics: Conference Series Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. Bristol, United Kingdom,: Institute of Physics and IOP Publishing Limited* 33021.
8. *Болгаров Н.И., Ермошин Н.А., Исмятулин Р.Г., Рудницкий С.Л.* Адаптация организаций транспортного строительства к меняющимся условиям / Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. - Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 2019.
9. *Safiullin R., Kerimov M., Afanasyev A., Marusin A.* 2018 A model for justification of the numer of traffic enforcement facilities in the region. *Transportation research PROCEDIA*. *Elsevier B.V.*
10. *Пеньшин Н.В., Гавриков В.А.* Технические средства организации движения: методические указания. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013.
11. *Козлов В.Н., Куприянов В.Е., Заборовский В.С.* Методы синтеза систем автоматического управления. – Л.: Издательство ЛГУ, 1989.

12. *Кременец Ю.А.* Технические средства регулирования дорожного движения. - М.: Транспорт, 1995.
13. *Маковецкая-Абрамова О.В., Иванов А.В.* Развитие интеллектуальных транспортных систем и придорожного сервиса в современной России. Монография. - СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2019.
14. *Лазарев Ю.Г.* Методологические аспекты планирования сети автомобильных дорог Монография. - СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2018.
15. *Ермошин Н.А., Змеев А.Т., Алексеев С.В.* Экономико-математические методы в решении задач дорожного обеспечения. - СПб.: ВАМТО, 2019.

УДК 621.867

БАЖЕНОВ А.А.
Санкт-Петербургский горный университет

РАСЧЕТ ОБЪЕМА МАТЕРИАЛА НА ЛЕНТЕ КРУТОНАКЛОННОГО КОНВЕЙЕРА

Аннотация. В статье указаны основные принципы расчёта поведения сыпучего груза на полотне крутонаклонного конвейера. Описаны основные конструкции этих конвейеров, их составные части и особенности. Приведены факторы, действующие на работу конвейера.

Ключевые слова: конвейер, сыпучий груз, перевозка.

BAZHENOV A.A.
Saint-Petersburg Mining University

CALCULATING THE VOLUME OF MATERIAL ON THE BELT OF A STEEPLY INCLINED CONVEYOR

Abstract. The article describes the basic principles for calculating the behavior of bulk cargo on the web of a steeply inclined conveyor. The main structures of these conveyors, their components and features are described. The factors that affect the operation of the conveyor are shown.

Keywords: conveyor, bulkcargo, transportation.

Основные конструктивные параметры большинства конвейеров – это расстояние между перегородками, высота бортов и перегородок и ширина ленты. Также (но в гораздо меньшей мере) влияние на производительность конвейера оказывают параметры, определяющиеся конструкцией конкретного конвейера: угол наклона перегородок, угол развала бортов, угол V-образности. В большинстве случаев нахождение оптимальных параметров конвейера сводится к тому, что бы при заданных параметрах найти такие значения искомых параметров, при которых масса груза на рабочем полотне была бы наибольшей. Также в качестве критерия оптимума могу быть и другие параметры, например, наименьший расход материала при изготовлении конвейера и наименьшая его масса или наименьшее число поддерживающих роликов [1, 2].

Обычно объём груза на рабочем полотне находят с применением несложных геометрических вычислений, исходя из геометрических параметров конвейера, таких как ширина, угол транспортирования, расстояние между перегородками [3, 4].

Гораздо более сложная задача – определение оптимальных параметров конвейера при транспортировании конкретного груза в конкретных условиях. Особенно сложно это осуществить, если речь идёт о конвейерах сложной конструкции, например, V-образных. Для этого применяются компьютерные программы, зачастую весьма сложные. Об этом будет упомянуто ниже.

Анализ условий предельного равновесия сыпучих грузов на крутонаклонных конвейерах [5, 6].

Сыпучий груз, в основном, характеризуется следующими параметрами:

– крупностью частиц;
– объемная масса;
– угол внутреннего трения;
– коэффициент сцепления;

– угол естественного откоса.

– коэффициент наружного трения.

Условие предельного состояния сыпучих и связанных сред имеет вид

$$\tau_n \le \sigma_n tg\rho + c, \qquad (1)$$

где c и ρ - коэффициент сцепления и угол внутреннего трения.

Наглядное представление напряженного состояния в некоторой точке среды дают диаграммы напряжений Мора (рис. 1.). Условие предельного равновесия на плоскости переменных σ_n,τ_n можно представить предельной прямой, которая касается большого круга Мора [7-12].

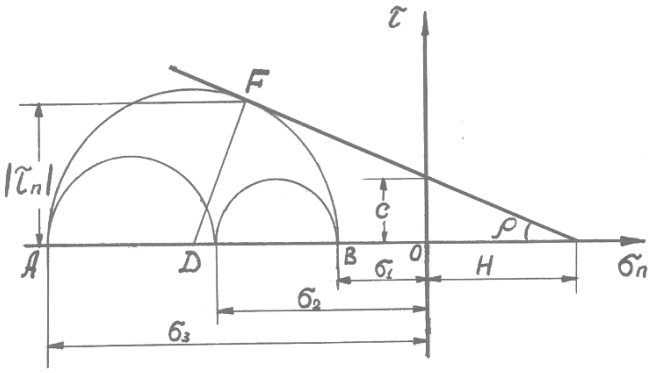


Рисунок 1 – Диаграмма напряжений Мора

В точке F (рис. 2) радиус большого круга Мора составляет $\frac{1}{2}[\sigma_3 - \sigma_1]$, а расстояние $OD = \frac{1}{2}[\sigma_1 + \sigma_3]$. Таким образом, условие (1), следуя Соколовскому, можно записать в виде:

$$\left|\sigma_i - \sigma_j\right| \le 2c\cos\rho - \left(\sigma_i + \sigma_j\right)\sin\rho, \quad \left(i, j = 1,2,3; \ i \ne j\right), \qquad (2)$$

где $\sigma_1 \le \sigma_2 \le \sigma_3$.

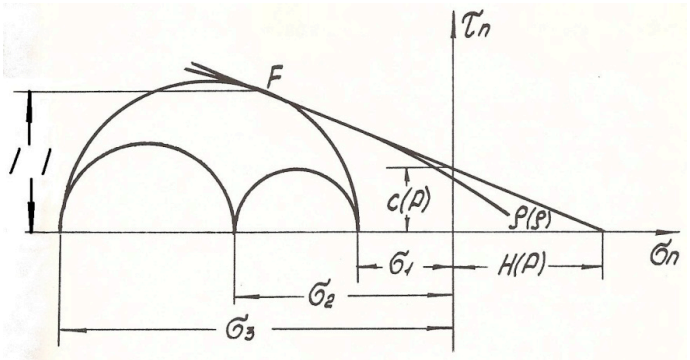


Рисунок 2 – Диаграмма Мора для неопределенного сыпучего груза

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баженов А.А.* Разработка методики расчета крутонаклонных конвейеров с перегородками: дис. канд. техн. наук: 05.05.04. Санкт-Петербургский.государственный. архитектурно-строительный университет. – СПб., 2012. - 102 с.

2. *Репин С.В.* Методология совершенствования системы технической эксплуатации строительных машин: дис докт. техн. наук: 05.05.04. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПб., 2008. - 450 с.

3. Большой энциклопедический словарь / Ред. А.М. Прохоров. – 2-е изд., перераб. и доп . – М.: Большая Российская энциклопедия, 2000. – 1456 с.

4. *Марусин А.В.* Методика оценки эффективности функционирования систем автоматической фиксации нарушений правил дорожного движения: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. Санкт-Петербургский государственный Архитектурно-строительный университет. – СПб., 2012. - 205 с.
5. *Баженов А.А.* Обзор и анализ существующих методов расчёта крутонаклонных конвейеров с перегородками / Сборник трудов III Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении», 2015. Т. 1. С. 17-19
6. *Баженов А.А.* Тяговый расчёт конвейеров с перегородками / Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» Т. 1, секция «Транспорт и логистика». – СП.б: Национально минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. С. 155-156.
7. *Репин С.В., Баженов А.А.* Метод оптимизации геометрических параметров крутонаклонных конвейеров с перегородками / Вестник гражданских инженеров», СПб, СПбГАСУ, 2018. №1 (66). С. 141-146.
8. *Репин С.В., Воронцов И.И., Баженов А.А.* Расчёт статической устойчивости сыпучего груза на рабочем полотне крутонаклонного конвейера с перегородками / Вестник гражданских инженеров», СПб., СПбГАСУ, 2018. №4 (69). С. 162-165.
9. *Касаткин А.А.* Выбор основных параметров линейной части крутонаклонного конвейера с прижимной лентой для горных предприятий: дис. канд. техн. наук. Спец. 05.05.06 – Горные машины. - М., 2009 г.
10. *Черненко В.Д., Баженов А.А.* Расчёт по нелинейной теории конвейерных лент с поперечными перегородками / Современные проблемы техносферы и подготовки научных кадров. Сборник трудов III Международного семинара в г. Табарка (Тунис), 2011.
11. *Баженов А.А.* Перспективы применения ленточных конвейеров с прижимной лентой / Сборник трудов научно-технической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017». Т.1, секция «Транспорт и логистика». – СПб.: Национально минерально-сырьевой университет «Горный», 2017. С. 21-23.
12. *Баженов А.А.* Особенности применения крутонаклонных конвейеров в современных условиях / Сборник трудов научно-технической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018». Т.1, секция «Транспорт и логистика». – СПб.: Национально минерально-сырьевой университет «Горный», 2018, С. 210-211.

УДК 656.13

БЕЛИКОВА Д.Д.
Санкт-Петербургский горный университет

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ВЕСОГАБАРИТНОГО КОНТРОЛЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ И КРУПНОГАБАРИТНЫХ ГРУЗОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Аннотация. В статье проведен анализ существующей в Российской Федерации системы весогабаритного контроля автотранспортных средств, при перевозках тяжеловесного и крупногабаритного грузов, которая имеет ряд существенных недостатков. Недостатки указанной системы заключаются в отсутствии единых стандартов построения системы весогабаритного контроля для всех регионов Российской Федерации, не учтены все условия, влияющие на эксплуатационные качества дорог, и как следствие низкая безопасность дорожного движения. Результатом исследования, является обобщение недостатков и определения вектора стратегии развития системы весогабаритного контроля автотранспортных средств при перевозках тяжеловесных и крупногабаритных грузов в Российской Федерации.

Ключевые слова: перевозочный процесс; весогабаритный контроль; безопасность дорожного движения; эксплуатационные качества дороги.

BELIKOVA D.D.
Saint-Petersburg Mining University

THE DEVELOPMENT STRATEGY OF VECHICLE WEIGHT AND SIZE CONTROL SYSTEM FOR THE TRANSPORTATION OF HEAVY AND OVERSIZE GOODS IN THE RUSSIAN FEDERATION

Abstract. The article analyzes the existing system of weight and size control in the transportation of heavy and oversize goods, which has several disadvantages. The disadvantages of the existing weight and size control system are the lack of uniform standards for the construction of the weight and size control system for all regions of the Russian Federation; the existing weight and size control system doesn't take into account all factors affecting the road performance and, as a consequence, low road safety. The result of the study is a generalization of the shortcomings and determination of the vector strategy for the development of the system of weight and size control of vehicles during transportation of heavy and oversize goods in the Russian Federation.

Keywords: transportation process; weight and size control; road safety; road pavement.

Введение. Грузоперевозки автомобильным транспортом являются наиболее востребованными и связаны со всеми без исключения отраслями экономики России. Объемы автомобильных грузоперевозок составляют более 70% от общих объемов грузоперевозок всех видов транспорта. В связи с повышенным спросом на автомобильные грузоперевозки, нередко отправители грузов, стремясь оптимизировать затраты на перевозку, размещают груз свыше нормативно установленной величины. Последствия регулярного перевеса грузового транспорта выражаются как в снижении безопасности дорожного движения, так и в негативном воздействии на покрытии автомобильных дорог [1]. В процессе исследования установлено, что 30% автомобильных перевозок выполняются с нарушением весогабаритных ограничений, средний перевес составляет

около 50%. По предварительным оценкам ежегодный ущерб автомобильным дорогам составляет 2,6 триллиона рублей [2].

Существующая система весогабаритного контроля транспортных средств перевозящих тяжеловесные грузы фрагментарна и неэффективна [3]. Поэтому для повышения эффективности существующей системы весогабаритного контроля, необходимо разработать комплекс мер, направленных на стандартизацию требований к проведению весогабаритного контроля на дорогах Российской Федерации.

Основная часть. Перевозочный процесс тяжеловесных и крупногабаритных грузов регулируется федеральным законодательством Российской Федерации. Основным нормативным правовым актом, регулирующим перевозочный процесс в отношении тяжеловесных и крупногабаритных грузов является Федеральный закон №257 от 08.11.2007г «Об автомобильных дорогах и автомобильной деятельности в Российской Федерации».В соответствии с указанным федеральным законом, выделяется три уровня автомобильных дорог, и управления ими:

- федеральный,
- региональный,
- муниципальный.

Соответственно и задачи, решение которых возложены на соответствующие государственные органы власти, распределяются по принадлежности дорог [4].

К полномочиям федеральных органов государственной власти РФ в области весогабаритного контроля на автомобильных дорогах и осуществления дорожной деятельности относятся:

- установление порядка осуществления государственного надзора за обеспечением сохранности дорог;
- установление порядка возмещения вреда, причиняемого тяжеловесными транспортными средствами, и порядка определения размера такого вреда;
- определение размера вреда, причиняемого тяжеловесными транспортными средствами при движении по автомобильным дорогам федерального значения;
- установление порядка выдачи специального разрешения на движение по автомобильным дорогам тяжеловесного и (или) крупногабаритного транспортного средства;
- установление порядка осуществления весового и габаритного контроля (в том числе организации пунктов весового и габаритного контроля).

К полномочиям Субъекта РФ, а также органов местного самоуправления, относится:

- осуществление регионального государственного надзора за обеспечением сохранности автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения/местного значения;
- определение размера вреда, причиняемого тяжеловесными транспортными средствами при движении по автомобильным дорогам регионального или межмуниципального значения / местного значения.

Таким образом, организация системы весогабаритного контроля на всей территории РФ является прерогативой федеральных органов исполнительной власти РФ.

В настоящий момент, порядок осуществления весогабаритного контроля транспортных средств, определяет Приказ Минтранса РФ №119 от 29.03.2018г. «Об утверждении Порядка осуществления весового и габаритного контроля транспортных средств, в том числе порядка организации пунктов весового и габаритного контроля транспортных средств». Данный нормативно-правовой акт устанавливает следующие виды осуществления весогабаритного контроля:

- на стационарных пунктах весогабаритного контроля;
- передвижные пункты весогабаритного контроля организуются на базе автомобиля или прицепа;

- автоматические пункты весогабаритного контроля [5].

В настоящий момент на территории Российской Федерации функционируют 76 СПВГК, более 258 ППВГК, 51 АПВГК [6]. Согласно Паспорту национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» планируется увеличить количество АПВГК на федеральных дорогах на 387 пунктов, а также на региональных и межмуниципальных дорогах на 366 пунктов до конца 2024 года [7].

Размер возмещения вреда, причиняемого тяжеловесными транспортными средствами, определяется Постановлением Правительства РФ от 31.01.2020 г., №67 «Об утверждении Правил возмещения вреда, причиняемого тяжеловесными транспортными средствами, об изменении и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации». Данное Постановление Правительства устанавливает новые расценки для расчета размера возмещения вреда, причиняемого тяжеловесными ТС. В частности, по сравнению с предыдущим аналогичный нормативным актом (Постановление правительства №934 16.11.2009 г.), превышение фактических нагрузок на ось транспортного средства над допустимыми, стало более дробным, что позволит производить расчет возмещения вреда более индивидуально и справедливо [8].

Указанные подзаконные нормативно-правовые акты регламентируют процедуры взвешивания, а также методику расчета возмещения вреда. Ни в одном, ни в другом документе не сформулирована главная задача, которую призваны решать данные процедуры – сохранность объектов транспортной инфраструктуры и дорожного покрытия. Размер вреда определяется по весовым параметрам транспортного средства (осевые нагрузки, общая масса) и категориями автомобильных дорог, по которым проходит маршрут транспортного средства [9]. Другие факторы, влияющие на сохранность дорожного полотна, такие как погодные условия (температура, влажность), текущие эксплуатационные показатели дороги, связанные с давностью проведения ремонтных работ на участке дороги, входящем в маршрут транспортного средства, пропускная способность участка дороги, не учитываются в существующей методики расчета возмещения вреда [10].

Выводы. Для устранения выявленных недостатков, необходимо включить в стратегию развития весогабаритного контроля следующий комплекс мероприятий.

Разработать методику определения местоположения и количества стационарных и автоматических пунктов весогабаритного контроля [11]. При этом, необходимо увеличить долю автоматических пунктов весогабаритного контроля как на федеральных автомобильных дорогах, так и на дорогах регионального и межмуниципального значения. Передвижные комплексы определить как вспомогательный инструмент контроля весогабаритного контроля.

Внедрить систему усовершенствованной идентификации тяжеловесных и крупногабаритных транспортных средств, посредством внедрения бортовых средств [12].

Внести изменения в действующую методику расчета размера возмещения вреда, причиняемого тяжеловесными транспортными средствами. Методика расчета размера возмещения вреда должна учитывать такие факторы как эксплуатационное состояние участка дороги, сезонность, пропускная способность участка дороги, погодные условия региона прокладываемого маршрута [13].

Внести изменения в Кодекс об административных правонарушениях РФ, в части соразмерности и справедливости размера и условий назначения штрафа за совершенное административное правонарушение, зафиксированное на автоматическом пункте весогабаритного контроля.

Регламентировать создание единых региональных центров контроля весогабаритных параметров транспортных средств, с целью централизованной эксплуатации пунктов весогабаритного контроля, а также обработки информации о грузопотоках [14]. Информация, поступающая с пунктов весогабаритного контроля о дорожном движении и грузопотоках, позволит прогнозировать функциональные

возможности участков дорог, в зависимости от транспортной нагрузки, и рассчитывать кривую эксплуатационных параметров [15]. Информация об эксплуатационных параметрах дороги является важной, для планирования ремонтных работ того или иного участка автомобильной дороги, что позволит обеспечить высокие стандарты безопасности движения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Safiullin R.N.*, *Afanasyev A.S., Reznichenko V.V.* 2019 The Concept of Development of Monitoring Systems and Management of Intelligent Technical Complexes *Journal of Mining Institute* 237 322-330.
2. *Safiullin R.N.* 2018 Methodology for the improvement of control functions for traffic of road vehicles using systems of the automatic recording of administrative violations *Architecture and Engineering* 2 (3) 26-33.
3. *Safiullin R*. 2018 Concerning optimization of the system managing operating and technical traffic monitoring means *Architecture and Engineering* 3 (2) 48-53.
4. Федеральный закон №257-ФЗ от 08.11.2007 (в ред. от 02.08.2019) «Об автомобильных дорогах и дорожной деятельности в РФ и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» / Справочно-правовая система «Консультант-плюс».
5. Приказ Минтранса РФ №119 от 29.03.2018 г. «Об утверждении порядка осуществления весового и габаритного контроля транспортных средств, в том числе порядок организации пунктов весового и габаритного контроля транспортных средств» / Справочно-правовая система «Консультант-плюс».
6. Система автоматического весогабаритного контроля: проблемы и решения / В. Кузьмина // Периодическое издание «Автомобильный транспорт» №10/2018 http://transport-at.ru/gallery.
7. Паспорт национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги». Утвержден президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам Протокол №15 от 24.12.2018 г. // Справочно-правовая система «Консультант-плюс».
8. Постановление Правительства РФ №67 от 31.01.2020 г. «Об утверждении Правил возмещения вреда, причиняемого тяжеловесными транспортными средствами, об изменении и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации» / Справочно-правовая система «Консультант-плюс».
9. *Safiullin R.N., Afanasyev A.S.* Integral estimation of methods of calculation of damage caused by vehicles during transportation of heavy cargoes *IOP: Earth and Environmental Science.*
10. *Safiullin R.N.* 2017 Evaluation of Functional Efficiency of Automated Traffic Enforcement Systems *Transportation Research Procedia*.
11. *Safiullin R., Kerimov M., Afanasyev A.* 2017 Study of the influence of the energoinfromational field on quality of the fuel applied in internal combustion engines of road-building machinery *Architecture and Engineering*. 2(4) 56-64.
12. Системы автоматизации контроля движения на автомобильном транспорте. Монография / В.В. Резниченко, А.Ф. Калюжный. Под редакцией Р.Н. Сафиуллина. — СПб.: Лань, 2019. - 34 п.л.
13. *Marusin A., Safiullin R.R., Ablyazov T.* 2019 Methodical approaches for creation of intelligent management information systems by means of energy resources of technical facilities *E3S Web of Conferences EECE-2019* 140 10008.
14. *Safiullin R.N., Reznichenko V.V., Gorlatov D.V.* 2019 Modeling and optimization of processes of transportation of heavy cargoes based on the automation of monitoring systems for the motor vehicles movement *IOP: Earth and Environmental Science (EES)* 378 012069.
15. *Бруно Далла Кьяра*. ИТС на автомобильном транспорте. Технологии, методы и практика применения / Тех.ред. А.Э. Горев. –М., 2014. – 532 с.

УДК 629.365

БЕЛЯЕВ А.М.,
МАКАРОВ В.С.,
БЕЛЯКОВ В.В.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ

Аннотация. В статье рассмотрено моделирование криволинейного движения мобильного робототехнического комплекса с гусенично-модульным движителем по песчаному деформируемому грунту. Моделирование проведено в среде Adams Tracked Vehicle. Проведены расчеты суммарного сопротивления при прямолинейном движении и при повороте. Расчеты показали, что средние значения сопротивления движения при прямолинейном движении составляют 1,6 кН, при криволинейном 1,94 кН. Экспериментальные значения силы сопротивления при прямолинейном движении составили 1,45-1,7 кН. Таким образом максимальное отклонение теоретических и экспериментальных данных составило не более 10%.

Ключевые слова: моделирование, гусеничный движитель, береговая зона, Adams, ATV, террамеханика, подвижность.

BELYAEV A.M.,
MAKAROV V.S.,
BELYAKOV V.V.
Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev

MODELING THE MOTION OF A MOBILE ROBOTIC COMPLEX IN THE COASTAL ZONE

Abstract. The article discusses the modeling of the curvilinear motion of a mobile robotic complex with a caterpillar-modular mover on sandy deformable soil. The simulation was conducted in the Adams Tracked Vehicle environment. The calculations of the total resistance in a rectilinear motion and during rotation. The calculations showed that the average values of the resistance to movement in a rectilinear motion are 1.6 kN, with a curvilinear 1.94 kN. The experimental values of the resistance force in a rectilinear motion were 1.45-1.7 kN. Thus, the maximum deviation of theoretical and experimental data was no more than 10%.

Key words:modeling, tracked mover, coastal zone, Adams, ATV, terramechanics, mobility.

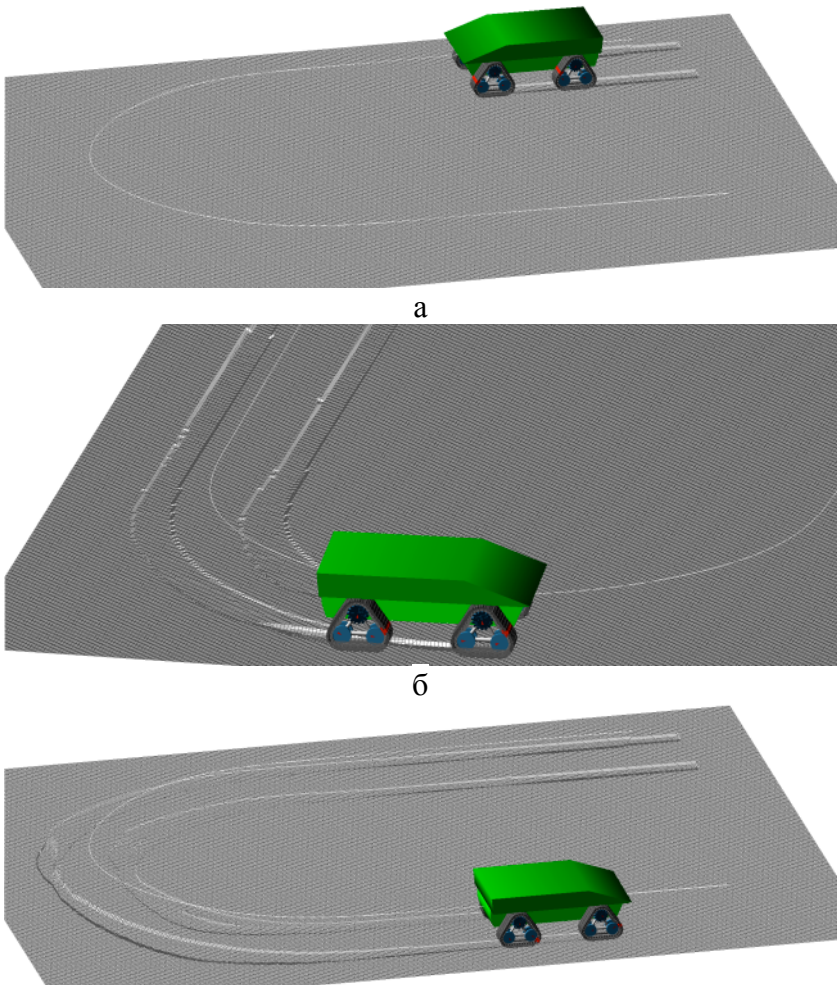
Мониторинг береговых зон может проводиться с помощью стационарных постов, либо исследовательское оборудование может быть установлено на специальные подвижные робототехнические комплексы [1-9].

Для решения задачи обеспечения подвижности мобильных робототехнических комплексов необходимо выбрать шасси с параметрами наиболее подходящими к условиям эксплуатации, а также требованиям накладываемым перечнем выполняемых работ.

В зависимости от требуемых задач можно использовать разный математический аппарат для моделирования движения и взаимодействия движителей с полотном пути. Одним из способов является имитационное моделирование с применением программ

MSC.ADAMS. Но для подтверждения расчетов требуется проверка на реальном объекте. Таким объектом является автономный мобильный робототехнический комплекс (АМРК) разработанный в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. [2, 7, 9-12]. Отличительной особенностью АМРК является возможность установки колесного, гусенично-модульного и роторно-винтового движителя. В данной статье рассмотрен вопрос моделирования движения шасси с модульно-гусеничным движителем.

Для исследования АМРК было использовано специализированное приложение для среды Adams, которое позволяет моделировать транспортные средства на гусеничном ходу. С помощью Adams Tracked Vehicle (ATV) проводится построение гусеничных машин, а так же моделируется их движение с различными скоростями по твёрдому или диформируемому грунту. АМРК состоит из корпуса и 4-х гусеничных модулей, состоящих из опорных катков, ведущей звезды и гусеничной цепи. Корпус имеет геометрические параметры и массо-инерционные характеристики. Кроме массы и моментов инерции корпуса, относительно главных осей, задаются координаты положение центра тяжести.Ведущие звезды радиусом 0, 215 м. приводят в движение гусеничный обвод. Зацепление ведущий звезды и траков происходит путем контактного взаимодействия с каждым из траков гусеничной цепи. Гусеничная цепь каждого модуля состоит из 29 траков с шагом 99 мм.



а

б

в

Рисунок 1 - Фрагменты моделирования движения АМРК

Особенностью ATV является то, что модель деформируемого грунта помнит историю нагружения, поэтому в данной программе удобно моделировать многопроходность. В качестве модели грунта используется модель, описанная в работах

[13, 14]. Модель задается в виде файла с описанием параметров грунта.

Для разработанной модели АМРК было проведено моделирование движение по опорной поверхности с храктеристиками близкими в песчаной поверхности береговых зон. Было рассмотрено два случая движения: прямолинейное и разворот на 180 градусов с радиусом поворота центру шасси равным 5 метров.

На рис. 1 показаны этапы моделирования движения.

На рис. 1, *а* показано начало движения АМРК. На данном этапе происходит набор тестовой скорости. На участке (рис.1, *б*) происходит поворот шасси. Данные о силах, моментах и скоростях фиксируются. На участке (рис. 1, *в*) АМРК продолжает прямолинейное движение. Исследуемые параметры также фиксируются.

В результате заездов по тестовому участку были записаны значения сил сопротивления движения при повороте и прямолинейном движении. На рис. 2 показано изменение силы суммарной для случаякриволиненого (сверху) и прямолиненого (снизу) движения. Средние значения при при криволинейном движении составили 1,94 Н, при прямолинейном – 1,6 Н.

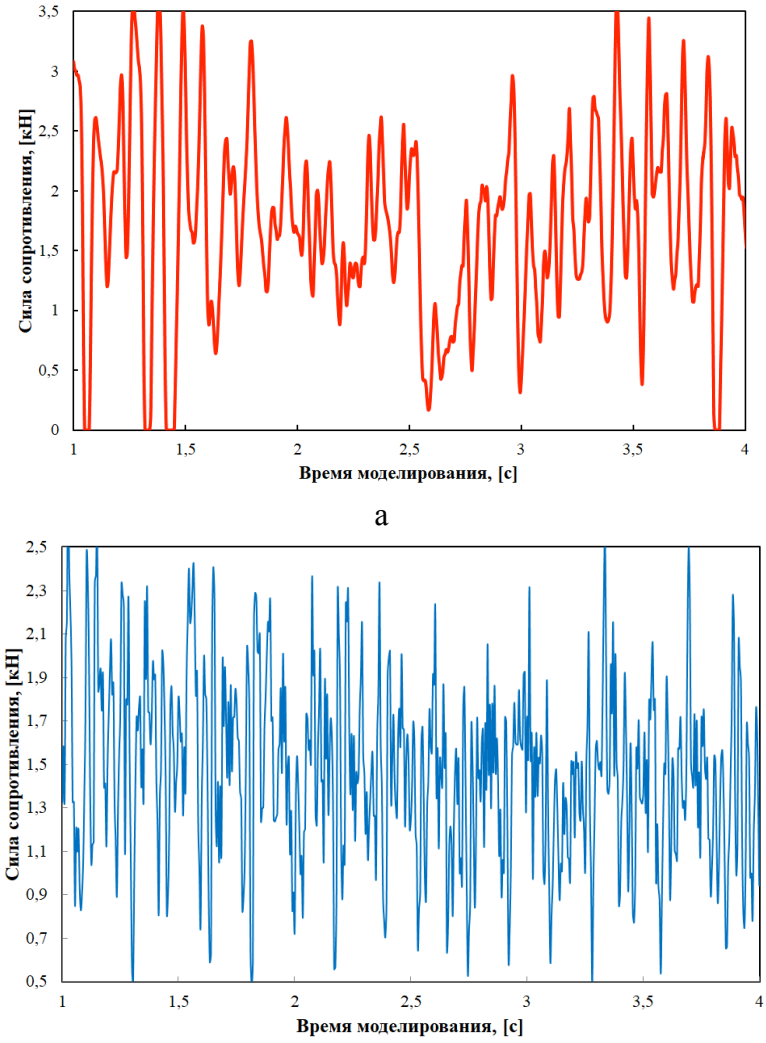


Рисунок 2 - Графики изменения силы сопротивления движения АМРК по песку на криволинейном (а) и прямолинейном (б) участках

Полученне данные соответсвуют проведенным экспериментальным исследованиям [15-19]. Ранее авторами статьи были проведены экспериментальные исследования по замеру параметров грунта в береговой зоне и сил сопротивления АМРК в данных условиях. Из полученных данных были получены характеритики грунта вошедшие в

модель грунта в ATV. Средние значения силы сопротивления движения по результатнескольких замеров изменялись в пределах 1,45-1,7 кН. А среднее составило 1,6 кН. Эти данные использовались для отладки модели при прямолинейном движении АМРК.

Таким образом были получены следующие результаты:

Построена модель АМРК в среде ATVc гусенично-модульным движителем.

Проведено моделирование прямолиненого и криволинейного движения АМРК по песчаному опорному основанию.

Построены графики измеения параметров модеи во времени. Получено, что средние значения сопротивления движения при криволинейном движении составили 1,94 кН, при прямолинейном 1,6 кН.

Максимальное отклонение теоретических и экспериментальных данных составило не более 10%.

Дальнейшие исследования связны с моделированием разворота машины на месте, движением по другим типам опорных оснований, оценке эффективности работы в береговой зоне.

Данная работа проводится при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых - докторов наук МД-226.2020.8.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barber D.M., Mills J.P.* 2007 Vehicle based waveform laser scanning in a coastal environment *Proceedings of 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Pradua, Italy, 2007.*
2. *Beliakov V. et al.* 2017 Coastal monitoring of the Okhotsk Sea using an autonomous mobile robot *Science of Tsunami Hazards* 36-1 1-12.
3. *Bio A. et al.* 2015 Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: two Portuguese case studies *Journal of Integrated Coastal Zone Management* 15-1 47–63.
4. *Didier D. et al.* 2015 Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model *J. Mar. Sci. Eng*. 3 560–590.
5. *Incoul A. et al.* 2014 Mobile laser scanning of intertidal zones of beaches using an amphibious vehicle *INGEO 2014: 6th international conference on engineering surveying, Prague, Czech Republic* 87–92.
6. *Kramer J., Hunter G.* 2007 Performance of the StreetMapper Mobile LiDAR Mapping System in «Real World» Projects» *Photogrammetric Week '07* 215–225.
7. *Kurkin A. et al.* 2015 Autonomous Robotic System for Coastal Monitoring *Twelfth international conference on the Mediterranean coastal environment (MEDCOAST 15)* 1 and 2 933-943.
8. *Wübbold F. et al.* 2015 Application of an autonomous robot for the collection of nearshore topographic and hydrodynamic meas-urements *Coastal Engineering Proceedings* 1 53.
9. *Zaytsev A. et al. 2017* Coastal monitoring of the Okhotsk sea using an autonomous mobile robot *Science of Tsunami Hazards 2015* 36 1 1-12.
10. *Kurkin A. et al.* 2017 Study of coastal soil surfaces of sakhalin island *Paper presented at the 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017* 2 775-785.
11. *Kurkin A. et al.* 2017 Unmanned Ground Vehicles for Coastal Monitoring *International Journal of Imaging and Robotics* 17-1 64-75.
12. *Kurkin A. et al.* 2017 Autonomous Mobile Robotic System for Environment Monitoring in a Coastal Zone *Procedia Computer Science* 103 459–465.
13. *Bekker M.* 1960 Theory of land locomolion. University of Michigan, Press, 520 p.

14. *Wong J.Y.* 2010. Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering, Elsevier, 463 p.
15. *Makarov V. et al.* 2017 Study of trafficability conditions of typical soils of coastal zones of sakhalin island (Russian Federation) *Paper presented at the 19th International and 14th European-African Regional Conference of the ISTVS*
16. *Belyaev A.M. et al.* 2019 Field research of drag-and-traction characteristics of mobile robotic system in coastal zone *Journal of Physics: Conference Series* 1177(1) 012050.
17. *Belyaev A.M., Belyakov V.V., Makarov V.S.* 2020 Study of efficiency of a 6x6 all-terrain vehicle in coastal zone *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 709(4) 044030.
18. *Belyaev A.M., Makarov V.S.* 2018 Method of assessment of special wheel chassis mobility in cases of sand-gravel bases crossing *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 194(2) 022019.
19. *Belyaev A.M. et al.* 2018 Analysis of the main bases of the coastal zone, as a pathway for the movement of special vehicle and monitoring complexes *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 386(1) 012002.

УДК 62-621.2.1

ДИДМАНИДЗЕ О.Н .
Российский государственный аграрный университет
им. К.А. Тимирязева
АФАНАСЬЕВ А.С.
Санкт-Петербургский горный университет
ХАКИМОВ Р.Т.
Санкт-Петербургский государственный
аграрный университет

МЕТАНОВОЕ ЧИСЛО ПРИРОДНОГО ГАЗА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОВОГО ДВС

Аннотация. Россия является крупнейшей нефтегазоносной страной, которая по разным оценкам занимает вторую место по добыче энергетического ресурса в мире, уступая США. Уренгойское газодобывающее месторождение относится к классу сверх гигантских. Разведанные запасы газа превышают 16 триллионов кубометров общих и 10,2 триллионов в остатке (2-я строчка топа по запасам в мире). Месторождение находится на территории Ямало-Ненецкого автономного округа, близко к северному полярному кругу.
Помимо 16 трлн. кубометров природного газа, месторождение содержит около 1,1 трлн. кубометров газового конденсата. Уренгойское месторождение было открыто еще в середине 60-х годов прошлого века.
Химический состав добываемого природного газа различается в зависимости от месторождения. В любом случае основным и ценным компонентом является метан (CH_4), содержание которого составляет от 70 до 98 %.
Углеводороды, начиная с этана, считаются тяжёлыми. Они образуются только в процессе образования нефти и также называются специфическими «нефтяными» газами. Их наличие в отобранных пробах свидетельствует о залежах нефти.

Ключевые слова*:* природный газ, газовые смеси, газовый двигатель внутреннего сгорания, метановое число, энергоэффективность, многофакторный регрессионный анализ, рабочий процесс.

DIDMANIDZE O.N.
Russian state agrarian university
named after K.A. Timiryazev
AFANASIEV A.S.
Saint-Petersburg Mining University
KHAKIMOV R.T.
Saint-Petersburg state agrarian University

METHANE NUMBER OF NATURAL GAS AND ITS INFLUENCE ON THE EFFICIENCY OF THE GAS ENGINE WORKING PROCESS

Abstract. Russia is the largest oil and gas country, which according to various estimates is the second largest energy resource in the world, behind the United States. The Urengoy gas field belongs to the super-giant class. The proven gas reserves exceed 16 trillion cubic meters in total and 10.2 trillion in the remainder (the 2nd line of the top reserves in the world). The field is located on the territory of the Yamalo-Nenets Autonomous district, close to the Arctic circle.
In addition to 16 trillion. the field contains about 1.1 trillion cubic meters of natural gas. cubic meters of gas condensate. The Urengoy field was discovered in the mid-60s of the last century.

The chemical composition of the extracted natural gas varies depending on the field. In any case, the main and valuable component is methane (CH4), whose content ranges from 70 to 98 %. Hydrocarbons, starting with ethane, are considered heavy. They are formed only in the process of formation of oil and are also referred to as a specific "oil" gases. Their presence in the sampled samples indicates oil deposits.

Keywords: natural gas, gas mixtures, gas internal combustion engine, methane number, energy efficiency, multi-factor regression analysis, workflow.

Компонентный состав различных нефтяных топлив, изучал в своих научных трудах Вибе И.И. еще в 1962 году, он рассматривал закономерности изменения скорости сгорания внутри цилиндра двигателя на основании общих уравнений химических реакций [3].

Согласно ГОСТу [9] на практике принято считать октановое число нефтяных топлив согласно методике в основе которого лежит уравнение:

$$\text{ОЧ}_\text{р} = \sum_{i=1}^{n} \beta_i \cdot x_i, \quad (1)$$

где: n – число компонентов в топливной смеси;
β_i – наличие i-го числа компонента в топливной смеси;
x_i – октановое число i-го числа компонентов в топливе.

Октановое число (ОЧ) различных нефтяных топлив показывает устойчивость к детонации в процессе сгорания рабочего тела в цилиндре двигателе. Анализ различных источников показал, что ОЧ для природного газа составляет в диапазоне 110…120 единиц, это свидетельствует о высокой энергоэффективности топлива в процессе его горения, но считать энергоэффективность природного газа по методу нефтяных топлив не совсем корректно [1, 2, 5]. В данном случае было бы разумно использовать метод, способный определять энергоэффективность газообразного топлива на основе его природного компонентного происхождения с учетом теории межмолекулярного взаимодействия. В отечественной науке, в области исследований свойств газов, достаточно глубоко изучены фазовые превращения различных газов с учетом внешних температурно-динамических воздействий [15]. В результате было разработано множество номограмм на основе систем смесей газов характеризующие фазовые равновесия одно, двух и многокомпонентных газов. Подобные теоретические исследования позволили детально понять картину изменения межмолекулярного взаимодействия отдельных газов (метана, пропана, этана, бутана, водорода, углекислого газа и д.т.) между собой с целью достижения в конечном итоге максимального теплового эффекта в процессе реакции окислителя и природного газа (газовых смесей). Все вышеуказанные научные достижения были направлены на развитие нефтегазовых предприятий. Подобных исследований в отношении свойств газообразных топлив для транспортных тепловых двигателей в России недостаточно, что вызвало необходимость уделить этому вопросу достаточно серьезное внимание.

Фирмой AVL (Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List) с 1960 года проводились экспериментальные исследования в отношении свойства природного газа, состоящем на 92…98% из метана. Согласно экспериментальным исследованиям границы качества как компримированного, так и сжиженного природного газа, определяются его теплотой сгорания и значением детонационной стойкости при горении. Метановое число (МЧ) – показатель детонационной стойкости метана в газовой смеси состоящей из двух частей, в первой части метан CH_4 (принимается за 100%), а во второй части газовая смесь состоящей из водорода H_2 и метана CH_4 (принимается за 0%) [4]. В данном случае выбирается эталонное газообразное топливо, энергоэффективность которого, по составу, выражается через так называемое МЧ, которое должно равняется 75 по методу AVL.

Методики исследования метанового числа.

Единой общепризнанной методики по определению МЧ в настоящее время нет, все

существующие методики это разработки отдельных компаний несущий личностный характер. В связи с этим используя различные методики при определении МЧ, возникает расхождение в диапазоне от 5 и до 12 единиц. В настоящее время в России разрабатывается проектный ГОСТ Р, где предусматривается метод определения метанового числа в основе которого лежит следующее выражение [9]:

$$МЧ = 1{,}445 \cdot (ОЧ_М) - 103{,}42, \quad (2)$$

где $ОЧ_М$ – октановое число по моторному методу.

Метод AVL предусматривает определение ОЧ следующим образом:

$$ОЧ_М = (137{,}78 \cdot xCH4) + (29{,}948 \cdot xC2H6) + (-18{,}193 \cdot xC3H8) + \\ + (-167{,}062 \cdot xC4H10) + (181{,}233 \cdot xCO2) + (26{,}994 \cdot xN2), \quad (3)$$

где x – мольная доля входящих в состав газа компонентов: CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, CO_2 и N_2.

Как известно МЧ может влиять на основные эксплуатационные показатели ДВС, для этого кратко рассмотрим известные методики определения МЧ природного газа и на его основе газовых смесей из различных месторождений.

Согласно совместным экспериментальным исследованиям компаний AVL и CARB (*California air resources board*) по определению МЧ различных газов метанового ряда и на их основе газовых смесей, использовали число Воббе метана при стандартных условиях, которое определяется по формуле:

$$Ws(p_{src}, T_{src}) = \frac{\bar{H}_{S,w}(p_{src}, T_{src})}{\sqrt{\rho_w(p_{src}, T_{src})}}, \quad (4)$$

где p_{src} – давление равное окружающей среде p = 0,1 МПа;
T_{src} – температура равная окружающей среде T = 20 °С;
$\bar{H}_{S,w}$ – высшая теплота сгорания метана при условиях равной коружающей среде;
ρ_w – относительная плотность метана.

В совместной работе по определению МЧ получена зависимость методом наименьших квадратов и выглядит следующим образом [14]:

$$МЧ_{AVL} = 59{,}4 - 0{,}39МЧ_{CARB} + 0{,}0071МЧ^2_{CARB}. \quad (5)$$

Совместно разработанная методика организациями CARB и KTH представила следующее уравнение определяющая МЧ природного газа:

$$МЧ = 1{,}624\left\{-406{,}14 + 508{,}04\left(\frac{H}{C}\right) - 173{,}55\left(\frac{H}{C}\right)^2 + 20{,}17\left(\frac{H}{C}\right)^3\right\} - 119{,}1, \quad (6)$$

где H/C – показатель отношения количества атомов водорода к углероду.

Использовав указанные методики, при определении МЧ тестируемого природного газа, пришли к следующему выводу, необходимо создавать искусственные газовые смеси на основе метана, которые позволят повысить энергию тепловыделения за счет оптимального подбора МЧ, при этом будет обеспечиваться детонационная стойкость работы газового двигателя в широком диапазоне нагрузок.

В целях реализации поставленной цели, были проведены экспериментальные исследования влияния МЧ на эффективность работы газового ДВС, при этом были покомпонентно составлены три газовые смеси на основе природного газа, данный состав представлен в табл. 1.

Таблица 1.

Качественный состав исследуемых газовых смесей на основе метана

Газ 1 (МЧ-75)	Газ 2 (МЧ-98)	Газ 3 (МЧ-104)	Моль, %
CH_4 – 83,2	CH_4 – 89	CH_4 – 99,7	82.6 – 99.7 %
C_2H_6 – 8	C_2H_6 – 5,2	C_2H_6 – 0,3	0 – 12.1 %
C_3H_8 -3,6	C_3H_8 – 2,8	C_3H_8 – 0	0 – 3.6 %
C_4H_{10} – 1,5	C_4H_{10} – 1,1	C_4H_{10} – 0	0 – 1.5 %
CO – 3	CO_2 – 1,5	H_2 – 0	0 – 3%
N_2 – 0,7	N_2 – 0,4	N_2 – 0	0 – 0.7 %

В результате можно подобрать качественный состав газовой смеси на основе метана, для любого транспортного ДВС без доработок и конструктивных изменений [6, 7]. В целях подтверждения достоверности научных положений, выводов и рекомендаций бал разработан многофакторный регрессионный анализ влияния МЧ на эффективность рабочего процесса газового ДВС.

Многофакторный регрессионный анализ был выполнен по методике Ящерицына П.И. [8]. В данном случае при последовательном планировании эксперимента предполагается, что общее уравнение модели будет иметь следующий вид [8, 10]:

$$Y = b_0 + \sum_{k=1}^{k} b_i X_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{k} b_{ij} X_i X_j + \cdots + \sum_{i=1}^{k} b_{ij} X_i^2, \quad (7)$$

где Y – значение отклика экспериментальных наблюдений;
b_0 – оценка коэффициента регрессии;
X_{ij} – натуральный i-й уровень j-го фактора;
k – число контролируемых факторов.

Наиболее рациональными считаются планы по количеству проведенных опытов предложенные в свое время Хартли [8, 11]. Как известно их главным достоинством является близость к D-оптимальным планам и принципиальных подход композиционного построения. Как и все центральные композиционные планы включают ядро, звездные точки и опыты в центре плана. Основные характеристики некоторых планов Хартли представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Условия эксперимента, [12]

Уровень фактора	Факторы		
	φ_2 (x_1)	ε (x_2)	МЧ (x_3)
↑ (+1)	50	13	104
↕ (0)	43	12	98
↓ (-1)	35	11	75

Согласно справочным данным и литературным источникам, искомую зависимость можно определить, выразив через многомерный полином второго порядка. В данном случае для получения достоверного экспериментального результата представленной математической модели был принят не композиционный план второго порядка [13]. В целях достоверности теоретических исследований проводился эксперимент в лабораторных условиях с использованием газового двигателя. Испытания проводились с применением трех исследуемых газовых смесей и двух существующих газомоторных топлив используемых в России, каждый с соответствующим метановым числом.

Подробная методика расчета представлена в работе [7], по итогам расчёта выполнили сравнение значения из доверительного интервала с соответствующими значениями параметров модели. Преобразовав все значения согласно полученного доверительного интервала представим окончательную модель с численными значениями оценочных показателей коэффициентов регрессии:

$$Y = 120 - 3x_1 + 7x_2 + 4x_3 - 0{,}5(x_1x_2 + x_1x_3) - 3x_2x_3 + 485x_1^2 + \\ + 490 \cdot x_2^2 + 495x_3^2. \quad (8)$$

Полученное уравнение позволило построить зависимость влияния основных показателей (*МЧ, ε, φ_2*) на мощность газового ДВС при работе на исследуемых газовых смесях с различными МЧ. Полученная зависимость, представленная на рис. 1, хорошо иллюстрирует взаимосвязь МЧ, степени сжатия и регулировочных характеристик качества газовоздушной смеси на впуске в цилиндр двигателя.

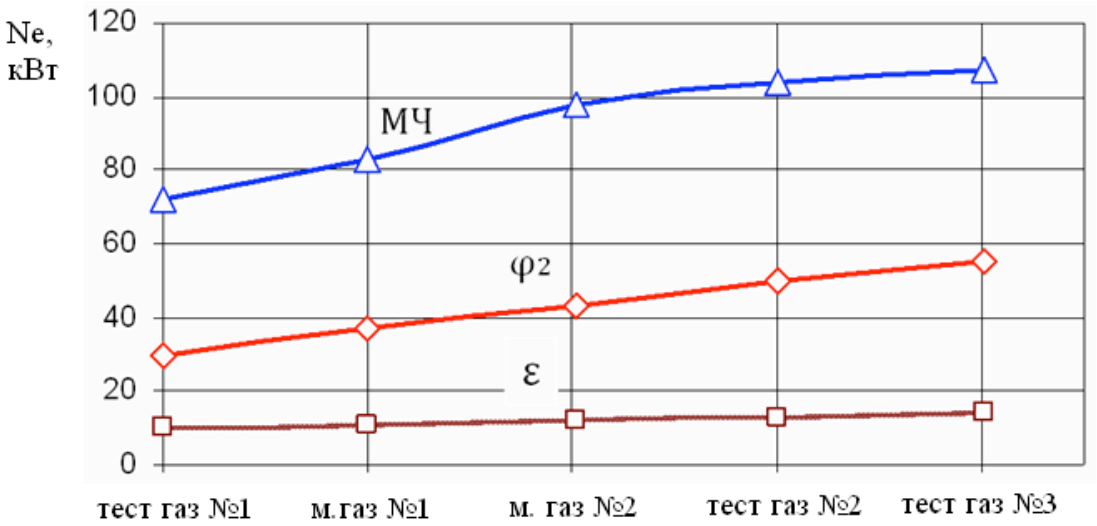


Рисунок 1 – Зависимость влияния метанового числа эффективной рабочего процесса газового ДВС:
Тест газ №1, 2, 3 – испытуемый газ (компонентный состав трех газовых смесей на основе метана для ДВС представленные в табл. 2; м. газ №1 и 2 – используемые в России природные газы в качестве моторного для ДВС

Для подтверждения адекватности разработанной модели планируемого эксперимента, влияния метанового числа на эффективность рабочего процесса газового ДВС, был использован пакет прикладных программ Microsoft Excel, где выполнили поэлементную обработку полученных результатов и получили зависимость влияния МЧ на мощностные показатели газового ДВС.

Полученные экспериментальные результаты подтвердили достоверность полученных теоретических исследований. Была получена зависимость взаимосвязи между МЧ, степенью сжатия и углом поворота коленчатого вала (ПКВ) φ_2. Данная взаимосвязь обоснована увеличением эффективной мощности 10…15%.

Таким образом при проведении теоретических и экспериментальных исследований были получены следующее результаты.

1. Определен оптимальный интервал метанового числа газовых смесей на основе метана: при интервале МЧ = 75…97, степени сжатия ε = 12 и угле φ_2 = 15…18° ПКВ, наблюдается увеличения эффективной мощности. Увеличение мощности наблюдается также при степени сжатия ε = 13, при этом наблюдаются начальный предел детонационной стойкости во избежание образования явной детонации, рекомендуется использовать газовую смесь с МЧ равной пределу 98…104.

2. Разработан алгоритм позволяющий адаптировать при использовании различных газовых смесей к соответствующим типам транспортным двигателям. Проведенный эксперимент показал, что наиболее подходящие газовые смеси для двигателя ГД 8ГЧН12/13 является газ №2 с МЧ = 98 и газ №3 с МЧ = 104.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дидманидзе О.Н.* Исследования показателей тепловыделения газовых двигателей / О.Н. Дидманидзе, А.С. Афанасьев, Р.Т. Хакимов / Записки Горного института, 2018. Т. 229. С. 50-55.

2. *Афанасьев А.С.* Обоснование режимов оценки экологической безопасности дизелей автомобильной техники / А.С. Афанасьев, Р.Т. Хакимов, С.М. Загорский // Вестник таджикского технологического университета, 2015. №3 (31).

3. *Вибе И.И.* Новое о рабочем цикле двигателя (скорость сгорания и рабочий цикл двигателя). – М.: Машгиз, 1962. – 271 с.

4. *Генкин К.И.* Экономия топлива за счет применения бедных смесей и оптимального регулирования / Автомобиль,1951. № 8. С. 29–32.
5. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание. – Л.: Недра, 1966. – 327с.
6. Малкова М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М.П. Малкова. 2-е изд. – М.: Энергия, 1975. - 512 с.
7. Хакимов Р.Т., Дидманидзе О.Н., Шереметьева М.И. Методы определения метанового числа компонентного состава природного газа / В сборнике: Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения сборник трудов III Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов. ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики», 2019. С. 74-84.
8. Ящерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении: Справочное пособие. – Мн.: Выш. шк., 1985. – 286 с.
9. ГОСТ Р 56333-2015. ГАЗЫ ГОРЮЧИЕ ПРИРОДНЫЕ. Стандартные условия измерения и вычисления физико-химических свойств.
10. Didmanidze O.N., Hakimov R.T., Silla S.A. 2019 The non-stationary process of heat-mass exchange of liquefied methane in a cryogenic fuel tank of automotive and tractor equipment *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 022239.
11. Erokhin M.N., Didmanidze O.N., Aldoshin N.V., Khakimov R.T. 2019 The combustion process and heat release in the gas engine *Proceeding of 7th International Conference on Trends in Agricultural Engineering 2019 (PAE 2019)* 607-611.
12. Хакимов Р.Т., Дидманидзе О.Н., Парлюк Е.П. Определение метанового числа состава сжиженного природного газа / Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, 2019. № 2 (55). С. 150-159.
13. Уайлд Дж. Методы поиска экстремума. – М.: Наука, 1967. – 267 с.
14. Kagan L., Valiev D., Liberman M., Gamezo V., Oran E., Sivashinsky G. 2010 Effects of hydraulic resistance and heat losses on deflagration-to-detonation transition *In Deflagrative and detonative combustion (eds G.D. Roy & S.M. Frolov)* 157–168.
15. Лебедев О.Н. Исследование движения фаз и фазовых превращений в однородном нестационарном двухфазном потоке / Тр. НИИВТ. – Новосибирск, 1973. Вып. 90. С. 3-17.

УДК 653.13(075.80)

ДОБРОМИРОВ В.Н.
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
МАРТЫНОВ Н.В.,
АВРАМОВ Д.В.
ООО «НПФ «ЭлектроГидроДинамика»

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ СТЕКЛА «ТРИПЛЕКС» ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО–ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация. Транспортные и транспортно–технологические машины является одним из наиболее массовых видов техники, используемой в интересах развития современной цивилизации. К сожалению их производство сопряжено с большими затратами материальных, сырьевых и энергетических ресурсов, а использование – со значительным негативным воздействием на окружающую среду. В статье рассматриваются некоторые факторы экологически вредного воздействия на окружающую среду, связанные, в частности, с процессом утилизации машин. Отмечается важность решения проблемы ресурсосбережения за счет вторичного использования конструкционных материалов. Анализируется современное состояние технологического обеспечения процесса переработки автомобильного стекла триплекс, отмечены недостатки существующих технологий, предложена к использованию технология, основанная на применении электрогидравлического эффекта. Приводятся результаты лабораторных экспериментальных исследований эффективности этой технологии при утилизации автомобильного триплекс стекла. Сделан вывод о целесообразности применения технологии в промышленных масштабах.

Ключевые слова: транспортно-технологические машины, экологическая безопасность, ресурсосбережение, утилизация, стекло триплекс, электрогидравлическая технология.

DOBROMIROV V.N.
Saint Petersburg State University of Architecture and
Civil Engineering
MARTYNOV N.V.,
AVRAMOV D.V.
"NPF "Electrohidrodinamica"

ELECTROHYDRAULIC TECHNOLOGY FOR PROCESSING TRIPLEX GLASS IN THE RECYCLING OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES

Abstract. Transport and transport–technological machines are one of the most popular types of equipment used for the development of modern civilization. Unfortunately, their production involves high costs of material, raw materials and energy resources, and their use has a significant negative impact on the environment. The article considers some factors of such an environmentally harmful impact on the environment, in particular, related to the process of recycling machines. The importance of solving the problem of resource saving due to the secondary use of structural materials is noted. The current state of technological support for the process of processing triplex automotive glass is analyzed, the disadvantages of existing technologies are noted, and a technology based on the application of electrohydraulic effect is proposed for use. The results of laboratory experimental studies of the effectiveness of this

technology in the recycling of automotive triplex glass are presented. The conclusion is made on the feasibility of applying the technology on an industrial scale.

Keywords: transport and technological machines, environmental safety, resource saving, recycling, triplex glass, electro- hydraulic technology.

Введение. Современный мировой парк автотранспортных средств (АТС), в том числе автомобильных базовых шасси транспортно-технологических машин, насчитывает более 800 млн. единиц техники. По прогнозам аналитиков за ближайшие 15 лет его численность может возрасти в 3,5…4 раза [1]. При несомненно важной роли этой техники в обеспечении промышленно - хозяйственной деятельности общества, самоходные транспортные и транспортно-технологические машины не только создают социально – экономические проблемы в сфере обеспечения безопасности дорожного движения [2], но и являются одним из наиболее значимых источников экологически вредного воздействия на окружающую среду и человека [3, 4]. С учетом современных тенденция развития конструкции АТС и ТТМ есть основание предполагать, что акцент в обеспечении их экологической безопасности, за счет постепенного вывода из эксплуатации техники с двигателями внутреннего сгорания и замены их на электрические источники энергии, сместится из области борьбы с загрязнением атмосферы в область энерго- и ресурсосбережения, экологически чистой утилизации с широким применением реновации и рециклирования компонентов машин [5]. Реализация такого подхода требует массового применение в конструкциях АТС и ТТМ экологически дружественных материалов, обеспечивающих их беспроблемное вторичное использование [6, 7]. Однако, не все компоненты данных машин могут сегодня соответствовать этим требованиям. Одними из них являются автомобильные стекла, изготовленные по технологии «триплекс». Такие стекла, относящиеся к разряду безопасных изделий, являются многослойными, состоящими из двух стекол, склеенных между собой с помощью специальной пленки. При разрушении подобного стекла его осколки не разлетаются в стороны, а остаются прикрепленными к пленке. Это повышает безопасность изделий, но затрудняет процесс получения кондиционного стеклобоя. Существующие современные технологические линии по вторичной переработке стекла в большой степени предназначены для утилизации использованной стеклотары и отслужившего свой срок оконного стекла. Для переработки стекла «триплекс» используют специальные технологии двухстадийного дробления в многовалковых установках с последующей сепарацией и ручной сортировкой [8]. Так как при измельчении триплекса образуется много мелких кусочков пленки, которые не удаляются полностью удалить аспирацией и оптической сортировкой, полученный стеклобой не соответствует требованиям стандартов по количеству примесей [9] и не находит широкого повторного применения. Анализ традиционной технологии переработки триплекс стекла показывает, что она длительная, дорогостоящая и экологически небезопасная, а в результате переработки получается стеклобой невысокого качества. Энергозатраты на измельчение триплекса механическим способом составляют от 14,8 до 22 кВт-час/т [10].

Проведенные расчеты показывают, что при численности парка АТС в России около 50 млн. единиц и при среднем сроке службы машины 10 лет ежегодная потребность в переработке триплекс стекла может достигать 30 тыс. тонн. Подобные объемы переработки диктуют необходимость применения более совершенных технологий. Одним из направлений их создания может быть технология, основанная на использовании электрогидравлического эффекта.

Задача, объект, предмет и методы исследования. Электрогидравлический эффект (ЭГЭ), как способ трансформации электрической энергии в механическую, был сформулирован в 1950 г. Л.А. Юткиным. Суть ЭГЭ состоит в том, что при импульсном электрическом разряде в жидкости между двумя электродами, возникает комплекс

действующих факторов, способных оказывать различное воздействие на обрабатываемую среду [11]. Задача проведенного исследования – оценить возможность создания технологии утилизации автомобильного стекла «триплекс» с использованием действующих факторов электрогидравлического эффекта. Объектом исследования является многослойное, состоящее из двух стекол, прочно скрепленных между собой с помощью поливинилбутиральной пленки, автомобильное стекло. Предмет исследование – процесс разрушения, дробления и рассева стекла на фракции. Метод исследования – экспериментальные исследования процесса разрушения стекла типа «триплекс» в специально созданной лабораторной электрогидравлической установке.

Результаты и обсуждение. Принципиальная схема созданной для проведения исследований электрогидравлической установки представлена на рис. 1.

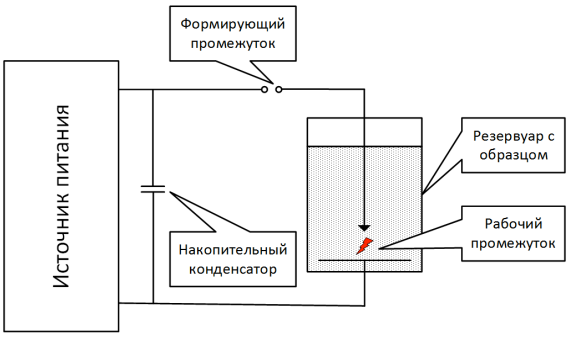


Рисунок 1 – Принципиальная схема электрогидравлической установки

Действующие факторы электрогидравлического эффекта включают в себя сверхвысокие гидравлические джавления, перемещения жидкости с высокими скоростями, мощные кавитационные процессы, инфра– и ультразвуковые излучения, мкеханические резонансные явления. При этом ключевым фактором разрушающего воздействия является сверхвысокое гидравлическое давления в зоне разряда, способное производить выборочное разрушение компонентов обрабатываемого материала. В процессе исследований был опытным путем произведен подбор мощности высоковольтного электрического разряда, обоспечивающего дробление стекла и отделение его от пленки без ее разрушения. Для проведения экспериментов лобовое стекло делилось на фрагменты. Обрабатываемые куски стекла триплекса укладывались на классификационную решетку и обрабатывались высоковольтными электрическими разрядами в воде, которой была заполнена установка. Схема организации процесса дробления стекла «триплекс» приведена на рис. 2.

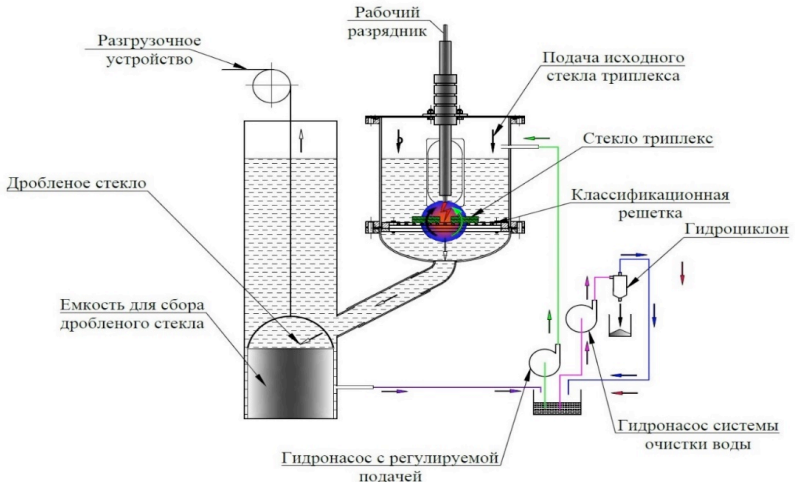


Рисунок 2 – Схема организации процесса дробления стекла «триплекс»

На рис. 3 показан процесс дробления и расслоения стекла «триплекс» по этапом его электрогидравлической обработки.

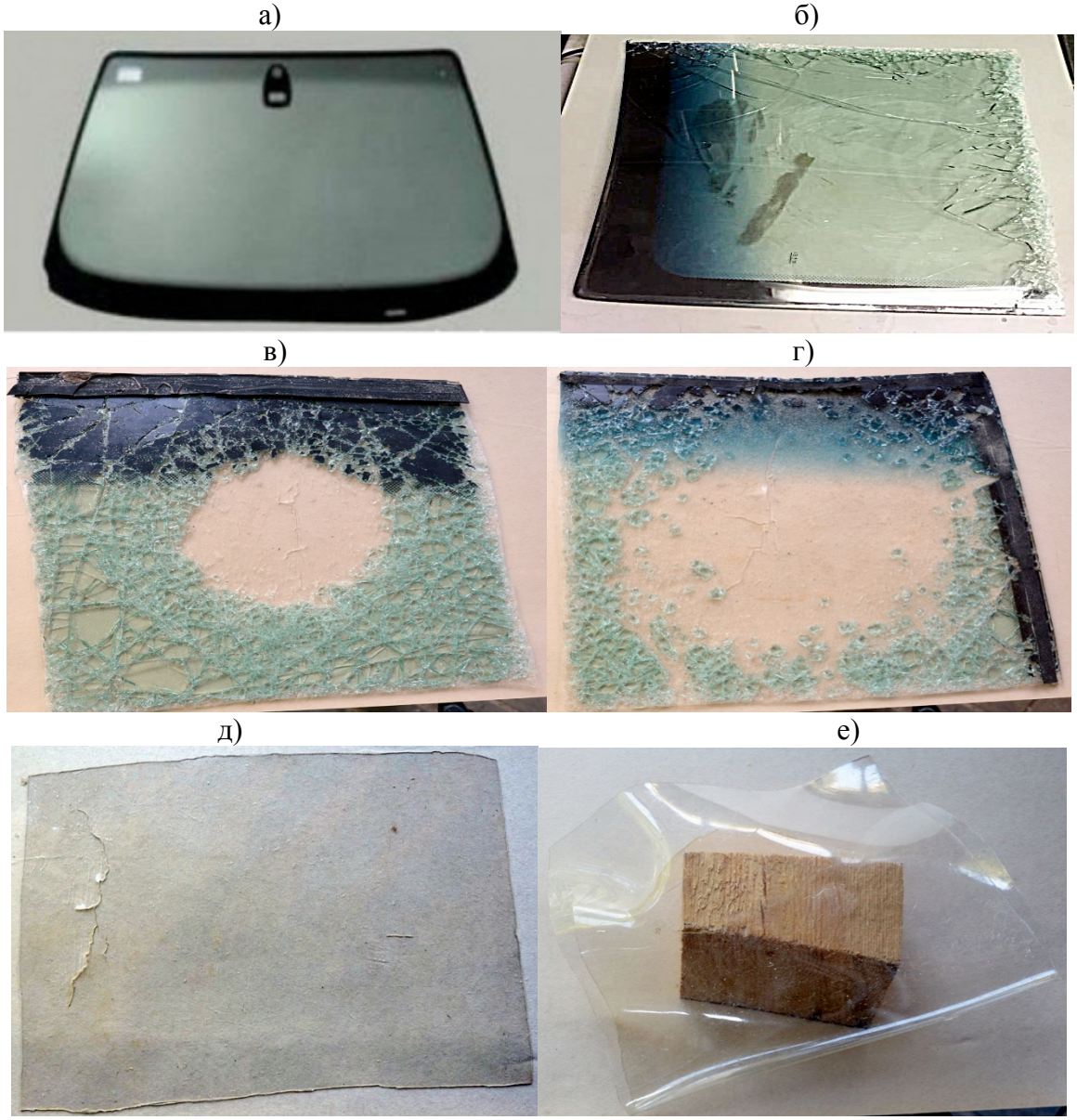


Рисунок 3 – Результаты дробления и расслоения стекла по этапам обработки:
а) – исходное состояние стекла; б) – начальная стадия очистки подложки от стекла; в) - промежуточная стадия очистки подложки от стекла; г) - вторая стадия очистки подложки от стекла; д) - полностью очищенная подложка стекла; е) - высокая степень чистоты подложки стекла «триплекс»

Результаты проведенных экспериментов показали, что в ходе электрогидравлической обработки стекла «триплекс» удается объединить процессы дробления, отделения стекла от полимерной подложки, промывки и классификации стеклобоя. При этом имеет место высокое качество отмыва стеклобоя и удаления загрязняющих продуктов. В отличии от многовальцевого дробления в мелких фракциях отсутствуют продукты износа мелющих элементов и при переработке не образуется стеклянная пыль. Варьируя мощностью электрического импульса возможно задавать размер получаемой стеклянной фракции. Расчетные затраты электроэнергии на переработку 1 тонны стекла «триплекс»составляют 4…4,5 кВт·ч. Время переработки одного стекла массой 15 кг и площадью 1,31 кв.м составляет 65 сек. Использование в

процессе обработки классификационных решеток позволяет улавливать очищенный стеклобой требуемой фракции (рис. 4).

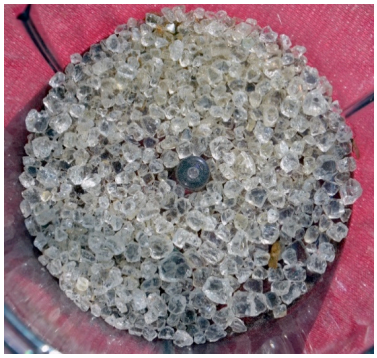


Рисунок 4 – Дробленый стеклобой фракции 6 мм

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования показали, что электрогидравлическая технологиябеспечивает эффективное отделение стекла от подложки при высокой степени очистки подложки. Фракционный состав получаемого материала регулируется подбором режимов работы установки и применением нужных классификационных решеток. Затраты электроэнергии на переработку 1 тонны стекла «трипле»ссоставляют 4…4,5 кВт·ч, чтов 4…5 раз меньше, чем энергозатраты на измельчение механическим способом (от 14,8 до 22 кВт·час/т).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Добромиров В.Н., Евтюков С.С., Алейник В.И.* Автотракторный транспорт. Основы теории движения и элементы расчета: учебное пособие. - Под общ. ред. 2. В.Н.Добромирова. - СПб.: ИД «ПЕТРОПОЛИС», 2018. - 248 с.
2. *Afanas'ev A.S., Egoshin A.M., Alekseev S.V.* 2018 Justification of logistical approach application in road safety management *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 194(7) 072001.
3. *Белоусов Б.Н., Добромиров В.Н., Аврамов Д.В., Мартынов Н.В.* Автомобиль и экология / Автомобильная промышленность, 2019. №8. С.1-7.
4. *Fedotov V., Afanasiev A.* 2018 Concept of air environment cleaning of natural and technogenic systems of motor transport using mobile devices *Transportation Research* 36 179-184.
5. *Годжаев З.А.. Аврамов Д.В.. Мартынов Н.В.. Белоусов Б.Н., Добромиров В.Н.* Экологическая безопасность транспортно-технологических средств / Сельскохозяйственные машины и технологии, 2019. Т. 13. №2. С. 40–47.
6. *Звонов В.А., Кутенев В.Ф., Кисуленко Б.В., Козлов А.В., Теренченко А.С.* Утилизация автомобильной техники: концепция специального технического регламента / Стандарты и качество: научно-технический и экономический журнал, 2004. № 8. С. 31−34.
7. Госстандарт России. ГОСТ Р 53692-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов. - М.: «ФГПУ СТАНДАРТИНФОРМ», 2009. – 16 с.
8. Эко Технопром – Юг. Инновации в развитии. Утилизация стекла, 2019. http://www.musor1.ru/services/utilizatsiya-stekla/ - открытый [12.03.2020].
9. Госстандарт России. ГОСТ Р 52233-2004 Тара стеклянная. Стеклобой. Общие технические условия. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. - 8 с.
10. WASTEorg.au. Европейский опыт по вторичной переработке автомобильного стекла, 2012. http://waste.org.ua/modules.php?name=Pages&pa=showpage&pid=77 .
11. *Юткин Л.А*. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. - Л.: Машиностроение, Ленинградское отд-ние, 1986. - 263 с.

УДК 656.021.2

КАЦУБА Ю.Н.
Санкт-Петербургский горный университет
кафедра транспортно-технологических
процессов и машин
ГРИГОРЬЕВА Л.В.
Санкт-Петербургский горный университет
кафедра физической химии

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация. В статье рассмотрены подходы применения метода искусственных нейронных сетей к решению задач обработки исходной информации о функционировании и прогнозирование состояния транспортной системы с целью оперативности управления на транспорте.

Ключевые слова: информация, управление, прогнозирование, искусственные нейронные сети, транспорт, дорожно-транспортная ситуация.

KATSUBA Y.N.,
GRIGORIEVA L.V.
Saint-Petersburg Mining University

IMPROVING THE TRANSPORT MANAGEMENT SYSTEM USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Abstract. The article considers approaches to applying the method of artificial neural networks to solving problems of processing initial information about the functioning and forecasting the state of the transport system in order to ensure the efficiency of transport management.

Keywords: information, management, forecasting, artificial neural networks, transport, road traffic situation.

Для оптимизации системы управления на транспорте необходимым условием является создание интегрированной системы управления транспортом. Актуальность данной задачи особенно просматривается в системе управления транспортом в мегаполисе. В связи с этим создание единого центра управления движением транспорта в мегаполисе на основе элементов интеллектуальной транспортной системы является перспективной.

Функционирование единого центра управления движением транспорта связано с необходимостью обработки большого массива исходной информации, собираемой в режиме реального времени. Для обработки данной информации необходимы большие объемы хранилищ баз данных, с возможностью их оперативной обработки.

Предлагается для обработки исходной информации о состоянии функционирования транспортной системы и оперативности управления на транспорте применять аппарат искусственной нейронной сети (ИНС).

С использованием ИНС должны решаться следующие задачи:

- анализ (мониторинг) дорожно-транспортной ситуации;
- эффективность взаимодействия различных видов транспорта;
- составление прогноза изменения дорожно-транспортной ситуации по различным

стратегиям;

– выработка рекомендаций по корректированию дорожно-транспортной ситуации, с возможностью переориентации движения транспортных потоков.

Для решения предлагаемых задач ИНС предварительно необходимо обучить на примерах рационального решения транспортных задач.

ИНС обладая чертами искусственного интеллекта и натренированная на ограниченном множестве данных, способна обобщать полученную информацию и показывать хорошие результаты на данных, ранее не применявшихся в процессе обучения [1].

Алгоритм обучения ИНС направлен на минимизацию ошибки на выходе сети, которая оценивается с помощью статистических показателей (таких как средняя абсолютная ошибка). Наиболее эффективной признается сеть с наименьшей ошибкой [2, 3].

ИНС в задачах прогнозирования может использоваться в качестве подсистемы выборки и принятия решений, передающей информацию другим подсистемам (например, автоматизированной системе управления на транспорте).

В задачах прогнозирования нечеткая нейронная сеть выполняет операцию универсального аппроксиматора функции от нескольких переменных, реализуя нелинейную функцию:

$$Y = f(x),$$

где $x(t) = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t), \ldots, x_n(t)\}$ – векторы входной информации (текущие измеренные значения параметров);

Y – реализация векторной функции нескольких переменных [4, 5, 6].

Предлагаемый метод состоит в использовании двух временных интервалов (окон) *Wi* и *Wo*, с фиксированными размерами *X* и *Y* соответственно. Эти окна, способны перемещаться с некоторым шагом, начиная с первого элемента, и предназначены для доступа к базе данных исходных значений параметров дорожно-транспортной ситуации полученных системой, причем первое окно *Wi*, получив такие данные, передает их на вход ИНС, а второе - *Wo* - на выход. Получающаяся на каждом шаге пара *Wi* → *Wo* используется как элемент обучающей выборки (распознаваемый образ, или наблюдение). Каждый следующий вектор получается в результате сдвига окон *Wi* и *Wo* на установленный интервал (часы, сутки и т.д.) [7, 8].

Нейронная сеть, обучаясь на этих наблюдениях и соответственно настраивая свои коэффициенты, пытается извлечь закономерности и сформировать в результате требуемую функцию состояния транспортной системы.

Важную роль имеет размер случайно инициализируемых синаптических связей. Рекомендуется случайно выбирать значения весовых коэффициентов, которые имеют следующий порядок:

$$Wi \approx \frac{1}{\sqrt{n(i)}},$$

где n (i) - число нейронных элементов в слое *i* [9].

Большую роль для эффективности обучения играет архитектура нейронной сети. Размерность входного и выходного слоев нейронной сети определяется из условия решаемой задачи или обучающей выборки.

Прогнозирование проводилось с использованием пакета Neural Network Toolbox программной среды Matlab. Исходное множество данных разделено на подмножества: обучающая выборка (70%), тестовая выборка (валидационная выборка (15%) и проверочная выборка (15%)) [10, 11].

С использованием программного продукта [12-15] были рассмотрены ИНС с 6, 7, 8 и 9 нейронами в скрытом слое, обученные разными методами (табл. 1).

Таблица 1.

Результаты обучения ИНС различными методами

Сеть	Структура	Метод обучения	MAE	MAPE	MSE	
net20	(8;6;1)	Метод Левенберга-Марквардта	216,87	25,03	119062,87	3,52
net4	(8;7;1)		212,53	23,46	99372,21	3,21
net8	(8;8;1)		196,38	23,45	108634,86	3,36
net16	(8;9;1)		222,66	31,67	111836,47	3,41
net27	(8;6;1)	Метод регуляризации Байеса	166,42	19,86	59548,45	2,49
net29	(8;7;1)		127,40	15,78	33444,26	1,86
net30	(8;8;1)		125,13	16,10	30866,07	1,79
net31	(8;9;1)		127,09	13,97	34274,97	1,89
net32	(8;6;1)	Метод масштабированных сопряженных градиентов	380,44	31,97	526712,18	7,40
net35	(8;7;1)		471,43	44,88	559684,91	7,62
net36	(8;8;1)		393,55	37,56	376308,40	6,25
net38	(8;9;1)		391,62	36,54	460802,88	6,92

Выбор ИНС–модели, для прогнозирования поставленной транспортной задачи, производится по наименьшему значению критерия *MAPE* (Mean Absolute Percentage Error – средняя относительная ошибка прогноза).

По результатам, наибольшей точностью прогнозирования обладает сеть *net* 31 со структурой (8; 9; 1) – 8 входов, 9 нейронов в скрытом слое, 1 нейрон в выходном слое – обученная методом регуляризации Байеса. Отношение стандартной ошибки к среднему значению составило 1,89%, что дает основание считать модель адекватной.

Таким образом, предложенный метод совершенствования системы управления на транспорте с применением аппарата искусственных нейронных сетей, позволяет получить быстродействие за счет распараллеливания потоков обработки информации, повышение оперативности и достоверности принимаемого решения по состоянию транспортной системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Elhadef M.A* 2011 Modified Hopfield neural network for diagnosing comparison-based multiprocessor systems using partial syndromes *ICPADS, 2011, Parallel and Distributed Systems, International Conference on, Parallel and Distributed Systems, International Conference on 2011* 646-653.
2. *Elhadef M., Nayak A.* 2012 Comparison-Based System-Level Fault Diagnosis: A Neural Network Approach *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems* 23(6) 1047-1059.
3. *Elhadef M., Romdhane L.B.* 2014 Fault diagnosis using partial syndromes: a modified Hopfield neural network approach *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems* 29(2) 119-146.
4. *Викторова Е.В.* Применение нечетких нейронных сетей для технической диагностики дорожных машин / Вестник ХНАДУ, 2012. - Вып. 56. - С. 98-102.
5. *Семыкина И.Ю.* Испытательный комплекс для оценки режимов работы электроприводов горных машин / И.Ю. Семыкина, А.В. Киселев, Р.А. Кольцов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. - 2012. - № 9(75). - С. 82-87.
6. *Хаханов В.И., Щерба О.В.* Применение искусственных нейронных сетей для диагностирования цифровых сетей / Радиоэлектронные и компьютерные системы. - 2010. - № 5 (46). - С. 15-20.
7. *Кацуба Ю.Н., Власова И.В.* Применение искусственных нейронных сетей для диагностирования изделий / Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - №3 (34). Ч 1. - С. 68-70.

8. *Katsuba Y.N., Grigorieva L.V.* 2017 Application of Artificial Neural Networks in Vehicles` Design Self-Diagnostic System for Safety Reasons *Journal Transportation Research Procedia* 20 283-287.
9. *Якунов Д.Т., Рожко О.Н.* Перспективы применения ИНС для прогнозирования объемов грузоперевозок в транспортных системах / Статистика и экономика. - 2017. - Т. 14. № 5. - С. 87-94.
10. *Прокопцев Н.Г., Алексеенко А.Е., Холодов Я.А.* Использование сверточных нейронных сетей для прогнозирования скоростей транспортного потока на дорожном графе / Компьютерные исследования и моделирование. - 2018. - Т. 10. № 3. - С. 359–367.
11. *Прахов И.В., Бикметов А.Г.* Применение искусственных нейронных сетей в спектральном методе диагностики машинных агрегатов / Фундаментальные исследования. - 2015. - № 9-3. - С. 502-506.
12. *Janmanee P., Kumjing S.* 2017 A study of tungsten carbide surfaces during the electrical discharge machining using artificial neural network model *International Journal of Applied Engineering Research* 12(12) 3214-3227.
13. *Singh M., Singh M., Singh P.* 2013 Artificial Neural Network based classification of Neuro-Degenerative diseases using Gait features *International Journal of Information Technology and Knowledge Management* 7(1) 27-30.
14. *Basit A., Sarim M., Raffat K., etc.* 2014 Artificial Neural Network: A Tool for Diagnosing Osteoporosis *Research Journal of Recent Sciences* 3(2) 87-91.
15. *Mahesh C., Suresh V.G., Babu M.* 2013 Diagnosing Hepatitis B Using Artificial Neural Network Based Expert System *International Journal of Engineering and Innovative Technology* 3(6) 139-144.

УДК 656.07:622.271.324:622.61/.67

КОПТЕВ В.Ю.,
КОПТЕВА А.В.,
АЛЕКСАНДРОВ В.И.
Санкт-Петербургский горный университет

РЕАЛИЗАЦИИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ КОНЦЕПЦИЙ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация. В работе рассматривается возможность построения локальных логистических систем горнодобывающих предприятий на базе концепции точно и в срок по тянущему принципу. Выявлены стимулирующие предпосылки для перехода от существующих производственно-транспортных систем к логистическим системам добывающих предприятий. Рассмотрены проблемы, препятствующие организации таких систем и предложены практические решения,позволяющие реализовать логистические решения для горных предприятий,добывающих стройматериалы, руды металлов и уголь.

Ключевые слова: горнодобывающие предприятия, логистическая система, интегрированная логистика, рудоподготовка, рудоразборка, качество, полезное ископаемое, технические решения.

KOPTEV V.YU.,
KOPTEVA A.V.,
ALEXANDROV V.I.
Saint-Petersburg Mining University

IMPLEMENTATION OF LOGISTICS CONCEPTS IN THE MINING INDUSTRY

Abstract. The paper considers the possibility of building local logistics systems of mining enterprises based on the concept of exactly and on time on the pulling principle. The stimulating prerequisites for the transition from the existing production and transport systems to the logistics systems of mining enterprises are identified. The problems hindering the organization of such systems are considered and practical solutions are proposed that allow implementing logistics solutions for mining enterprises that extract building materials, metal ores and coal.

Keywords: mining enterprises, logistics system, integrated logistics, ore preparation and mining, quality, minerals, technical solutions.

Сегодня горнодобывающие предприятия следует относить к производственно-транспортным системам (ПТС) с главной задачей обеспечения производственных процессовдобычи в границах установленных объемных, технологических, организационных и экономических показателей [1]. Основными производственными операциями являются: отделение полезного ископаемого (ПИ) от массива пород и погрузки в транспортные средства, отделение и вывозка покрывающих и вмещающих горных пород (ГП), их транспортирование и разгрузка (в комбинированных системах – перегрузка) на отвалах, складах и др. ПИ поставляется на переработку - обогатительные фабрики, металлургические заводы или потребителям ТЭЦ и др.

Принципы и методы интегрированнойлогистики направлены на минимизацию общих логистических издержек предприятия, временипроизводственных циклов (в логистике - выполнения заказа) и повышения качества логистического сервиса (качества ПИ). Сокращение всехвидов издержек позволяет высвободить финансовые средства на

дополнительные инвестиции в производство [2, 3].

Для создания логистической системы необходимо пересматривать как структуру транспортной системы, так и организацию работ, технологию транспортирования, добычи и переработки горных пород.

Ещё один важный логистический аспект в производственной деятельности горного предприятия - необходимость гибкого реагирования производственных и перерабатывающих производств на быстро изменяющиеся приоритеты потребителя. Непостоянство и непредсказуемость рыночного спроса, гибкость логистической системы делает нецелесообразным создание и содержание больших запасов. Возникает необходимость создания гибких производственных мощностей, способных быстро отреагировать на возникший спрос. Снижение себестоимости в условиях конкуренции достигается не объёмом добычи ПИ, а логистической организацией как отдельного производства, так и всей цепочки производств от сырьевых до сбытовых в целом.

Логистическая организация создаёт новый эффект - интеграцию объектов, звеньев, элементов материального производства и оказания услуг в единую систему, упорядоченную вдоль материального потока и способную реагировать на возмущение внешней среды. Себестоимость продукции, доставляемой конечному потребителю, ниже себестоимости того же товара, прошедшего по традиционному пути. Появляющаяся разница обеспечивает участникам конкурентные преимущества, зависящие в первую очередь не от величины капитальных вложений, а от умения правильно организовать логистический процесс.

Сложившиеся транспортные системы горнодобывающих предприятий включают в себя управление ключевыми операционными процессами при получении сырья для дальнейшей переработки (не предусматривает ее конечного вида) и обычно предусматривают:

- забор и погрузку ПИ, мешающих дальнейшему забору из забоя горной массы, их транспортировка к местам складирования (перегрузки при мультимодальной транспортировке), складирование, регулирование и учет запасов;
- при развитии горных работ отстройка бортов карьера, оборудование безопасных проездов (дороги);
- фактическое отсутствие управления качеством ПИ, работа ведётся с большими объёмами, рассчитанными на длительный срок поставки, отсутствие оперативного управления, инерционность и ритмичность работы на протяжении больших интервалов времени (по проекту).

Анализ работы систем транспорта горнодобывающего предприятия показывает отличия от требований, предъявляемых к логистическим системам:

- не выполняется принцип «точно и в срок»;
- отсутствует оперативная связь управления грузопотоками;
- низкое качество горной массы в забое по содержанию и свойствам;
- наличие перегрузок, складов;
- лишние объёмы перевозок;
- изменяющиеся во времени и пространстве параметры маршрутов;
- большая инерционность процессов, не учитывающая изменение спроса, возникновения нештатных ситуаций (поломка погрузочной техники, обвалы и аварии на дорогах) и неоптимальные решения при формировании транспортной системы (годы от проектирования, начала эксплуатации и использованного уровня техники в начале проектирования, дальнейшая замена и модернизация, что в итоге повлечёт большие затраты времени и средств).

Как свидетельствует мировой опыт, лидерство в конкурентной борьбе приобретает сегодня тот, кто компетентен в области логистики, владеет ее методами [4, 5]. Резервы повышения потенциала существующих материальных производств существенно исчерпаны и требует поиска нетрадиционных путей создания конкурентных преимуществ

[6, 7, 9].

Известные специалисты интегрированной логистики Бауэрсокс Д. и Клосс Д. [4] применительно к производственной деятельности утверждают, что: «Фирмы с передовыми логистическими системами считают, что дешевле с помощью информации искать оптимальные решения, чем осуществлять неоптимальное перемещение запасов».

Таким образом, целью логистической системы является формирование логистической концепции (технологии) управления потоком на добывающем горном предприятии (рис. 1).

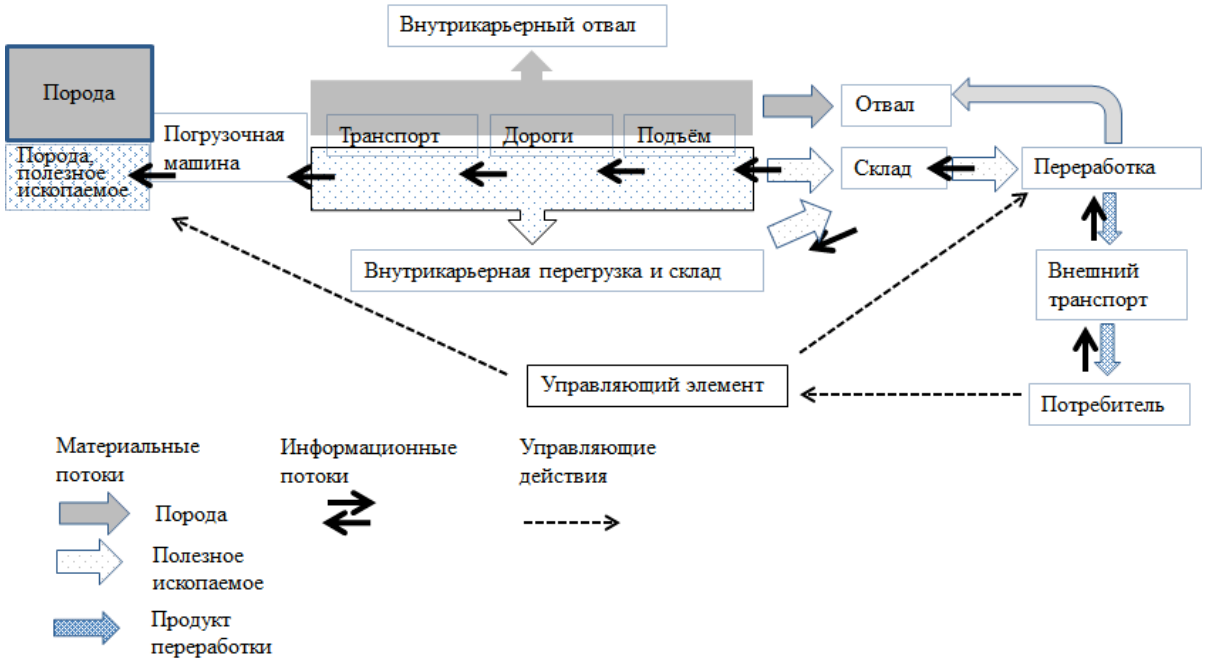


Рисунок 1 – Логистическая транспортная система добывающего предприятия

Анализ работы гранитных карьеров показал нерациональное использование погрузочного и транспортного оборудования, отсутствие вариативных резервов производства вследствие отсутствия гибкости, завышенные запасы подготовленного к выемке сырья и готовой продукции, необходимость улучшения поставок конечной продукции потребителю, не полное удовлетворение потребителя в готовой продукции. Существующая технология производства щебня и её транспортная система требует координации работы производственных участков, направленных на продвижение потоков сырья и готовой продукции в нужном количестве, в нужное время, необходимого качества и в требуемое место [10].

В предлагаемой технологии добычи используется экскаватор (фронтальный погрузчик) для погрузки ПИ в комплексную дробилку с крупным и средним дроблением с рассеиванием на требуемые фракции, которая отгружается потребителю из карьера, в том числе и с самовывозом. Получаемые преимущества:

- уменьшится количество вывозимой не дроблённой руды до 30%;
- уменьшится пыление на территории предприятия, за счет процесса дробления горной массы внутри карьера;
- уменьшатся затраты на автопарк ввиду уменьшения объема транспортирования горной массы;
- оперативно изменятся объемы производства под нужны потребителей;
- при работе по концепции J&T («Just in Time» - точно в срок) отпадет надобность в больших ДСЗ и их складах, так как производится необходимый объем щебня на требуемый момент.

Слагаемые совокупного эффектаот применения логистического подхода к

управлению материальным потоком щебня на предприятии:

- производство ориентируется на рынок, становится возможным эффективный переход на малосерийное и индивидуальное производство и реализация принципа тянущего производства концепции J&T;
- повышается гибкость производства: изменение объёма продукции, оперативный перенос в карьере добычных работ;
- налаживаются партнерские отношения с потребителями и поставщиками;
- сокращаются простои оборудования, что обеспечивается наличием на рабочих местах необходимых для работы материалов;
- уменьшаются объёмы перегрузочных и складских работ на поверхности карьера и площадей, отводимых под склад и перерабатывающих гранит на щебень заводов;
- регулируется и улучшается качество выпускаемой продукции;
- сокращается производственный цикл и минимизируются затраты;
- снижается нагрузка на транспорт (и потребность в нём);
- улучшаются экологические показатели производства за счёт его концентрации в забое.

Интеграция вышеперечисленного снижает затраты на производство строительных материалов. Основная особенность технологии заключается в том, что процессы дробления и разделения переносятся в начало технологической цепочки получения щебня.

Реализации этой идеи при добыче других полезных ископаемых (угля, руд металлов, химического сырья), по нашему мнению, препятствуют нижеперечисленные причины:

1. Трудоёмкость процессов разделения полезного компонента и пустых пород. Эти процессы в горном деле относят к технологиям обогащения (рудоподготовка, измельчение, рудоразборка и др.) и практически не применяются в забоях горных предприятий.
2. Сложности определения содержания полезного компонента, как по технологии, так и в существующих процессах добычи.
3. Отсутствие возможности организации и оперативного управления поставками сырья нужного качества на переработку (по терминологии - минимальное промышленное содержание или международное - бортовое содержание).

Устранение этих причин позволит в логистической системе перейти от управления перевозками на логистическое управление процессом добычи и формирования перемещаемого потока на предприятии. Достигается интеграцией функций добычи, формирования потока нужного качества(начальнойпереработки),транспорта и переработки (изменённой, упрощённой) в единый цикл на основе технического, технологического и информационного их объединения. В первую очередь, это затрагивает управление качеством ПИ.

Для реализации логистических концепций и устранения названных причин вработе рассматриваются следующие технологии:

- технологии кучного выщелачивания, селективного разупрочнения руды и рудоподготовки на базе «сухих» методов разрушения и сепарации [11];
- для анализа содержания - применение мобильных участков подготовки проб и мобильных лабораторий, бесконтактные измерения массового расхода движущегося потока руд и угля [12, 13, 14, 15];
- для оперативного управлениягорнотранспортных комплексов - использование систем диспетчеризации, информационного обеспечения, мониторинга, идентификации, включающие также системы удаленного мониторинга и диагностики транспортных средств [16, 17, 18].

Применение первичных процессов переработки в забое обеспечивает оптимизацию потоков и сокращает объём транспортных работ, продолжительностьвсех циклов и производственные потери. Эти решения в комплексе создают основу для формирования

логистической системы с управлением движения потоков предприятия, включающим материальный и информационный потоки (явный финансовый поток отсутствует).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Парунакян В.Э.* Формирование логистической концепции (технологии) системного управления процессом материалодвижения на металлургических предприятиях // Современные проблемы транспортного комплекса России, 2018. Т.8. №2. С. 4-21.
2. *Гавришев С.Е., Дудкин Е.П., Корнилов С.Н. и др.* Транспортная логистика: Учебн. Пособие. – С-Пб.: ПГУПС, 2003. – 279 с.
3. *Коптев В.Ю.* Транспортная логистика горных предприятий: учебное пособие Ч. 1. / В.Ю. Коптев, А.В. Коптева. – СПб.: Лема, 2017. - 108 с.
4. *Бауэрсокс Д.Д., Клосс Д.Д.* Логистика: интегрированная цепь поставок. - М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2001.
5. *Коптев В.Ю.* Обоснование применения логистических концепций для карьерного транспорта / «Инновации и перспективы развития горного машиностроенияи электромеханики: IPDME-2018» Сборник научных трудов, 2018. С. 222.
6. *Яковлев В.Л., Яковлев В.А.* Формирование транспортных систем карьеров с учетом адаптации к изменяющимся условиям разработки глубокозалегающих сложноструктурных месторождений / Известия ВУЗов. Горный журнал, 2018. N 6. С.118-126.
6. *Коптев В.Ю.* Структурная оптимизация транспортных систем горнодобывающих предприятий / Проблемы современной науки и образования, 2016. № 18 (60). С. 27-29.
7. *Коптев В.Ю.* Повышение эффективности транспортных систем горных предприятий / «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME2018» Сборник научных трудов, 2018. С. 111.
9. *Коптев В.Ю.* Выбор транспортных машин для проектирования транспортных систем горных предприятий / Сборник научных трудов межд. научно-технической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017» 23-24 марта 2017, СПГУ, СПб., 2017. С. 57-61.
10. *Гавришев С.Е., Рахмангулов А.Н., Грязнов М.В.* Повышение эффективности добычи нерудных строительных материалов с использованием логистического подхода / Горный информационно-аналитический бюллетень, 2002. №12. С. 152-154.
11. *Хопунов Э. А.* Проблемы рудоподготовки в «четвертой промышленной революции» / Известия вузов. Горный журнал, 2019. № 5. С. 54-62.
12. *Voytyuk I.N., Kopteva A.V.* 2015 Continuous noncontact method of measuring the amount of mined rock and its ash content at a belt conveyor *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015*.
13. *Voytyuk I.N., Kopteva A.V.* 2017 Testing the system detection unit for measuring solid minerals bulk density *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Сер. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies" 2017*.
14. *Войтюк И.Н., Коптева А.В., Кривенко А.В.* Электротехнический комплекс для обеспечения энергоэффективности работы электропривода ленточного конвейера / Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2019. № 10. С. 562-569.
15. Способ измерения объемной плотности горной породы в составе горной массы и система для его осуществления. Проскуряков Р.М., Войтюк И.Н., Коптева А.В. Патент на изобретение RU 2492454 C1, 10.09.2013. Заявка № 2012113090/28 от 03.04.2012.
16. *Рахмангулов А.Н., Корнилов С.Н., Антонов А.Н.* Выбор устройств идентификации и позиционирования железнодорожного подвижного состава для условий металлургических предприятий / Современные проблемы транспортного комплекса России, 2014. №5. С. 16-

20
17. *Коптев В.Ю.* Пути совершенствования парка машин с использованием информативной базы производственной эксплуатации / Путь науки, 2015. № 5(15). С. 34-36.
18. *Коптев В. Ю.* Управление эксплуатацией машин за счет совершенствования структуры парка и использования информативной базы производственной эксплуатации / Современные научные исследования и инновации, 2015. № 4 (48). С. 92-95.

УДК 553:621.43.06:656(1-21):504.3.054

ЛОЖКИН В.Н.,
ЛОЖКИНА О.В.
Санкт-Петербургский университет
ГПС МЧС России

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Аннотация. В настоящей работе описана математическая модель прогнозирования и результаты расчета опасного загрязнения атмосферного воздуха в экстремальных погодных условиях (штиль, температурная инверсия) Санкт- Петербурга диоксидом азота (NO_2) и твердыми частицами (PM_{10}), эмитируемых объектами энергетики и транспорта (включая автомобильный, водный, железнодорожный, воздушный транспорт), работающих на углеводородных энергоносителях. Задача моделирования переноса и диффузии в атмосфере поллютантов решается оригинальным нейросетевым методом (комбинация RProp и «Облака») с использованием Гауссиана в качестве радиальной базисной функции в масштабе города (мезо-уровень). Математическая модель обучается по гетерогенными расчетным и экспериментальным данными измерений концентраций поллютантов. Данные измерений 25 стационарных станций, расположенных на городской территории, доступны on-line. Установлено, что при неблагоприятных транспортных и метеорологических условиях, локальные значения концентраций NO_2 и PM_{10} могут соответственно в 8-10 и 3-5 раз превышать установленные предельно допустимые значения.

Ключевые слова: углеводородные энергоносители; городской транспорт; тепловые станции; поллютанты; атмосфера; чрезвычайная ситуация.

LOZHKIN V.N.,
LOZHKINA O.V.
Saint Petersburg University of State Fire Service
of EMERCOM of Russia

MODELING OF EXTREME AIR POLLUTION DUE TO COMBUSTION OF HYDROCARBON MATERIALS BY TRANSPORT SECTOR AND ENERGY ENTERPRISES IN ST. PETERSBURG

Abstract. The present paper describes a mathematical forecasting model and the results of calculation of dangerous air pollution in extreme weather conditions (calm, temperature inversion) in St. Petersburg by nitrogen dioxide (NO_2) and particulate matter (PM_{10}) emitted by energy enterprises and transport sector (including motor, water, railway, and air transport) operating on hydrocarbon materials. The modeling technique of pollutant dispersion in the atmosphere on a city-scale (mesoscale) includes an original neural network method (a combination of RProp and Clouds methods) using a Gaussian as a radial basis function. The model is training by heterogeneous measured and simulated pollutant concentrations. The measured concentrations from 25 city monitoring stations are available on-line. It has been established that the concentrations of NO_2 и PM_{10} may exceed national standard limit values by a factor 8-10 and 3-5, respectively, at adverse weather conditions.

Keywords: hydrocarbon materials; urban transport; thermal stations; pollutants; air atmosphere; emergency.

В Санкт-Петербурге при чрезвычайных метеорологических (инверсия, штиль [1, 2]) и транспортных («часы пик»[3]) условиях, аналогично другим городам Мира [4, 5, 6], можно ожидать опасные загрязнения атмосферы поллютантами транспорта (ТС) и тепловых станций, работающих на углеводородных энергоносителях [7, 8]. Национальный центр управления в кризисных ситуациях МЧС России осуществляет мониторинг и прогнозирование загрязнения воздушной среды в городах [9]. В статье, на примере Санкт-Петербурга, приводятся результаты авторского расчетного исследования вероятного экстремального загрязнения воздуха на уровне дыхания человека особо опасными, по шкале Всемирной организации здравоохранения [10], веществами – оксидами азота (NO_2) и $ПМ_{10}$.

Воздушные лайнеры аэропорта Пулково взлетают на форсированных режимах в направлении Финского залива. По данным [11], на долю автомобильного, водного, железнодорожного и воздушного транспорта, эксплуатируемого в Санкт-Петербурге, приходится до 95 % выбросов вредных веществ; другиеисточники –тепловые станции и промышленные предприятия [9, 11].

Исходными даннымидля расчетов были сведения о загрязнении воздуха за весенне-летне-осенние наблюдения (2015-2017 гг.).

Они взяты из базы данных Комитета по охране окружающей среды и природопользованию Правительства Санкт-Петербурга [11]. Выборки концентраций поллютантов, измеренных 25 стационарными станциями, соответствовали малым осадкам, слабому ветру (0,5-3,0 м/с), часам «пик» движения ТС. Анализ международной [12] и отечественной [13] практики моделирования диффузии полютантов в атмосфере на мезо-уровне позволил остановиться на модели Гаусса. В виду того, что огромный массив исходных данных оказался близким к «необозримому», мы воспользовались оригинальным нейросетевым подходом [14]. Согласно модели Гаусса, концентрация поллютанта:

$$q(t,x,y,z)=\frac{Qe^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-x_0-V_xt)^2}{(\sigma_x)^2t}+\frac{(y-y_0)^2}{(\sigma_y)^2t}+\frac{(z-z_0)^2}{(\sigma_z)^2t}\right)}}{\left(\sqrt{2\pi t}\right)^3\sigma_x\sigma_y\sigma_z}, \quad (1)$$

где x_0, y_0, z_0 - координаты источника выброса;

Q - мощностьвыброса источником;

V_x - коэффициент, характеризующий скорость ветра в предположении, что система координат сориентирована таким образом, что OX совпадает с направлением ветра;

$\sigma_x,\sigma_y,\sigma_z$ - средние квадратичные отклонения частиц примеси в момент времени t соответственно вдоль координатных осей OX, OY, OZ:

$$\sigma_x^2=\frac{2}{h}\int_0^h K_x(z)dz,\ \sigma_y^2=\frac{2}{h}\int_0^h K_y(z)dz,\ \sigma_z^2=\frac{2}{h}\int_0^h K_z(z)dz, \quad (2)$$

где h - высота приземного слоя.

Используя принцип суперпозиции, из (1) получаем формулу расчета концентрации от источника непрерывного действия:

$$q(t,x,y,z)=\int_0^t\frac{Q\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-x_0-V_x)^2}{(\sigma_x)^2t}+\frac{(y-y_0)^2}{(\sigma_y)^2t}+\frac{(z-z_0)^2}{(\sigma_z)^2t}\right)\right)}{\left(\sqrt{2\pi t}\right)^3\sigma_x\sigma_y\sigma_z}dt. \quad (3)$$

Используя кубатурные формулы, заменяем интеграл конечной суммой:

$$q_n(t,x_i,y_i,z_i)=\sum_{i=o}^{n}C_i\frac{Q\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x_i-x_0-V_xt)^2}{(\sigma_x)^2t}+\frac{(y_i-y_0)^2}{(\sigma_y)^2t}+\frac{(z_i-z_0)^2}{(\sigma_z)^2t}\right)\right)}{\left(\sqrt{2\pi t}\right)^3\sigma_x\sigma_y\sigma_z}, \quad (4)$$

где C_i – числовой коэффициент , $x_i\in[0;t]$, i = 0,1,2,3, ..., n – узлы интегрирования. По формуле (4) для q, были построены модели искусственной нейронной сети с радиальными базисными функциями «гуссианами» с разным количеством нейронов: n = 5; n = 10; n = 15; n = 20 с применением метода RProp [14] и комбинации метода «Облака» из 3 частиц (n_1 = 3) и метода RProp [14]. Примеры их реализации показаны на рис. 1 и рис. 2 в 3D-картинах загрязнения воздуха диоксидом азота NO_2 и твердыми частицами $ПМ_{10}$ в зависимости от комплексного векторного параметра - скорости и направления ветра.

В результате последовательных обучающих итераций (аппроксимации данных измерений с использованием метода минимизации значений функционала ошибки), более точные результаты (рис. 1, рис. 2) были достигнутыпо оригинальному комбинированному методу «Облака» и RProp при n = 5; n_1 = 3. Высокий уровень загрязнения рис. 1 над Финским заливом NO_2 (8-10 $ПДК_{МР}$, координаты 59°53' с. ш. и 30°03' в. д.) можно объяснить диффузией, «перетеканием» вредных веществ из других районов города, в которых работает транспорт и тепловые станции. Причиной возникновения такого аномального явления послужила устойчивая инверсия над Финским заливом, породившая над поверхностью воды область пониженного атмосферного давления.

Опасный уровень загрязнения (рис. 2) в Центральном районе города частицами PM_{10} (4-5 $ПДК_{МР}$, координаты 59°55' с. ш. и 30°20' в. д.), очевидно, явился следствием смещения облака смога над Финским заливом при характерном для «розы ветров» Санкт-Петербурга юго-западном ветре со скоростью 2 м/с и, одновременно, интенсивной эксплуатацией в Центральном районе наземного автомобильного транспорта [15].

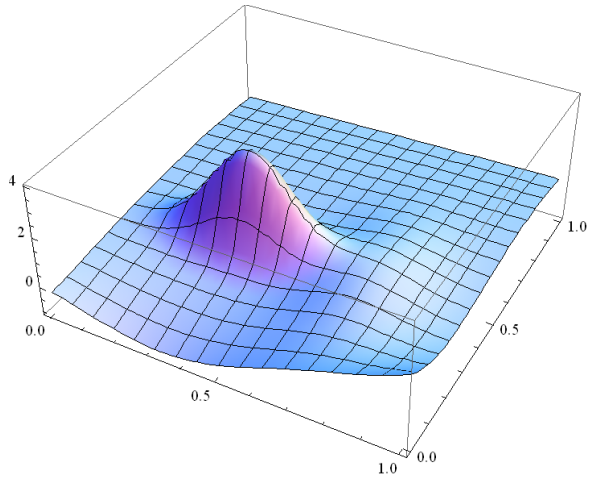


Рисунок 1 – 3D-визуализация диффузии NO_2 в атмосфере Санкт-Петербурга, расчеты по программе Mathematica компании Wolfram Research (ожидаемые уровни максимальной концентрации до 8-10 $ПДК_{МР}$ соответствуют географическим координатам 59°53' с. ш. и 30°03' в. д.)

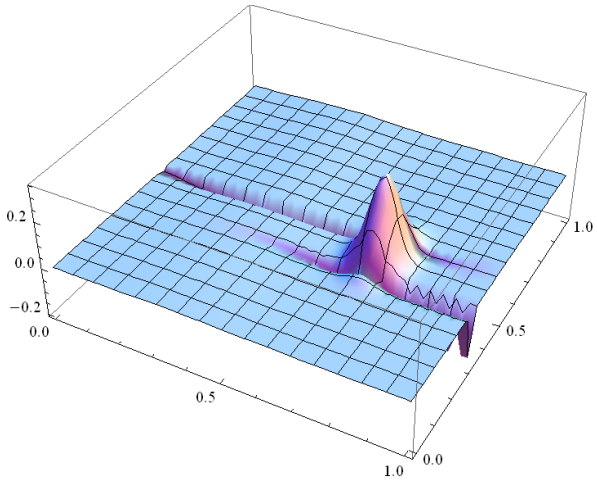


Рисунок 2 - 3D-визуализация диффузии PM_{10} в атмосфере Санкт-Петербурга, расчеты по программе Mathematica компании Wolfram Research (ожидаемые уровни максимальной концентрации до 4-5 $ПДК_{МР}$ соответствуют географическим координатам 59°55' с. ш. и 30°20' в. д.)

Полную информацию о проведенных исследованиях можно получить из отчета по гранту РФФИ «Информационные модели на основе иерархических гетерогенных нейронных сетей в исследовании влияния объектов транспортной инфраструктуры на окружающую среду (№ проекта 14-01-00733 А, 2015-2016 гг.).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lozhkin V.N., Lozhkina O.V., Dobromirov V.N.* 2017 Forecast of extreme air pollution by water and road transport in the zone of the cable-stayed bridges of St. Petersburg and Vladivostok *Water and Ecology* 3(71) 133–145.
2. *Vasilyev A., Lozhkin V., Tarkhov D., Lozhkina O. and Timofeev V.* 2017 Physical and mathematical modeling of pollutant emissions when burning peat *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.* 919(1) 012001.
3. *Lozhkina O.V., Lozhkin V.N.* 2015 Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models *Transport. Res. Part D* 36 178–189.
4. *Mueller D., Uibel S., Takemura M., Klingelhoefer D., Groneberg D.A.* 2011 Ships, ports and particulate air pollution - an analysis of recent studies. *J. Occup. Med. Toxicol*. 6 (31).
5. *Mölders N., Gende S., Pirhalla M.* 2013 Assessment of cruise–ship activity influences on emissions, air quality, and visibility in Glacier Bay National Park *Atmospheric Pollution Research* 4 435–445.
6. *Sofiev M., Winebrake J.J., Johansson L., Carr E.W., Prank M., Soares J., Vira J., Kouznetsov R., Jalkanen J.-P., Corbett J.J.* 2018 Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate trade offs *NATURE COMMUNICATIONS* 9 406.
7. *Takeaki Orihara* 2016 An Update of Vehicle Emission Control Policies and Regulations in Japan and Tokyo *Motor Vehicle/Vessel Emissions Control Workshop 2016, December 14, 2016*. https://www.polyu.edu.hk/cee/MOVE2016/2-06-ORIHARA.pd.
8. *Bell Michelle L., Davis Devra L., Fletcher Tony* 2004 A Retrospective Assessment of Mortality from the London Smog Episode of 1952: The Role of Influenza and Pollution *Environmental Health Perspective* 112(1) 6–8.
9. *Ложкин В.Н., Ложкина О.В.* Управление экологической безопасностью городского транспорта. Исследование эффективности управления экологической безопасностью городского транспорта на примере Санкт-Петербурга / LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 195 с.
10. Официальный сайт Всемирной организации здравоохранения.: http://www.who.int/en/.
11. Экологический портал Санкт–Петербурга. http://www.infoeco.ru/.
12. *Härkönen J.* Regulatory dispersion modelling of traffic-originated pollution / Finnish Meteorological Institute, Contributions No. 38, FMI-CONT-38. UniversityPress, Helsinki, 2002. – 103 p.
13. *Васильев А.Н, Тархов Д.А., Шемякина Т.А.* Нейросетевой подход к задачам математической физики. – СПб.: Нестор-история, 2015. – 260 с.
14. *Lozhkina O.V., Lozhkin V.N., Nevmerzhitsky N.V., Tarhov D.A. and Vasilyev A.N.* 2016 Motor transport related harmful $PM_{2.5}$ and PM_{10}: from on-road measurements to the modelling of air pollution by neural network approach on street and urban level *Journal of Physics: Conference Series* 772(1) 012031.
15. *Lozhkina O.V., Lozhkin V.N., Malygin I.G.* 2019 Estimation and Projection of the Effect of lternative-Energy Vehicle Technologies and Policy Measures on the Air Quality in St. Petersburg over 2010-2030 *Proceedings of the International Conference on Innovative Applied Energy, 14-15 March 2019 Oxford, United Kingdom, Article 286 (ID: 546) IAPE '19, Oxford, United Kingdom*.

УДК 656.13

ЛУТОВ Д.А.
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ОЦЕНКИ ПРОДОЛЬНОЙ РОВНОСТИ ПОКРЫТИЯ, ВЛИЯНИЕ НА КОМФОРТНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. Анализ отечественных нормативных документов показал, что в России отсутствуют четкая взаимосвязь между различными методами оценки измерения продольной ровности.

Ключевые слова: нормативные документы, продольная ровность дороги, дорожные лаборатории, неровности.

LUTOV D.A.
Saint Petersburg State University of Architecture and
Civil Engineering

ANALYSIS OF REGULATORY DOCUMENTS FOR EVALUATING THE LONGITUDINAL EVENNESS OF THE COATING, THE IMPACT ON COMFORT AND ROAD SAFETY

Abstract. An analysis of domestic regulatory documents showed that in Russia there is no clear relationship between the various methods for evaluating the measurement of longitudinal evenness.

Keywords: regulatory documents, longitudinal flatness of the road, road laboratories, bumps.

Основным технико-эксплуатационным показателем автомобильной дороги является ровность дорожного покрытия. Ухудшение этого показателя оказывает негативное влияние на устойчивость движения транспортного средства, условия работы водителя и прочность несущей системы.

В Российской Федерации основными нормативными документами, описывающими методы измерения продольной ровности и регламентирующими требования к уровню продольной ровности эксплуатируемых участков автомобильных дорог, являются:

1. ГОСТ Р 50597-2017 Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля [1];
2. ГОСТ 33101-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности [2];
3. ГОСТ 33220-2015 Дороги автомобильные общего пользования. Требования к эксплуатационному состоянию [3];
4. ГОСТ Р 56925-2016 Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерения неровностей оснований и покрытий [4];
5. Отраслевой дорожный методический документ. Руководство по оценке ровности дорожных покрытий толчкомером от 17 июля 2002 года [5];
6. ОДМ 218.4.039-2018 Отраслевой дорожный методический документ. Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог [6];

7. СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85 [7].

В настоящее время в странах – членах Таможенного союза наиболее широко применяют методы контроляровности покрытий автомобильных дорог, основанные на следующих подходах:

- Первый подход – измерение рейкой длиной три метра с клиновым промерником, предусматривающее измерение величины просвета под рейкой;
- Второй подход – измерение нивелиром и нивелирной рейкой, предусматривающее вычисление модуля разности вертикальных отметок поверхности с шагом 5, 10 и 20 м;
- Третий подход - измерение с применением автомобильной установки ПКРС или другими приборами, показания которых приведены к показаниям ПКРС, предусматривающее определение интенсивности (уровня) вертикальных колебаний прицепного прибора относительно подрессоренного кузова, выражаемое в видесуммарного перемещения неподрессоренной массы относительно подрессоренной на 1 км дороги (см/км).

Для оценки продольной ровности покрытия в соответствии с ГОСТ Р 56925-2016 [4] допускается применять нивелиры, места установки нивелирной рейки должны быть расположены на одной линии, находящейся на расстоянии 0,5-1,0 м от кромки основания (покрытия) дороги или на оси основания (покрытия) аэродрома; места установки должны быть обозначены метками, шаг меток (5 ± 0,05) м. Рейки 3-метровые с клиновым промерником, длина рейки должна быть (3000 ± 2) мм, для детальных измерений на участках небольшой протяженности, которыев пределах 300-400 м. Дорожные лаборатории, оснащенные динамометрическим прицепом ПКРС для сплошных измерений (рис. 1).

Рисунок 1 - Прицепной прибор ПКРС

Автомобильная установка ПКРС состоит из автомобиля, прицепного одноколесного прибора, оборудованного датчиком ровности, и установленного в автомобиле пульта управления. ПКРС предназначен для измерений амплитуды колебаний (величины вертикальных перемещений) неподрессоренной массы подвески ПКРС относительно подрессоренной массы при скорости движения ТС (50 ± 5) км/ч, и последующей оценки ровности покрытия автодороги в составе комплекса. Прицепной прибор ПКРС и принцип его работы описан в руководстве по эксплуатации РДТ 697.00.00.000 РЭ [8].

Измерения дорожными лабораториями с применением дорожных профилометров (ДП), (акселерометрические датчики). Профилометр представляет собой автомобиль, на котором размещены необходимые датчики икомпьютер, обеспечивающие измерение и регистрацию высотных отметок поверхности движения в полоседлин волн неровностей 0,5-60 м для автомобильных дорог и 0,5-100 м для аэродромов. Профилометр состоит из

двух акселерометрических датчиков, которые закреплены к элементам кузова и подвески при помощи кронштейнов с болтовыми соединениями. Внешний вид датчиков показан на рис. 2.

Рисунок 2 - Акселерометрические датчики

Профилометр установлен под днищем транспортного средства. Один издатчиковпрофилометра установлен на подрессоренной массе, т.е. на кузове транспортного средства, а второй датчик – на неподрессоренной части, например на рессоре подвески транспортного средства. Вариант места и способа установки показан на рис. 3.

Рисунок 3 - Способ установкиакселерометрического датчика

Профилометр обеспечивает измерение продольной ровности покрытия дороги при скорости движения ТС до 80 км/ч с шагом измерений 125 мм. При измерении определяется суммарное перемещение неподрессоренной части кузова относительно подрессоренной для ¼ части кузова.

В соответствии с ОДН 218.0.006-2002, правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог (взамен ВСН 6-90) [9] и Руководством по оценке ровности дорожных покрытий толчкомером [5], возможно применять дорожные лаборатории, оснащенные приборами «толчкомер» ТХК-2, ИР-1, ИВП-1. Толчкомер предназначен для измерений амплитуды перемещенияподвески автомобиля (или прибора ПКРС), движущего по неровному покрытию, относительно корпуса толчкомера, закрепленного на кузове автомобиля (или прибора ПКРС). Внешний вид толчкомера представлен на рис. 4.

Толчкомер состоит из датчика ровности, закрепленного на кронштейне, пружины и троса. Датчик ровности представляет собой электронно-механическое устройство, состоящее из шкива с диском и электронного шифратора приращений. При движении автомобиля (или ПКРС) по неровностям происходит вертикальное перемещение троса, который вращает шкив. Электронный шифратор приращений, установленный в датчике ровности, преобразует вращательные движения шкива в электрические импульсы, которые по кабелю передаются на ПЭВМ, установленную влаборатории.

Рисунок 4 - Внешний вид толчкомера

Показания прибора «толчкомер» и установки ПКРС существенно зависят от технического состояния транспортного средства, динамики изменения параметров его подвески и шин, а также факторов методического характера. Суммарное сжатие рессор, полученное на участке длиной 1 км выражается величиной, имеющей размерность см/км. На прогиб рессор, помимо основного возмущающего воздействия (неровности дороги), влияют подрессоренная и неподрессоренная массы автомобиля или прицепного устройства, коэффициент суммарного сопротивления гидравлических амортизаторов и трение в сочленениях подвески, жесткость рессор подвески и радиальная жесткость шин колес. Для повышения стабильности получаемых данных необходимо, чтобы эти параметры оставались неизменными в процессе эксплуатации. К сожалению, на практике достичь этого не удается, но с помощью различных мер можно значительно уменьшить влияние их нестабильности на результаты измерений.

При движении автомобиля дополнительными возмущающими факторами, влияющими на колебания подвески, кроме неровностей покрытия будут также: дисбаланс колес и отклонение шин от круглой формы, изменение скорости движения в процессе измерений, переключение передач и др. При повторных измерениях на одном и том же участке невозможно выдержать первоначальный след движения, что приводит к разбросу получаемых данных. Величина разброса в значительной степени зависит от поперечной ровности [10].

Мониторинг продольной ровности покрытия с использованием передвижных дорожных лабораторий, оборудованных прицепной установкой ПКРС-2, можно не проводить, т.к. принципы измерения ровности покрытия установкой ПКРС-2 и «толчкомером» схожи. Измерение ровности покрытия с использованием установки ПКРС-2 связано с некоторыми неудобствами использования установки (наличие прицепа к диагностической лаборатории), повышенными требованиями к технике безопасности при производстве работ. Установка ПКРС-2, также, как и «толчкомер», нуждается в калибровке.

Предельно допустимое значение продольной ровности покрытия проезжей части для эксплуатируемых автомобильных дорог, представлено в табл. 1.

Таблица 1.

Значения показателей продольной ровности покрытия

Категория дороги	Ровность по индексу IRI, м/км, не более
IA, IБ	4,0
IB, II	4,5
III	5,5
IV	6,5
Примечание – Значения IRI (International Roughness Index –Международный индекс ровности) рассчитывают по каждому 100-метровому участку полосы дороги.	

Получение продольного профиля участков, используемых для калибровки, при отсутствии высокопроизводительных установок профилометрического типа или лазерных цифровых нивелиров, а также вычисление значений международного показателя ровности IRI для этих участков является трудоемким процессом. Поэтому в России в качестве эталонного показателя целесообразно использовать оценку ровности по методу трехметровой рейки с клиновым промерником.

Не смотря на различную физическую сущность методов IRI, трехметровой рейки, данных толчкомеров на основании большого объема экспериментальных данных необходимо усовершенствовать зависимость и доработать взаимосвязь между оценками ровности по этим методам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 50597-2017 Национальный стандарт Российской Федерации. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля. Дата введения 2018-06-01.
2. ГОСТ 33101-2014 Межгосударственный стандарт. Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности. Дата введения 2016-08-01.
3. ГОСТ 33220-2015 Межгосударственный стандарт. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к эксплуатационному состоянию. Дата введения 2015-12-01.
4. ГОСТ Р 56925-2016 Национальный стандарт Российской Федерации. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерения неровностей оснований и покрытий. Дата введения 2016-10-01.
5. Отраслевой дорожный методический документ. Руководство по оценке ровности дорожных покрытий толчкомером от 17 июля 2002 года.
6. ОДМ 218.4.039-2018 Отраслевой дорожный методический документ. Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог 04.07.2018 г.
7. СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85.
8. Прицепной прибор ПКРС, принцип его работы, описание, руководство по эксплуатации РДТ 697.00.00.000 РЭ от 2017 года.
9. ОДН 218.0.006-2002 Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог (взамен ВСН 6-90) от 03.10.2002 г.
10. Методические рекомендации по ремонту и содержанию автомобильных дорог общего пользования (приняты и введены в действие письмом государственной службы дорожного хозяйства Министерства транспорта Российской Федерации от 17.03.2004 № ОС-28/1270-ис.

УДК 629.365

МАКАРОВ В.С.,
БЕЛЯКОВ В.В.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СНЕЖНЫХ КАРТ ПОДВИЖНОСТИ

Аннотация. В статье рассмотрена необходимость создания карт подвижности как следующего этапа развития теории подвижности профессора Белякова. На основании анализа существующих работ сделан вывод о том, что для России актуальным является разработка «снежных карт подвижности». Приведены основные этапы методики построения «снежных карт подвижности», которая включает в себя: анализ местности с целью определения характерных зон движения, определение параметров снега в этих зонах, и расчет параметров подвижности для конкретных транспортных средств.

Ключевые слова: карты подвижности, снег, террамеханика, подвижность, статистическая модель.

MAKAROV V.S.,
BELYAKOV V.V.
Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev

METHOD OF DEVELOPMENT OF SNOW MOBILITY MAPS

Abstract. The article discusses the need to create mobility maps as the next stage in the development of the theory of mobility of Professor Belyakov. The analysis is based on data that the development of “snow mobility maps” is relevant for Russia. The main stages of the methodology for constructing “snow mobility maps” are given, which include: analysis of the terrain in order to determine the characteristic zones of movement, determine the parameters of moving objects and calculate the parameters of vehicles mobility.

Key words: mobility maps, snow, terramechanics, mobility, statistical model.

Исследование эффективности функционирования и оценка подвижности транспортных средств высокой проходимости основывается на множестве различных показателей, которые в свою очередь характеризуют как саму машину, так и среду, с которой она взаимодействует. Среда движения вездеходных наземных транспортных средств представляет собой верхний покров планеты и складывается из таких составляющих как грунты и почвы с расположенной на ней растительностью; озера, реки и моря; горы и скалистые массивы, дороги и препятствия естественного и искусственного происхождения и т.д. В основе всех математических моделей взаимодействия транспортных средств опорной поверхностью лежат физико-механические и геометрические показателях среды, а также параметры движителей машин. Основной идеей эффективности являются различные показатели характеризующие величину полезной работы, отнесенную к затратам. Это может быть лучшая топливная экономичность, лучшее значение перевезенных грузов и пассажиров на единицу чего-либо (километр пути, время, рублей и пр.). Сама же эффективность неразрывно связана и является частью подвижности. На сегодняшний день в России существуют разные понятия подвижности. Первое классическое пришедшее от танкистов, а именно -

совокупность свойств, характеризующих способность машины самопередвижения в заданных условиях, характеризуется частными свойствами: автономность передвижения, проходимость и быстроходность. Наиболее общим является определение, которое дал профессор Беляков В.В: Под подвижностью понимается интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин (ТТМ) определяющее её способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, то есть возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [1]. Данное понятие включает все предыдущие понятия подвижности и удобно с точки зрения применения в «картах подвижности», и является следующим этапом в развитие «теории подвижности профессора Белякова».

Отметим, что задача создания «карт подвижности» была поставлена в 1971 г. командованием материального обеспечения сухопутных войск армии США (АМС) была разработана программа исследований, объединяющая работы нескольких научно-исследовательских организаций - лаборатории подвижности научно-исследовательского центра по танкам и колесным машинам (USATAC), экспериментальной станции водных путей (WES), лаборатории исследования полярных районов (CRREL). Научным руководителем был Беккер М.Г. [2]. Суть первой модели сводилась к следующему. Реальный район местности разбивается на мозаику из отдельных участков, в пределах каждого из которых поверхность считается достаточно однородной, что позволяет в качестве показателя подвижности для такого участка использовать просто величину максимальной скорости движения по прямой. После завершения расчетов по всему району составляется карта максимальных скоростей, которые может развить машина в каждой точке рассматриваемой местности. На сегодняшний день модель усовершенствована и представляется в виде «Эталонной модели подвижности НАТО» (NRMM) [3-5]. В ней рассмотрены несколько «уровней», таких как территориальная принадлежность, тип и характер грунта, распределение уклонов, рельеф и пр. [6]. Для каждого уровня построены характеристики «go/nogo» (можем/ не можем ехать) участки, а также представлены вероятностные кривые возможности движения. Так для каждой машины рассчитываются и строятся вероятностные кривые преодоления участков. Основной идеей является привязка ГИС.

Именно такой подход, связанный с «картами подвижности» позволяет прогнозировать вероятность выполнения транспортно-технологической задачи. В России же имеется своя специфика и научная школа. Есть разрозненные работы по исследованию статистических характеристик опорных оснований [7-9], но в них рассмотрены частные случаи. Большое и структурированное исследование [10], но в них рассмотрено в основном движение по дорогам.

Так как в России достаточное количество времени большие территории покрыты снегом, а транспортно-технологические задачи необходимо выполнять круглогодично, то одним из уровней карт подвижности являются «снежные карты подвижности». Ранее авторами статьи была разработана статистическая модель снежного покрова для РФ [11, 12], которая является исходными данными для карт.

Основными этапами построения «снежных карт подвижности» являются:

1. определение средних данных о характере изменения снежного покрова на исследуемом участке;
2. определение характерных зон на исследуемом участке местности;
3. формирование массива данных с данными о характеристиках снежного покрова с привязкой к местности;
4. определение параметров шасси исследуемой ТТМ необходимых для расчета параметров подвижности;
5. расчет параметров подвижности (проходимость, эффективность, скорость, расход топлива и пр.) для каждого из выделенных характерных зон исследуемого участка

местности;

6. формирование «снежных карт подвижности» для исследуемой ТТМ;

7. экспериментальная проверка параметров подвижности ТТМ.

Рассмотрим более подробно каждый этап.

1. На основании разработанной авторами статистической модели снежного покрова могут быть определены зависимости вероятности изменения высоты снега и его плотности в течение зимы. Параметры высоты и плотности снега рассчитываются для открытых равнинных участков.

2. На данном этапе определяются характерные зоны местности по их типу. Выделяются дороги, ЛЭП, равнинные участки, реки, озера, леса, просеки, опушки, холмы, овраги и пр. В том числе непреодолимых участков или приравненных к ним. В данном случае такими зонами могут быть обрывы, и участки со сложной геометрией, непроходимые лесные массивы [13].

3. Для каждого характерного участка с учетом его особенностей имеются коэффициенты пересчета. Высоты снега на различных участках будет разной. Так, например, для крупных лесных массивов высота снега относительно целинных открытых участков будет больше в 1,3-1,4 раза, а для речных русел и зарослей камыша - в 3 раза, напротив, для открытых поверхностей озер – 0,4-0,5 раз, для пашни - 0,9 раз. При этом плотность на открытых участках выше, чем на закрытых.Так, например, для снега в лесу и на поляне в лесу меньше чем на поле в среднем в 0,85 и 0,9 раз соответственно меньше. Неоднозначно влияние ветра на высоту снега. Однако для мест с преобладающими ветрами будут характерны следующие параметры. Для лесных массивов с наветренной стороны высота снега в до 3 и более раз больше, а для подветренной – до 2 раз меньше чем на открытых участках. Для снега на склонах холма высота с наветренной стороны меньше в 2 раза, а с подветренной в 2 раза больше. Небольшие ямы и овраги могут быть полностью засыпаны снегом, образуя ровную поверхность с остальной местностью, при этом формально высота снега в них может быть в 1,5-2 раза больше [14-17].

4. Основными параметрами шасси ТТМ являются ее массово-геометрические характеристики, параметры энергосиловой установки, алгоритм управления распределением мощности по движителям и параметры движителя. Для каждой машины эти параметры индивидуальны.

5. Расчет подвижности будет определяться характером взаимодействия движителя ТТМ со снежным полотном пути. Для каждого характерного участка исследуемые параметры будут различны. Так для каждой выделенной зоны должны определяться: силы тяги и сопротивления, мощность, затрачиваемая на передвижение, максимальная возможная скорость движения и расход топлива при этом. Для разных машин эти параметры будут различны. Расчеты на данном этапе могу быть произведены как обычными методами как предлагаемыми в классической террамеханике, так и с применением современных пакетов программ имитационного моделирования.

6. Таким образом, для каждого участка, выбранного на этапе 2, являющегося частью реальной карты местности, будет введен в соответствие параметр проходимости позволяющий оценить подвижность при движении по снегу выбранной машины. Это и будут «снежные карты подвижности».

7. Данный этап экспериментальный, необходим проверки адекватности разработанных моделей. Как правило, проверка делается на тестовых задачах. Если для выбранной ТТМ сходимость результатов эксперимента и теоретических расчетов обеспечивается, то в дальнейшем разработанную модель можно применять.

В дальнейшем будут проведены следующие работы:

– более подробно описана приведенная методика, разработана блок–схема составления «снежных карт подвижности»;

– проведено имитационное моделирование движения ТТМ с учетом характеристик местности;

– сформированы вероятностные карты оценки эффективности и подвижности для реальных образцов гусеничной и колесной техники на основании имитационного моделирования;

– проведены экспериментальные исследования для тестовых условий движения, с целью оценки адекватности разработанных моделей.

Данная работа проводится в продолжение исследований, проводимых в «Нижегородской научно-практической школе транспортного снеговедения», а также при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых - докторов наук МД-226.2020.8.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляков В.В.* Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ, 2013. №4 (101). С. 72-77.
2. *Bekker M.* Theory of land locomolion / University of Michigan, Press, 1960. 520 p.
3. Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM) Final Report. NATO Exploratory Team ET-148.
4. *Wong J.Y. et. al* 2018 Comparison of simulation models NRMM and NTVPM for assessing military tracked vehicle cross-country performance *Journal of Terramechanics* 80 31-48.
5. *McCullough M. et. al.* 2017 The Next Generation NATO Reference mobility model development *Journal of Terramechanics* 73 49–60.
6. *Rybansky M. et. al.* 2014 The impact of terrain on cross-country mobility geographic factors and their characteristics *18th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, ISTVS 2014. Seoul, Korea*.
7. *Вольская Н.С.* Оценка проходимости колесных машин при движении по неровной грунтовой поверхности. - М.: МГИУ, 2007. - 215 с.
8. *Вольская Н.С.* Разработка методов опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации: дисс. д-ра техн. наук: 05.05.03. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. - 485 с.
9. *Баженов Е.Е.* Разработка научных методов прогнозирования эксплуатационных свойств сочленённых наземных транспортно-технологических машин.дисс. д-ра техн. наук. - Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2010.
10. *Безбородова Г.Б.* Моделирование движения автомобиля / Г.Б. Безбородова, В.Г. Галушко. - Киев: Вища школа, 1978. - 168 с.
11. *Макаров В.С.* Многоуровневая модель снега как полотна пути для транспортно-технологических машин на примере территории Российской Федерации / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Фундаментальные исследования, 2013. № 10. С. 270-276.
12. *Makarov V., Zeziulin D. and Belyakov V.* 2014 Prediction of all-terrain vehicles mobility in snowscape scenes *Paper presented at the 18th International Conference of the ISTVS*, *2014.*
13. *Беляков В.В.* Моделирование атласа карт подвижности наземных транспортно-технологических машин на примере Нижегородской области / В.В. Беляков [и др.] // Сборник материалов 79-й Международной научно-технической конференции «Безопасность транспортных средств в эксплуатации». - Н.Новгород: НГТУ им Р.Е. Алексеева, 2012. С. 135-140.
14. *Макаров В.С.* Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода / В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева.,2013. № 2. С. 155-160.
15. О влиянии ландшафта местности на характеристики снежного покрова и на проходимость транспортных средств / Папунин А.В. [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. № 4 (106). С. 331-335.
16. *Макаров В.С.* Обзор исследований по влиянию местности на характеристики снежного

покрова / В.С.Макаров, Д.В.Зезюлин, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. № 3 (105). С. 154-162.
17. *Макаров В.С.* Анализ влияния местности на параметры снежного покрова / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2014. № 8-1. С. 21-25.

УДК 625.033.34

ПЕГИН П.А.
Санкт-Петербургский университет
гражданской авиации
ИЛЬИН А.А.,
РУНЕВ Е.В.
Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОСТАТОЧНОСТИ СЕТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ РЕГИОНА

Аннотация. В статье рассмотрены методы и параметры оценки состояния транспортной сети региона, применяемых в существующих методиках. Предлагается внести поправки в существующие параметры оценки сети автомобильных дорог с учетом географических и климатических особенностей региона. Рассмотрены методы, позволяющие на основании информации о качестве значений отдельных параметров (критериев) транспортной сети региона определять значения весовых коэффициентов аддитивной модели. Предложен метод объективной оценки сети региональных автомобильных дорог с учетом региональной особенности (холодный регион) в который добавлены дополнительные параметры. Данное решение позволит более эффективно оценить состояние сети автомобильных дорог в рассматриваемом регионе.

Ключевые слова: дорога, автомобиль, регион, транспортная сеть, плотность дорожной сети, метод ранжирования, метод приписывания баллов, экспертная оценка, коэффициент аддитивности, матрица ковариаций.

PEGIN P.A.
Saint Petersburg University civil aviation
ILYIN A.A.,
RUNEV E.V.
Saint Petersburg state University of railway transport of
Emperor Alexander I

MATHEMATICAL MODEL OF DEFINITIONSUFFICIENT NETWORK OF HIGHWAYS OF THE REGION

Abstract. The paper examines the methods and parameters for assessing the state of the transport network of the region applied in existing methodologies. It is proposed to amend the existing parameters for the assessment of the road network, taking into account the geographical and climatic characteristics of the region. The method of determining the values of the additive model weights is considered, based on the information on the quality of the values of the individual parameters (criteria) of the transport network of the region. The method of objective evaluation of the regional road network taking into account regional peculiarities (cold region) in which additional parameters are added is proposed. This solution will allow to estimate more effectively the condition of the road network in the region under consideration.

Keywords: road, car, region, transport network, traffic network density, ranking method, scoring method, expert estimation, additivity factor, covariance matrix.

Эффективное планирование опорной сети автомобильных дорог муниципального района является одной из главных и наиболее сложных задач, решаемых

проектировщиками. Решение этой задачи учеными предлагается решать разными методами [1, 2, 8, 9, 11, 13]. Чаще всего эффективность опорной сети оценивается относительными коэффициентами, определяемыми на основе плотности населения, количества транспортных средств, количества населенных пунктов и их удаленности, дорожно-климатической зоны, количества аварий, погодно-климатических факторов и т.д. [4, 5, 6, 7, 10, 12].

Для оценки сети автомобильных дорог северных регионов на основе взаимодействия с другими транспортными сообщениями (железнодорожным, водным и воздушными), имеющимися в регионе, предлагаем использовать такие параметры как:

– протяженность автомобильных дорог (регионального и федерального значения);
– протяжённость железнодорожных путей общего пользования;
– наличие водных сетей;
– наличие аэропортов;
– наличие автовокзалов и автостанций;
– наличие транспортных и мультимодальных узлов.

В существующих методиках по оценке состояния транспортной сети региона и обеспечения транспортной доступности населения используют такие параметры как:

- плотность (густота) сети - $П_S$, который определяется по формуле (1);
- коэффициент Энгеля - $П_H$, который определяется по формуле (2);
- коэффициент Гольца - $К_Э$, который определяется по формуле (3);

$$\Pi_s = \frac{L_э}{s} \times 1000, \quad (1)$$

где $L_э$ – эксплуатационная длина дорог, км; S – площадь территории региона, км;

$$\Pi_н = \frac{L_э}{н} \cdot 10000, \quad (2)$$

где Н – численность населения;

$$K_э = \frac{L_э}{\sqrt{s \cdot H}}, \quad (3)$$

$$d = \frac{L_a + L_{жд} + L_в}{\sqrt{S \times n}}, \quad (4)$$

где *La* - протяженность автомобильных дорог; *Lжд* – протяженность автомобильных дорог; *L в* - протяжённость водных путей сообщения; *S* – площадь территории региона, км; n – количество населенных пунктов.

Введем следующие обозначения:

Y – коэффициент достаточности сети автомобильных дорог, определяемый по совокупным признакам(факторам);

X_i – факторы, влияющие на качество сети автомобильных дорог(случайные величины), $i = 1,\ldots,n$.

$(x_{i1}, x_{i2},\ldots, x_{im})$ – выборочное значение i – го фактора в m муниципальных образованиях.

$(y_1,\ldots, y_m)$ – выборочное значение коэффициента качества сети в m муниципальных образованиях.

Аддитивная многокритериальная модель достаточностисети муниципальных автомобильных дорог.

Зависимость коэффициента транспортной сети (аддитивная модель) представляет уравнение следующего вида:

$$\hat{Y} = \alpha_1 \cdot \hat{X}_1 + \ldots + \alpha_n \cdot \hat{X}_n, \quad (5)$$

где $\hat{Y} = (y_1,\ldots, y_m)$ – значение коэффициента качества достаточности сети, определяемого совокупностью признаков $X_i; \alpha_i$ – весовые коэффициенты (параметры модели), определяемые методами экспертных оценок, удовлетворяющие условию нормировки

$\sum_{i=1}^{n}\alpha_i = 1$; $\hat{X}_i = (x_{i1},...,x_{im})$ – значение i – го признака по m муниципальным образованиям.

В указанной модели $\hat{Y}$ – значение линейного функционала $\hat{Y} = F(\hat{X}_1,...,\hat{X}_n)$ относительно переменных $\{\hat{X}_i\}$. Указанный функционал удовлетворяет условию невырожденности: если признаки принимают нулевые значения: $\hat{X}_i = (0,...,0)$, то $\hat{Y} = F((0,...,0)_1,...,(0,...,0)_n) = 0$.

Для объективного оценивания транспортной сети предложены два метода, позволяющие на основании информации о качестве значений отдельных признаков (критериев) качества транспортной сети определять значения весовых коэффициентов аддитивной модели.

Оценка коэффициентов аддитивной многокритериальной модели

Рассмотрена задача оценивания коэффициентов аддитивной многокритериальной модели качества сети муниципальных автомобильных дорог.

Зависимость коэффициента транспортной сети представлена в виде множественной регрессионной модели:

$$Y = \lambda_1 \cdot X_1 + ... + \lambda_n \cdot X_n + \xi, \tag{6}$$

где ξ – случайная помеха (отклонение), λ_i – весовые коэффициенты (параметры модели).

Заметим, что Y, X_i – случайные величины, имеющие *неизвестное* нам распределение.

Для определения весовых коэффициентов модели исходной точкой является предположение, что совокупность случайных величин X_i – попарно некоррелированные факторы, т.е. $\mathrm{cov}(X_i, X_j) = DX_i \cdot \delta_{ij}$ или, что равносильно, $r(X_i, X_j) = \delta_{ij}$.

В случае базиса из некоррелированных случайных факторов для весовых коэффициентов легко получить выражения:

$$\lambda_i = \frac{\mathrm{cov}(Y, X_i)}{DX_i}, \tag{7}$$

а уравнение множественной регрессии запишется в виде:

$$\frac{y}{\sqrt{DY}} = \sum_{i=1}^{n} r(Y, X_i)\frac{x_i}{\sqrt{DX_i}}. \tag{8}$$

В случае, если распределения заданы выборками, то оценки для весовых коэффициентов можно получить из формул для выборочных моментов распределения:

$$DY \to S_Y^2 = \frac{1}{m-1}\sum_{k=1}^{m}(y_k - \overline{Y})^2; \tag{9}$$

$$DX_i \to S_{X_i}^2 = \frac{1}{m-1}\sum_{k=1}^{m}(x_{ik} - \overline{X}_i)^2 \tag{10}$$

$$\mathrm{cov}(Y, X_i) \to C_m(Y, X_i) = \frac{1}{m-1}\sum_{k=1}^{m}(y_k - \overline{Y})\cdot(x_{ik} - \overline{X}_i); \tag{11}$$

$$r(Y, X_i) \to r_m(Y, X_i) = \frac{\sum_{k=1}^{m}(y_k - \overline{Y})\cdot(x_{ik} - \overline{X}_i)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{m}(y_k - \overline{Y})^2(x_{ik} - \overline{X}_i)^2}}. \tag{12}$$

$$\lambda_i^* = \frac{C_m(Y, X_i)}{S_{X_i}^2} = \frac{\sum_{k=1}^{m}(y_k - \overline{Y})\cdot(x_{ik} - \overline{X}_i)}{\sum_{k=1}^{m}(x_{ik} - \overline{X}_i)^2}. \tag{13}$$

Введение предлагаемых параметров позволит более эффективно оценить состояние сети автомобильных дорог региона. На основе предлагаемого метода и ранее

разработанного алгоритма программы оптимизации параметров [14] планируется разработать перспективные мероприятия по повышению пропускной способности и увеличению мобильности населения, а также повысить безопасность дорожного движения, что является необходимым условием для регионов с суровыми природно-климатическими условиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Azemsha S., Kapski D., Pegin P. 2018 A method for assessing the automobilization impact on population morbidity *13th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, SPbOTSIC 2018; Saint Petersburg; Russian Federation; 27-29 September 2018 Transportation Research Procedia* 36 18-24.

2. *Belyaev A.I., Afanasyev A.S.* 2016 Efficiency of vehicle operation *International journal of economics and financial issues* 2(6) 24-30.

3. *Ilyin A., Pegin P., Semenova K.* Features Transport Planning the Network of Municipal Roads in Northern Region *Transportation soil engineering in cold regions* 1 397-401.

4. *Kapskiy D.V., Navoy D.V., Pegin P.* 2019 Development of Model for Traffic Flows on Urban Street and Road Network *Science and Technique* 18(1) 47-54.

5. *Menukhova T.A., Afanasyev A.S.* 2017 Application of methods of the solution of multi-criteria tasks for choosing an effective cargo delivery scheme *International Journal of Economic Research* №14(7) 87-94.

6. *Pegin P., E. Sitnichuk.* 2017 The Effect of Sun Glare: Concept, Characteristics, Classification *Transportation Research Procedia* 20 474-479..

7. Pegin P., Sitnichuk E. 2017 The Effect of Sun Glare: Concept, Characteristics, Classification. *Transportation Research Procedia* 20 474-479.

8. *Pegin P.P., Pegina O.A.* 2018 Method to assess accident psychological severity in drivers *13th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, SPbOTSIC 2018; Saint Petersburg; Russian Federation; 27 September 2018 до 29 September 2018 Transportation Research Procedia* 36 562-566.

9. *Балалаев А.С.* Транспортно-логистическое взаимодействие при мультимодальных перевозках. – М.: Издательство УМЦ ЖДТ (Маршрут), 2012.

10. *Домке Э.Р.* Пути сообщения, технологические сооружения / Э.Р. Домке, Ю.М. Ситников, К.С. Подшивалова. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. - 400 с.

11. *Красильщиков И.М.* Проектирование автомобильных дорог / И.М. Красильщиков, Л.В. Елизаров. – М.: Транспортная компания, 2016. - 215 с.

12. *Неруш Ю.М.* Транспортная логистика / Ю.М. Неруш, С.В. Саркисов; Гос. ун-т упр., Моск. гос. ин-т междунар. отношений (ун-т) МИД России. – М.: Юрайт, 2016. - 351 с.

13. *Пегин П.А., Ильин А.А.* Особенности транспортного планирования сети муниципальных автомобильных дорог с учетом климатических условий / Вестник гражданских инженеров, 2019. № 2 (73). С. 131-135.

14. *Пегин П.А., Ильин А.А.* Улучшение сети муниципальных автомобильных дорог (на примере Ленинградской области) / Сборник Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте IITT'2018: материалы I междунар. науч.-практ. конф., 12-13 декабря 2018 г. В 2 т. Т. 2. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2018. – 271 с.

15. *Скирковский С.В., Пегин П.А.* Разработка алгоритма и компьютерной программы оптимизации параметров функционирования городского маршрутизированного транспорта / Вестник гражданских инженеров, 2017. № 1 (60). С. 277-287.

УДК 657.051

ПЛОТНИКОВ А.М.
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
кафедра технической эксплуатации
транспортных средств

НОВЫЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ОДНОУРОВНЕВЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ

Аннотация. Приведены варианты новых методик цифрового расчета безопасности дорожного движения на одноуровневых регулируемых и нерегулируемых светофорами перекрёстках дорог по уточненной и диагностической оценкам уровней требований к безопасности движения. Первый вариант использует извлеченные из моделей формализованных и визуализированных схем организации движения на перекрестках, виды и численность конфликтных точек, а также интенсивность движения транспортно-пешеходных потоков в конфликтных точках. Второй – использует только информацию о видах и численности конфликтных точек.

Ключевые слова: одноуровневые регулируемые и нерегулируемые перекрестки дорог, безопасность дорожного движения, виды конфликтной загрузки, схемы организации движения транспортно-пешеходных потоков.

PLOTNIKOV A.M.
Saint-Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering

NEW METHODS FOR ASSESSING TRAFFIC SAFETY AT SINGLE-LEVEL INTERSECTIONS

Abstract. Variants of new methods for digital calculation of road safety at single-level traffic light-controlled and unregulated intersections are presented, taking into account diagnostic assessments of the levels of road safety requirements. The first option uses information from models of formalized and visualized traffic patterns at intersections, traffic and pedestrian flows at conflict points, types and number of conflict points, and traffic intensity. The second one uses only information about the types and number of conflict points.

Keywords: single-level regulated and unregulated intersections of road traffic, road safety, types of conflict load, schemes of organization of transport and pedestrian flows.

В монографии [1] и докторской диссертации [2] автором представлены системные исследования оценок безопасности дорожного движения (БДД) с анализом эффективности их расчета по известным и новым методикам. Для этого в Санкт-Петербурге на случайной выборке из 77-ми действующих Х- и Т-образных одноуровневых регулируемых перекрёстках (ОРП) дорог по их формализованными моделями схем организации движения с конфликтной загрузкой (СОД с КЗ) проведена научно-исследовательская работа (Госконтракт №НИР-29 от 10.09.2014 г.) со сравнительным анализом известных и новых оценок для методик:

– опасности пересечений $K_а$ - МАДИ/Лобанов Е.М. [3],
– конфликтной загрузки $R_{Шел}$ - НИЦ ГАИ МВД России / Шелков Ю.Д. [4],
– уточненной и диагностической оценок уровней требований к безопасности

движения (УТБД) - $R_{Пл}$ и $R_{Плmax}$ – СПбГАСУ / Плотников А.М. [5, 6].

Исследования по известным методикам дали противоречивые, не отражающие тренд реальной статистики ДТП в СПб [2] результаты по числу погибших в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) на ОРП улично-дорожной сети (УДС) – либо «неопасные» по K_a, либо «очень опасные» по конфликтной загрузке $R_{Шел}$. Результаты расчета БДД на ОРП по новым оценкам $R_{Пл}$ и $R_{Плmax}$ дали их вероятность к генерации ДТП – около 22 % [7, 8]. Это отражают реальную статистику и тренд с ДТП от общих среднегодовых потерь со смертельным исходом на УДС в Санкт-Петербурге, включая и режимы отключения электропитания, когда ОРП переходят в одноуровневые нерегулируемые (светофорами) перекрестки (ОНП) дорог.

Исследования для ОРП являются патентночистыми и малозатратными в условиях жёстких финансовых ограничений (Патенты: изобретений №2486599, №2469410, полезных моделей №114203, №159669) [9, 10, 11, 12].

Исследования используют авторскую методологию обеспечения безопасности движения [1, 2] на ОРП и ОНП дорог и базируются на:

- новом понятийном аппарате оценок уровней требований к безопасности движения (УТБД), использующем норматив ОДМ 218.4.005-2010 [13];
- синтезированных математических формулах уточненного $R_{Пл}$ и диагностического $R_{Плmax}$ расчета оценочных УТБД в СОД с КЗ на Х- и Т-образных ОРП и ОНП [2, 5];
- созданной классификации моделей СОД с КЗ для всех видов геометрии Х- и Т-образных ОРП по трём методам светофорного управления (пофазном управлении движением – **I**, управлении по отдельным направлениям движения – **II** и новом комбинированном управлении – **III**) и УТБД [2,14].

В табл. 1 представлены действующие оценки опасности пересечения для K_a, которые из-за ошибочных разрывов в границах скорректированы в новом понятийном аппарате оценок УТБД как: недопустимый (НУТБД), допустимый (ДУТБД), промежуточный (ПрУТБД), повышенный (ПУТБД). Цифровая оценка ПУТБД отражает концепцию «нулевой смертности» на ОРП и ОНП дорог.

Таблица 1.

Понятийный аппарат оценки УТБД – K_a, $R_{Пл}$, $R_{Плmax}$ и интервалы их значений

Действующие оценки – K_a ед.	меньше 3	3,1–8	8,1–12	больше 12
Виды уровня (степени) опасности пересечения или уровень конфликтной загрузки по ОДМ 218.4.005-2010	Неопасное	Малоопасное	Опасное	Очень опасное
Разработанные уточненные оценки – $R_{Пл}$, $R_{Плmax}$ ед.	0 – ≤3	>3 – ≤8	>8 – ≤12	>12
Новый понятийный аппарат оценки уровней требований к безопасности движения (УТБД) вместо действующих видов	Повышенный (ПУТБД)	Промежуточный (ПрУТБД)	Допустимый (ДУТБД)	Недопустимый (НУТБД)

Новый понятийный аппарат позволяет для любых ОРП и ОНП дорог по их формализованным моделям СОД проводить визуализацию КЗ через конфликтные точки (КТ): пересечений (для «транспорт-транспорт» и – «транспорт-пешеход»), а также слияний и отклонений (для «транспорт-транспорт»). При этом в рамках действия Правил Дорожного Движения РФ (ПДД РФ), можно влиять на вид и численность конфликтных точек в СОД с КЗ, т.е. управлять целевым достижением заданного УТБД и пропускной способностью [15] на ОРП и ОНП. Математические формулы для уточненного $R_{Пл}$ и диагностического $R_{Плmax}$ расчета оценочных УТБД имеют вид (1) и (2):

$$R_{\text{Пл}} = 1.7\sum_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{\text{п}} \frac{N_{i\text{п}}N_{j\text{п}}}{(N_{i\text{п}}+N_{j\text{п}})^2} + \sum_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{\text{с}} \frac{N_{i\text{с}}N_{j\text{с}}}{(N_{i\text{с}}+N_{j\text{с}})^2} + 0{,}3\sum_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{\text{о}} \frac{N_{i\text{о}}N_{j\text{о}}}{(N_{i\text{о}}+N_{j\text{о}})^2} + 3\frac{N_{d1}N_{d2}}{\left(N_{d1}+N_{d2}\right)^2}, \quad (1)$$

$$R_{\text{Плmax}} = 0{,}43\text{п} + 0{,}25\text{с} + 0{,}1\text{о} + 0{,}75, \quad (2)$$

где п, с, о – число по видам конфликтных точек соответственно пересечений («транспорт-транспорт» и «транспорт-пешеход»), слияний, отклонений; i, j – пределы суммирования слагаемых; четвертое слагаемое от столкновений транспортных средств (ТС), которые не соблюдают безопасную дистанцию между собой при движении; N_iп, N_jп (i,j = 1, ..., п) при $i \neq j$ – интенсивности движений транспортных потоков (ТП), которые образуют конфликтные точки пересечения (в том числе и пешеходных потоков с ТП, интенсивность пешеходных потоков берется с уменьшением в 4 раза), ед./ч; N_iс, N_jс (i,j = 1, ..., с) при $i \neq j$ при – интенсивности движения соответственно ТП, образующих конфликтную точку их слияния для ТС, ед./ч; N_iо, N_jо (i,j = 1, ..., о) при $i \neq j$ – интенсивности движения соответственно ТП образующих конфликтную точку их отклонения для ТС, ед./ч; $Nd1$, $Nd2$ – суммарные интенсивности ТП на подходах к стоп-линиям пересечения и внутри его в прямом и обратном направлениях по каждой из пересекающихся двух дорог $d1$ и $d2$, ед./ч, образующих перекресток и вероятность столкновений (наезда) сзади.

Таблица 2.

Классификация моделей СОД с КЗ на полную группу задач 21 шт.

Известные **I** и **II** - **Мет.** / Комб. ед. **III-Мет.**	**I – Метод** (пофазное управление)			**II – Метод** (управление по отдельным направлениям)		
	>8 ÷ ≤12 ДУТДБ	*>3÷ ≤8* ПрУТДБ	*0 ÷ ≤3* ПУТДБ	*>8 ÷ ≤12* ДУТДБ	*>3÷ ≤8* ПрУТДБ	*0 ÷ ≤3* ПУТДБ
	1)	2)	3)	4)	5)	6)
7)	* ∪	------*				
8)	* ∪	----------	------*			
9)	* ∪	----------	----------	-----*		
10)	* ∪	----------	----------	----------	-----*	
11)	* ∪	----------	----------	----------	----------	-----*
12)		* ∪	-----*			
13)		* ∪	----------	-----*		
14)		* ∪	----------	----------	-------*	
15)		* ∪	----------	----------	----------	-------*
16)			* ∪	-----*		
17)			* ∪	----------	------*	
18)			* ∪	----------	----------	-------*
19)				* ∪	-------*	
20)				* ∪	----------	-------*
21)					* ∪	-------*

Соответствующие весовые коэффициенты 0,43; 0,25; 0,1 и 0,75 в формуле (2) получены как результат перемножения соответствующих значений весовых коэффициентов в формуле (1) на его верхнее пороговое значение для математической диагонали 0,25 с последующим округлением соответствующих результатов до 0,43 и 0,1. Величина 0,25 равнозначна для каждого из четырёх математических выражений:

$\frac{N_{i\text{п}}N_{j\text{п}}}{(N_{i\text{п}}+N_{j\text{п}})^2}$, $\frac{N_{i\text{с}}N_{j\text{с}}}{(N_{i\text{с}}+N_{j\text{с}})^2}$, $\frac{N_{i\text{о}}N_{j\text{о}}}{(N_{i\text{о}}+N_{j\text{о}})^2}$ и $\frac{N_{d1}N_{d2}}{\left(N_{d1}+N_{d2}\right)^2}$, при Niп = Njп; Niс = Njс; Niо = Njо и $Nd1 = Nd2$.

Технология диагностического расчета оценочных УТБД по формуле (2) для $R_{\text{Плmax}}$ заключается в том, что практическое её проведение на любом по геометрии одноуровневом Х- и Т-образном ОНП или ОРП дорог не требует трудоемких полевых затрат на получение информации об интенсивности движения ТПП, как это необходимо для уточнённого расчёта $R_{\text{Пл}}$ по формуле (1).

Исследования комбинаторной математикой моделей СОД с КЗ по методам управления **I**, **II**, **III** и УТБД, представлены в табл. 2 классификацией на полную группу задач 21 шт., где Последние 15 вариантов задач получены объединением множеств * ∪ (сумм) в сочетаниях по два варианта из шести. Классификация предназначена для тендеров по выбору «подрядчика» на проектные работы по разработке или модернизации ОРП дорог.

Вывод по результатам выполненных исследований.

Созданная технология является малозатратной и позволяет:

1. Провести цифровой диагностический аудит оценок УТБД и их паспортизацию на действующих ОРП и ОНП дорог, что позволит ранжировать перекрестки по очагам аварийности и планировать вероятность ДТП;

2. Достичь «нулевой смертности» на дорогах к 2030 году существенным (50 %) снижением смертность на ОРП и ОНП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Плотников А.М.* Управление безопасностью дорожного движения на одноуровневых перекрестках. Теория и практика: монография. – СПб.: Экспертные решения, 2014. - 404 с.
2. *Плотников А.М.* Методология обеспечения безопасности движения на регулируемых пересечениях улично-дорожных сетей мегаполисов: дис. д-ра техн. наук. - СПб., 2016. 475 с.
3. *Лобанов Е.М.* Транспортная планировка городов: Учебник для студентов вузов. – М.: Транспорт, 1990. - 240 с.
4. Организация дорожного движения в городах / под общ. ред. Ю.Д. Шелкова. - М.: Научно-исследовательский центр ГАИ МВД России, 1995. - 143 с.
5. *Плотников А.М.* Методология оценки безопасности дорожного движения на регулируемых пересечениях / Вестник гражданских инженеров, 2016. №3 (56). С. 227–232.
6. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019613158 РФ. Диагностическая оценка безопасности дорожного движения на одноуровневых перекрестках / Плотников А.М. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 12.03.2019.
7. *Плотников А. М.* Диагностическая цифровая оценка безопасности дорожного движения на пересечениях дорог / Вестник гражданских инженеров, 2018. № 4 (69). С. 204–209.
8. *Плотников А.М.* Методика оценки безопасности дорожного движения на одноуровневых пересечениях дорог / Вестник гражданских инженеров, 2018. № 6 (71). С. 201–207.
9. Пат. 2486599 РФ. Способ регулирования транспортных потоков на перекрестке / А.М. Плотников, П.А. Кравченко, М.А. Плотников. Зарег. и опубл. 27.06.2013. Бюл. №18.
10. Пат. 2469410 РФ. Система управления движением на многополосных перекрестках / А.М. Плотников, П.А. Кравченко, Р.М. Архестов, А.В.Андреев. Зарег. и опубл. 10.12.2012. Бюл. №34.
11. Пат. на полезную модель 114203 РФ. Система управления транспортными и пешеходными потоками через перекресток / А.М. Плотников, П.А. Кравченко, Р.М. Архестов, В.С. Григорьева. Зарег. и опубл. 10.03.2012. Бюл. №7.

12. Пат. на полезную модель 159669 РФ. Система автоматического управления дорожным движением на одноуровневом регулируемом перекрестке / А.М. Плотников. Зарег. и опубл. 20.02.2016. Бюл. №5.
13. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах: ОДМ 218.4.005-2010: утв. распоряжением Минтранса РФ от 24.06.2002 г. № ОС-557-р: взамен ВСН 25-86.
14. *Plotnikov A., Kotikov Y., Kravtchenko P*. 2017 Classification Investigations of Traffic Management Schemes Having Conflict Loading at the Signal-Controlled Road Junctions *12th International Conference Transportation Research Proceedings* 20 511– 515.
15. *Afanasyev A., Panfilov D.* 2017 Estimation of Intersections Traffic Capacity Taking into Account Changed Traffic Intensity *Transportation Research Procedia* 20 2-7.

УДК 656.031.8

САФИУЛЛИН Р.Н.,
АФАНАСЬЕВ А.С.
Санкт-Петербургский горный университет,
кафедры транспортно-технологических
процессов и машин

ПОСТРОЕНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ВЕСОГАБАРИТНОГО КОНТРОЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ РЕШЕНИИ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ДОСТАВКИ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ И КРУПНОГАБАРИТНЫХ ГРУЗОВ

Аннотация: В данной статье представлены результаты исследования повышения эффективности перевозок тяжеловесных грузов посредством минимизации размера вреда автомобильным дорогам, а также разработаны предложения по внедрению инновационных решений при планировании перевозочного процесса тяжеловесных грузов, обеспечивающие оптимальное планирование перевозок тяжеловесных грузов с учетом снижения влияния на автомобильные дороги.

Ключевые слова: адаптивная система весогабаритного контроля, оптимизационное планирование, тяжеловесные грузы, автоматизированные системы транспорта.

SAFIULLIN R.N.,
AFANASIEV A.
Saint-Petersburg Mining University,
Department of transport and technological
processes and machines

BUILDING AN ADAPTIVE SYSTEM FOR WEIGHT AND SIZE CONTROL OF VEHICLES IN SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS OF HEAVY AND OVERSIZED CARGO DELIVERY

Abstract: this article presents the results of research on improving the efficiency of heavy cargo transportation by minimizing the amount of damage to roads , as well as developed proposals for the introduction of innovative solutions for planning the transportation process of heavy cargo , ensuring optimal planning of heavy cargo transportation with a view to reducing the impact on roads.

Keywords: adaptive weight and size control system, optimization planning, heavy loads, automated transport systems.

Введение. Перевозка тяжеловесных грузов автомобильным транспортом является одним из самых сложных видов перевозок, сопряженных с целым комплексом мер в части планирования и обеспечения. При этом надо учитыватьс каждым годом возрастающую проблему сохранности автомобильных дорог, объектов транспортной инфраструктуры, для решения которой требует ряд инновационных решений по весогабаритному контролю за движением транспортных средств. Для оптимизации перевозочного процесса весогабаритного контроля и повышения экономической эффективности перевозок грузов необходимо снизить размер вреда автомобильным дорогам. Предлагается оптимизация маршрута движения транспортного средства с выбором автомобильных дорог, соответствующих наилучшим прочностным показателям.

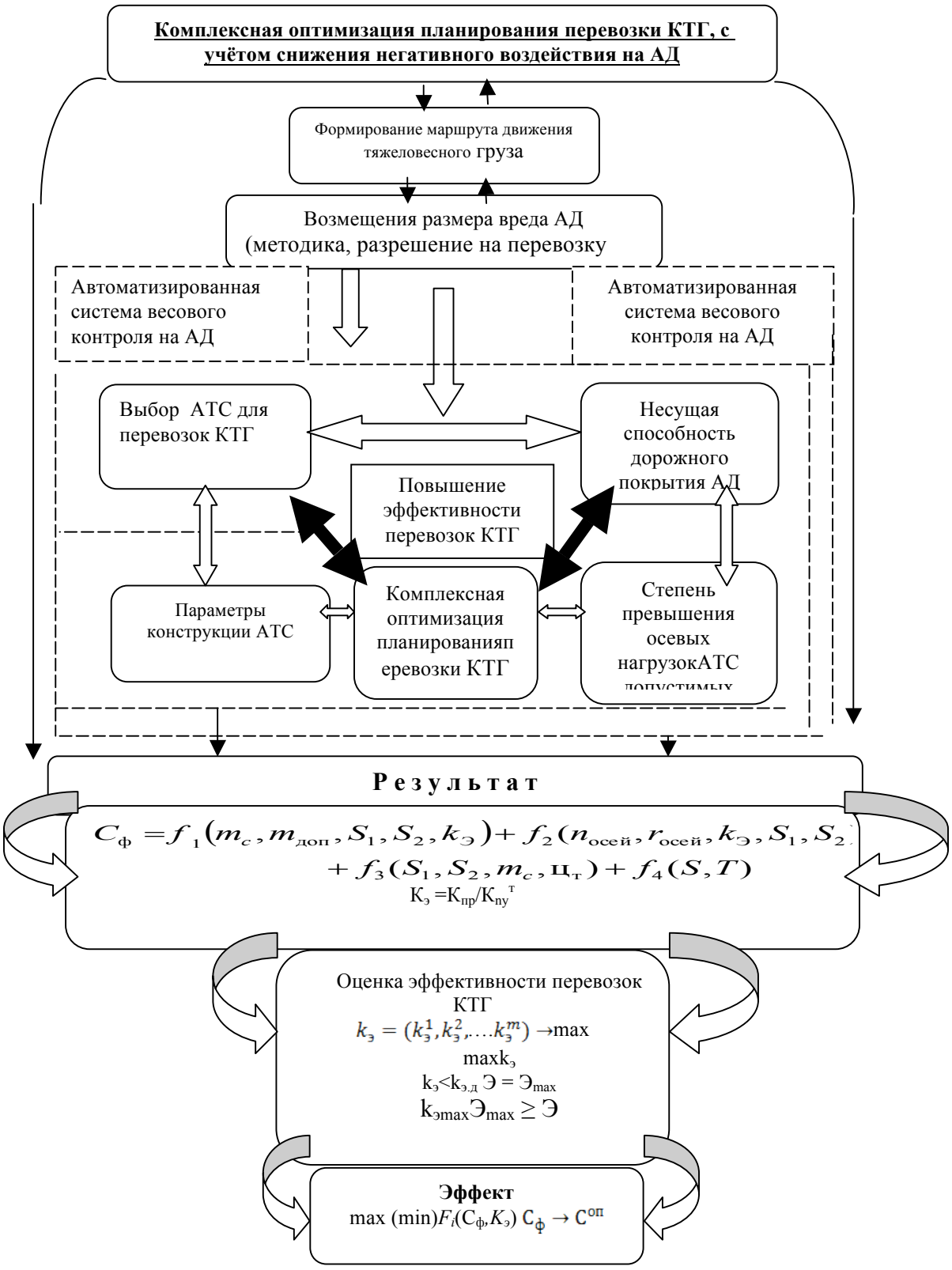


Рисунок 1 – Обобщенная оптимизационная модель планирования перевозки КТГ с учетом снижения негативного воздействия на автомобильные дороги

Основная часть. Методика оптимизационного планирования доставки тяжеловесных грузов, базирующаяся на применении системотехнического подхода приведена на рис. 1.

Моделирование начинается с технических решений и рекомендаций оптимизации. Основная цель этого этапа состоит в изучении соответствия между несущей способностью дорожного покрытия АД и конструктивными параметрами АТС [1]. По мере поступления

информации о несущей способности дороги, особенностях конструкции АТС модель уточняется и приближается по своим свойствам к оригиналу. В связи с этим математическая модель должна обладать «гибкостью», т.е. свойством быстрой перестройки своей структуры и модели позволяет в свою очередь правильно планировать эксперимент, результаты которого снова уточняют модель и так далее. Таким образом, эксперимент является необходимым условием создания математической модели, а, в свою очередь, модель является необходимым условием правильной постановки эксперимента.

Оперативная связь модельного и натурного эксперимента позволяет существенно снизить стоимость оптимизации и сократить его сроки.С помощью математического моделирования предлагается определить маршрут движения, проходящий по автомобильным дорогам с наивысшими прочностными параметрами, а значит с наименьшим значением размера вреда.

Предлагаемый метод планирования особенно актуален по причине внедрения автоматизированных систем весового и габаритного контроля на автомобильных дорогах, которые в настоящее время уже функционируют в отдельных регионах России. С учетом применения автоматизированных систем весового и габаритного контроля предлагается использовать современные информационные технологии для быстрого и эффективного расчета оптимального маршрута движения. Пример интерфейса такой информационной системы приведен на рис. 2.

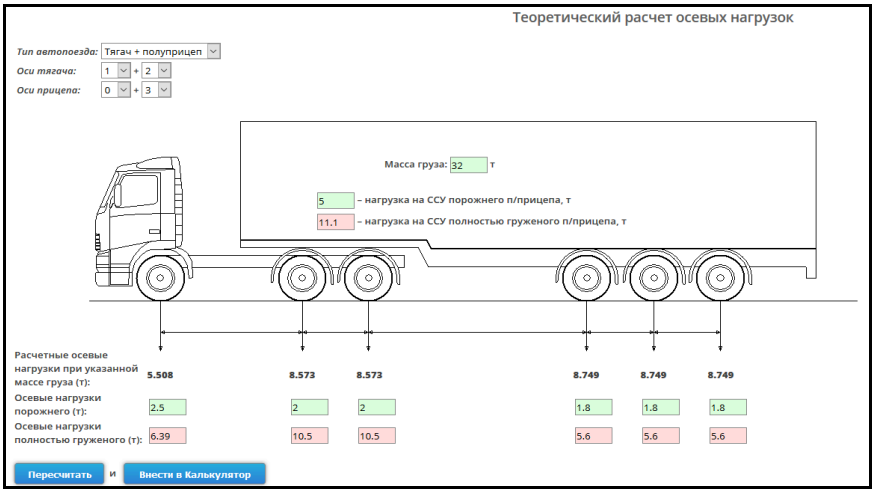


Рисунок 2 – Пример интерфейса программно-вычислительного модуля по расчёту размера вреда

Среди оптимальных планов задачи перевозок в канонической форме обязательно есть опорное решение системы ограничений при помощи симплекс-метода. Если оптимальный план задачи единственен, тогда он совпадает с некоторым опорным решением. Исходя из некоторого, найденного заранее опорного решения по определенному алгоритму симплекс-метода, подсчитываем новое опорное решение, на котором значение целевой функцииFне меньше, чем на старом. С новым допустимым базисным решением поступают так же, пока не найдут решение, которое будет являться оптимальным [7, 9].

Задача линейного программирования в общей постановке состоит в отыскании значений n переменных x_1, …, x_n, доставляющих экстремум функции. Любую задачу линейного программирования можно представить в виде:

$$z = \sum_{j=1}^{n} cj * xj \rightarrow \max(\min) .$$

При решении системы уравнений (3) симплекс-метода установлено, что затраты на перевозочный процесс по заданному системой маршруту на 61% меньше затрат на перевозочный процесс по отклоненному маршруту (при отсутствии системы контроля). При перевозочном процессе с системой контроля движения транспортной работы АТС

также меньше время рейса, нежели при отсутствии системы, то есть повысилась производительность труда на 57%.

Заключение. Таким образом, наибольшей эффективности (увеличения транспортной работы, снижения издержек) возможно достичь комплексным методом, включающим в себя: определение всех этапов перевозочного процесса и факторов, оказывающих влияние; поиск оптимального решения для каждого этапа; автоматизация процесса планирования; применение инновационных методов в организации перевозок, включая контроль. За счет внедрения систем контроля транспортной работы АТС возможно сократить продолжительность и трудоемкость перевозки груза, появляется возможность информировать водителя о возникших проблемах на дороге, заторах и маршрутах объездов и т.д. Представленнаяоптимизационная модель планирования перевозки КТГ с учетом снижения негативного воздействия на автомобильные дороги позволил установить, что системы контроля транспортной работы АТС напрямую влияют на снижение себестоимости перевозок, а, следовательно, и на оптимизацию перевозочного процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сафиуллин Р.Р.* Методика многокритериальной оптимизации процесса планирования перевозок тяжеловесных грузов автомобильным транспортом: дис. канд .техн .наук. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019.
2. *Сафиуллин Р.Н., Керимов М.А.* Средства фотовидеофиксации нарушений ПДД: нормативное регулирование и практика применения: монография. – М.: Директ-Медиа, 2016. - 355 с.
3. *Вишневский В.М.* Анализ и исследование методов проектирования автоматизированных систем безопасности на автодорогах с использованием новых широкополосных беспроводных средств и RFID-технологий / Технологии информационного общества. T_Comm, 2012. №7. С. 48-54.
4. *Сафиуллин Р.Н.* Интеллектуальные бортовые транспортные системы на автомобильном транспорте: монография. - М.-Берлин: Директ-Медиа, 2017. - 354 с.
5. *Safiullin R.N.* 2018 Methodology for the improvement of control functions for traffic of road vehicles using systems of the automatic recording of administrative violations *Architecture and Engineering* 2 (3) 26-33.
6. *Safiullin R.N, Reznichenko V.V., Gorlatov D.V.* 2019 Modeling and optimization of processes of transportation of heavy cargoes based on the automation of monitoring systems for the motor vehicles movement *IOP: Earth and Environmental Science* 378(1) 012069.
7. Патент на ПМ №174174 РФ Автоматизированная система контроля данных о техническом состоянии двигателя внутреннего сгорания транспортного средства / . Р.Н. Сафиуллин / Опубл.05.10.2011. Бюл. № 28.
8. *Kerimov Mukhtar, SafiullinRavil, Marusin Alexey* 2017 Evaluation of Functional Efficiency of Automated Traffic Enforcement Systems *Transportation Research Procedia* 288-294.
9. *Safiullin R.N., Afanasyev A.S., Reznichenko V.V.* 2019 The Concept of Development of Monitoring Systems and Management of Intelligent Technical Complexes 237 322-330.
10. *Safiullin R.N., Marusin A., Safiullin R.R., Ablyazov T.* 2019 Methodical approaches for creation of intelligent management information systems by means of energy resources of technical facilities *E3S Web of Conferences EECE-2019* 140 10008.
11. *Safiullin R.N., Kerimov M., Afanasyev A., Marusin A.* 2018 A model for justification of the numer of traffic enforcement facilities in the region *Transportation Research Procedia* 493-499.
12. *Safiullin R.N., Afanasyev A.S.* Integral estimation of methods of calculation of damage caused by vehicles during transportation of heavy cargoes *IOP: Earth and Environmental Science*.
13. *Safiullin R.* 2018 Methodology for the improvement of control functions for traffic of road

vehicles using systems of the automatic recording of administrative violations *Architecture and Engineering* 2 (3) 26-33.
14. *Козлов Л.Н., Урличич Ю.М., Циклис Б.Е.* О концептуальных подходах формирования и развития интеллектуальных транспортных систем в России / Транспорт Российской Федерации, 2009. № 3–4 (22–23).
15. *Кондратьев А.А.* Барьеры внедренческих процессов ITS / Сборник трудов Международной академии транспорта. – М., 2014. №17. С. 89-91.

УДК 656:13

ЧЕРНЯЕВ И.О.,
ЕВТЮКОВ С.А.
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

РЕАЛИЗАЦИЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ РЕЖИМОВ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением непрерывного контроля условий эксплуатации транспортных средств. Описаны факторы, определяющие условия эксплуатации. Для каждого фактора предложен способ непрерывного контроля, представлены экспериментальные данные и расчетные формулы для их обработки. Предложен способ индивидуального определения в режиме реального времени коэффициента корректировки периодичности технического обслуживания.

Ключевые слова: условия эксплуатации; периодичность технического обслуживания; корректирование нормативов технической эксплуатации; мониторинг эксплуатации; условия движения; состояние дорожного покрытия.

CHERNYAEV I.O.,
EVTYUKOV S.A.
Saint-Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering

IMPLEMENTATION OF CONTINUOUS MONITORING OF VEHICLE OPERATING CONDITIONS TO CORRECT THEIR MAINTENANCE MODES

Abstract. The article deals with issues related to ensuring continuous monitoring of vehicle operating conditions. The factors that determine the operating conditions are described. A method of continuous monitoring is proposed for each factor, experimental data and calculation formulas for their processing are presented. The method of individual determination of the coefficient of adjustment of maintenance frequency in real time is proposed.

Keywords: operating conditions; vehicles maintenance interval; correction of maintenance standards; operation monitoring; traffic conditions; road surface condition.

Одним из основных условий, обеспечивающих эффективность коммерческой эксплуатации транспортных средств (ТС), является обеспечение их максимальной технической готовности при минимуме затрат. Данную задачу решает система технической эксплуатации транспортных средств, в рамках которой для поддержания требуемого технического состояния разрабатывается и реализуется комплекс соответствующих мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту (ТО и Р).

Для организации процессов ТО и Р ТС в подавляющем большинстве случаев продолжает применяться планово-предупредительная система [1]. Данная система, ориентированная на эксплуатацию ТС в составе крупных парков, теряет свою эффективность в современных условиях, которые характеризуются разукрупнением предприятий и ростом доли ТС, эксплуатируемых индивидуальными владельцами [2, 3].

Таким образом, актуальной является задача разработки так называемых адаптивных систем ТО и Р, которые позволят принимать решение о выполнении

технических воздействий индивидуально для каждого транспортного средства, повышая тем самым эффективность процессов обеспечения их технической готовности [4, 5, 6, 7].

Решению данной задачи способствует современный уровень техники и информационных технологий, позволяющий реализовывать непрерывный дистанционный контроль параметров эксплуатации ТС [8, 9, 10]. Данный подход может быть применен для реализации механизмов, позволяющих осуществлять индивидуальную коррекцию нормативов технической эксплуатации.

Так, одним из основных нормативов ТО и Р является периодичность технического обслуживания. В планово-предупредительной системе она определяется с учетом базовой периодичности ТО и значений корректирующих коэффициентов:

$$L_{\text{ТО}} = L_{\text{ТО}}^{\text{баз}} \cdot K1 \cdot K3, \quad (1)$$

где $L_{\text{ТО}}^{\text{баз}}$ – базовая нормативная периодичность ТО, км;
$K1$ – коэффициент, учитывающий условия эксплуатации;
$K3$ – коэффициент, учитывающий природно-климатические условия.

Следует отметить, что если в силу различных обстоятельств нормативные документы, регламентирующие систему ТО и Р автотранспортных средств в РФ не обновлялись более 30 лет, то в других государствах – участниках ЕАЭС подход 30-летней давности, хотя и в несколько обновленном варианте, но продолжает сохраняться [11].

Природно-климатические условия определяются с учетом районирования территории страны на основе статистических параметров климатических факторов и могут быть охарактеризованы как практически не подверженные вариации по сравнению с условиями эксплуатации, учитываемыми коэффициентом $K1$ в формуле (1).

Значения коэффициента $K1$определяются с учетом трех условий: типа дорожного покрытия, условий движения и рельефа местности. Анализ современных особенностей и маршрутов эксплуатации ТС позволяет говорить о том, что практически все перечисленные условия могут изменяться в течение одной ездки. Определение этих условий в режиме реального времени индивидуально для каждого ТС позволит осуществить индивидуальное определение текущего значения коэффициента $K1$. Так как$K1$ может принимать определенное значение из конечного ряда возможных значений [1, 11], учет накопленного к текущему моменту времени t_i, в течение которого $K1$ сохранял свое i-тое значение с момента времени начала эксплуатации t_0, позволит определить текущее индивидуальное средневзвешенное по времени значение коэффициента $K1$:

$$\overline{K1_{\text{текущ}}} = \frac{\sum_{i=1}^{5} K1_i t_i}{t_{\text{текущ}} - t_0}. \quad (2)$$

Подстановка значения $K1$, определенного по формуле (2), обеспечит расчет в каждый момент времени текущей скорректированной периодичности ТО по формуле (1), что позволит, с учетом текущего пробега ТС, принимать решение о выполнении ТО для данного ТС индивидуально.

Для определения в режиме реального времени типа дорожного покрытия, по которому осуществляется эксплуатация ТС, возможно использование непрерывного контроля вертикальных ускорений подрессоренных масс, регистрируемых на кузове ТС. Данный способ основан на том, что взаимодействие колес ТС с неровностями дороги является основным источником вынужденных колебаний элементов конструкции ТС, степень силовых воздействий колебательных процессов на элементы конструкции, являющихся причиной ухудшения технического состояния, оценивается параметрами, связанными с ускорениями, а параметры колебательных процессов элементов конструкции ТС в процессе движения имеют непосредственную связь с микропрофилем дороги, по которой это движение осуществляется [12]. В свою очередь, каждый тип дорожного покрытия имеет характерный для него микропрофиль.

Результаты экспериментального определения вертикальных ускорений кузова ТС категории М1 с помощью жестко закрепленного на нем акселерометра при движении со

скоростью 30 км/ч по дорогам с различными типами покрытий представлены на рис. 1.

Визуальная оценка профилей вертикальных ускорений подтверждает возможность идентификации с их помощью типа дорожного покрытия, по которому осуществляется движение ТС. Для обеспечения возможности идентификации типа дорожного покрытия не только визуальным методом, но и в автоматическом режиме на основе математической обработки массива данных о вертикальных ускорениях, введена средний уровень ускорений, рассчитываемый по формуле:

$$\bar{j}(t) = \frac{1}{\delta}\int_{t}^{t+\delta} j(t)dt, \qquad (3)$$

где $\bar{j}(t)$ – текущее значение среднего уровня ускорений в момент времени t, м/с^2.
$j(t)$ – текущее значение ускорения в момент времени t, м/с^2;
δ – период времени, для которого определяется средний уровень ускорений, с;

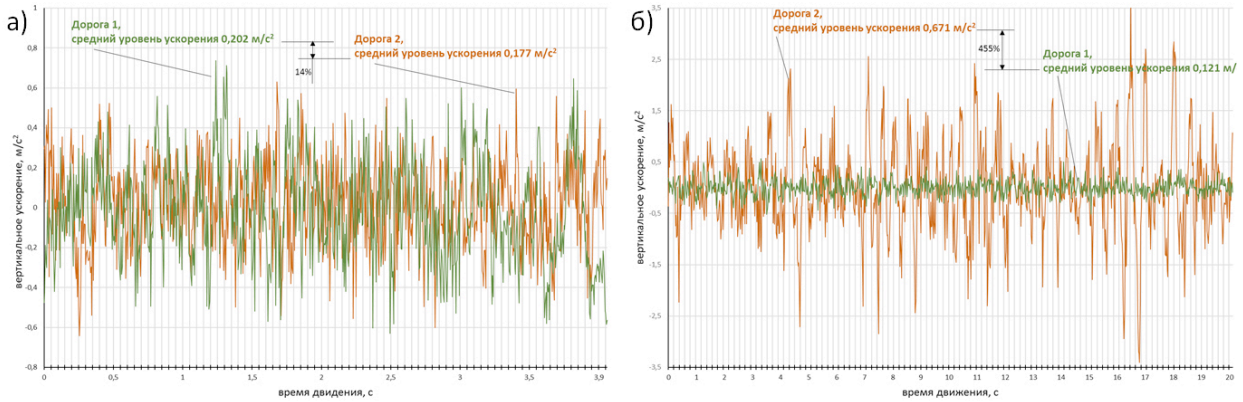


Рисунок 1 - Профили вертикальных ускорений кузова ТС при движении по дорогам с различными типами покрытий (шаг замеров – 5 мс):
а) дорога 1 и дорога 2 – асфальтобетон Д1;
б) дорога 1 – асфальтобетон Д1;
дорога 2 – грунт, улучшенный местными материалами Д5.

Формула (3) является аналогом формул, используемых при анализе профилей ускорений для определения уровнясиловых воздействий и значений индекса возможного ущерба *ASI*(*t*) в системе ЭРА-ГЛОНАСС [13]. В рассматриваемом случае рассчитанные по формуле (3) величины средних уровней ускорений позволяют идентифицировать тип дорожного покрытия и сравнить их силовое воздействие на элементы конструкции ТС. Так, одинаковые дорожные покрытия имеют сходные профили ускорений и мало отличающиеся величины среднего уровня ускорений (рис. 1, а), в то время как разница средних уровней ускорений для асфальтобетонного и грунтового покрытий может достигать 4,5 раз (рис. 1, б).

Следует отметить, что предложенный способ позволяет идентифицировать не только тип дорожного покрытия, но и его состояние. Так, на рис. 2 приведены результаты экспериментального определения вертикальных ускорений кузова ТС категории М1 с помощью жестко закрепленного на нем акселерометра при движении со скоростью 30 км/ч по дорогам с асфальтобетонным покрытием в различном состоянии [14].

Результаты расчета показывают, что для асфальтобетонного покрытия с дефектами в виде выбоин и просадокзначение среднего уровня ускорений (а, значит, и степени силовых воздействий колебательных процессов на элементы конструкции, являющихся причиной ухудшения технического состояния) может превышать в значение для покрытия без дефектовболее чем в два раза.

Определение в режиме реального времени типа дорожного покрытия и его состояния на основе анализа профиля вертикальных ускорений кузова ТС позволит как обеспечить индивидуальную корректировку периодичности технического обслуживания,

так и повысить ее точность с учетом общего состояния дорог в Российской Федерации.

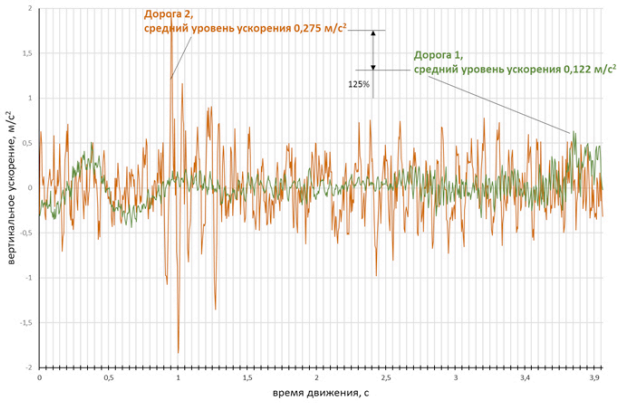


Рисунок 2 - Профили вертикальных ускорений кузова ТС при движении по дорогам с асфальтобетонным покрытием Д1 в различном состоянии (шаг замеров – 5 мс):
а) дорога 1 – без дефектовдорожного покрытия, дорога 2 – с дефектами дорожного покрытия в виде выбоин и просадок

Для определения в режиме реального времени условий движения ТС возможно использованиенепрерывного контроля его скорости. Условия движения, соответствующие движению в плотном транспортном потоке большого города, характеризуются частыми изменениями скорости, частыми остановками, большим количеством разгонов и торможений по сравнению с движением в пригородной зоне и за ее пределами. На рис. 3 представлен график изменения скорости движения транспортного средства категории М1 по улично-дорожной сети Санкт-Петербурга с выездом на кольцевую автомобильную дорогу (значения скорости получены из бортовой системы диагностики ТС через разъем OBD-II).

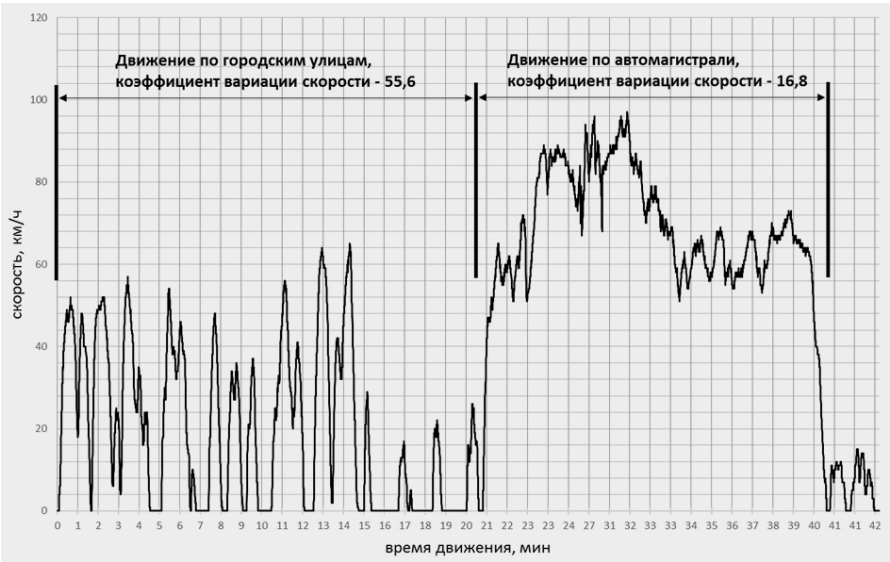


Рисунок 3 - График изменения скорости движения ТС по улично-дорожной сети Санкт-Петербурга с выездом на кольцевую автомобильную дорогу

Данный пример выбран как характерный для иллюстрации того, что в пределах одной ездки условия движения также, как и тип дорожного покрытия, могут существенно изменяться.

Для анализа данных о скоростях движения с целью идентификации условий движения ТС для визуально выделенных интервалов, соответствующих движению в плотном транспортном потоке по городским улицам и по автомагистрали, рассчитаны

коэффициенты вариации. Данный показатель является общепринятым в статистических исследованиях для оценки и сравнения вариативности одного и того же признака в различных совокупностях с различными значениями математических ожиданий этого признака. Для его расчета использована следующая формула [15]:

$$CV_v(t) = \frac{1}{\overline{v_\delta}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_\delta}(v_i - \overline{v_\delta})^2}{n_\delta - 1}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $CV_v(t)$ – текущее значение коэффициента вариации скорости в момент времени t;
δ – период времени, предшествующий моменту времени t, для которого определяется значение коэффициента вариации скорости, с;
$\overline{v_\delta}$ – математическое ожидание значений скорости за период времени δ, м/с;
v_i – значения скоростей в период времени период времени δ, м/с;
n_δ – количество значений скоростей, измеренных в период времени δ.

Расчеты показывают, что движение в плотном потоке по городским улицам характеризуется значительной степенью рассеивания значений скорости, в то время как движению по автомагистрали соответствует средняя степень рассеивания и однородная совокупность значений скорости, которая характерна также для движения в пригороде и за пределами пригородной зоны.

Определение в режиме реального времени условий движения на основе анализа вариаций значений скорости движения ТС позволит обеспечить индивидуальную корректировку периодичности технического обслуживания. Необходимо отметить, что в данном случае причина вариации значений скорости является не важной. Вариации значений скорости могут возникать как непосредственно из-за условий движения, так и из-за квалификации водителя и характерного для него стиля вождения.

Последним условием, определяющим значение коэффициента $K1$, является рельеф местности, характеризующийся высотой над уровнем моря. Для ее определения в режиме реального времени можно использовать данные геопозиционирования ТС, полученные с использованием систем ГЛОНАСС/GPS, что является стандартной задачей и реализовано во многих системах мониторинга эксплуатации [16, 17, 18].

Таким образом, на основе непрерывного контроля вертикальных ускорений кузова ТС и скорости его движения с последующей оценкой среднего уровня ускорений по формуле (3) и вариации значений скорости по формуле (4) возможна реализация непрерывного контроля условий эксплуатации транспортных средств. Расчет на его основетекущего значения корректирующего коэффициента $K1$ по формуле (2) позволит оперативно корректировать периодичность технического обслуживания индивидуально для каждого транспортного средства и обеспечить для него рациональные режимы технического обслуживания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта. Утв. Министерством автомобильного транспорта РСФСР 20.09.1984.
2. *Verevkin N., Lavrentyev E., Chernyaev I., & Gurin D.* 2017 Method of providing safe technical condition of vehicles by technological design of enterprises *Transportation Research Procedia* 20 665-670.
3. *Belyaev A.I., Afanasyev A.S.* 2016 Efficiency of vehicle operation *International journal of economics and financial issues* 2(6) 24-30.
4. *Бердников И.Е.* Разработка диагностико-информационной подсистемы технического сервиса для обеспечения эксплуатационной надежности транспортно-технологических машин: дис. канд. техн. наук. – Чита, 2017. - 217 с.
5. *Дидманидзе О.Н.* Концепция технического сервиса по фактическому состоянию машин

на основе оценки их параметрической надежности / О.Н. Дидманидзе, Д.В. Варнаков, В.В. Варнаков // Вестник Московского государственного агроинженерного университета им. В.Н. Горячкина, 2016. №2(72). С. 51-57
6. *Попов Д.А.* Перспективный подход к установлению периодичности технического обслуживания автомобилей / Д.А. Попов, В.О. Никонов, М.А. Панин // Бюллетень транспортной информации, 2019. №2(284). С. 24-29.
7. *Afanasyev A.S., Terentyeva V.A., Tarasov I.V.* 2019 Management of the bus fleet structure in modern conditions *Journal of Physics: Conference Series* 1399 044049.
8. *Dobromirov Viktor, Verhorubov Vitaliy, Chernyaev Igor.* 2018 Systematizing the factors that determine ways of developing the vehicle maintenance system and providing vehicle safety *Transportation Research Procedia* 36 114-121.
9. *Katsuba Yurii, Grigorieva Liudmila.* 2017 Application of Artificial Neural networks in Vehicles' Design Self-Diagnostic Systems for Safety Reasons *Transportation Research Procedia* 20 283-287.
10. *Мороз С.М.* Сервисы ИТС для технической эксплуатации автомобилей / Автомобильная промышленность, 2015. № 9. С. 21-23.
11. Приказ Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь № 368-Ц от 18.07.2011 «Об утверждении Инструкции о порядке проведения технического обслуживания и ремонта транспортных средств».
12. *Литвинов А.С.* Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. − М.: Машиностроение, 1989. − 240 с.
13. ГОСТ Р 54620-2011. Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Автомобильная система/устройство вызова экстренных оперативных служб. Общие технические требования.
14. ГОСТ Р 50597-2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля.
15. *Кибзун А., Горяинова Е.Р., Наумов А.В.* Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами. - М.: Физматлит, 2014.
16. *Курилова А.С.* Современные системы слежения и мониторинга транспорта, используемые на автотранспортных предприятиях / KANT, 2012. № 2 (5). С. 80-83.
17. *Осадчий В.* Навигационные трекеры Novacom: технологии контроля транспорта / T-Comm - Телекоммуникации и Транспорт, 2009. С. 14-18.
18. *Толстова М.Е.* Gps-мониторинг транспорта как инновационный способ снижения издержек на транспортную логистику / Актуальные вопросы экономических наук, 2011. №.18. С. 180-185.

ПЕТЕР ХЕННИНГ
ООО «ЗИМАГ ТЕКБЕРГ»
SIEMAG TECBERG GmbH

ОТ ТРАДИЦИЙ - К ИННОВАЦИЯМ

The owner-managed SIEMAG TECBERG group provides knowledge-based services for the supply of individual machines and systems for a variety of industrial applications.SIEMAG TECBERG group builds systems for underground mines based on know-how gained from the successful completion of more than 200 complete systems and more than 1,000 winding machines.

The great wealth of experience gained in numerous installation and service operations on the most varied systems around the world sets the pace for the continuous further-development of our staff's knowledge base. As an independent systems integrator for shaft control systems, we offer our customers comprehensive complete-system expertise. Our own automation technology has developed into a strategic innovation driver at the SIEMAG TECBERG group.

Высокое качество и экономическая рентабельность заложены в основу концепции деятельности ведущего в мире поставщика комплексных систем и оборудования для шахтного подъема SIEMAG TECBERG.

Фото 1- Головной офис SIEMAG TECBERG

История SIEMAG TECBERG уходит корнями в 1871 год. В 2007 году отделившись и став самостоятельной компанией с штаб-квартирой в Хайгере (на севере от Франкфурта), прочно закрепила лидерские позиции с сетью имеющихся уже дочерних компаний во всех ведущих горнодобывающих регионах мира. Сегодня SIEMAG TECBERG group является одним из ведущих производителей в области горношахтного подъемного оборудования со своим именем, в солидном «арсенале» которого насчитывается разработка более 200 полных комплексов и более 1000 подъемных систем для шахт, транспортных машин и промышленных установок, а также систем охлаждения воздуха в шахтах и туннелях.Следует отметить, что слагаемые успеха SIEMAG TECBERG изначально заложены в его корпоративной философии, согласно которой высокие стандарты заданы на всей технологической цепочке – от проведения проектно-конструкторских работ, изготовления продукции по индивидуальному заказу до ее реализации и технического обслуживания. Все технологические процессы

осуществляются по сертифицированной системе менеджмента качества, в соответствии со стандартами DIN EN ISO 9001:2008. Концепция послепродажного обслуживания заключается в предоставлении широкого спектра запасных частей, технического обслуживания и гарантирует максимальную надежность, качество исполнения и эксплуатационную готовность поставленного оборудования и установок. В числе производимых компанией SIEMAG TECBERG типов подъемных машин большим спросом на мировом рынке пользуются одно- и двух барабаные модели, подъемные машины системы Блейр (Blair -см.фото2.) - и Кёпе (Koepe) как в стандартном, так башенного исполнения. Подъемные машины Кёпе (Koepe) также изготавливаются с внутренним двигателем, причем две такие машины уже эксплуатируются российской горнодобывающей компанией «Норильский никель».

Фото 2 – Двухбарабанная подъемная машина системы Блейр (Blair)

Двухбарабанная подъемная машина системы Блейр (Blair) была изготовлена SIEMAGTECBERG для SouthDeepColdMines (Вестонария/ЮАР) и является одной из самых больших подъемных машин в мире. Технические данные: Мощность привода -2 х 13.000 кВт; Диаметр барабана-7,1 метр; Высота подъема - 3000 метров.

За прошедшие годы SIEMAGTECBERG поставил подъемное оборудование приблизительно для 10 проектов Норильского Никеля.Кроме того, компания «Норильский никель» планирует осуществлять добычу руды на более глубоких горизонтах, в связи с чем ее представители в недавнем времени обратилась к SIEMAG TECBERG с запросом о поставке системы шахтного подъема, которая, по имеющейся у нас информации, будет являться самой глубокой в России. Помимо того, что глубина ствола здесь составляет более 2 км, SIEMAG TECBERG в рамках данного проекта будет поставлять полную систему шахтного подъема с определенной годовой производительностью по добыче, а не просто отдельные компоненты. Проект СКС-1 увеличит глубину в отличие от других существующих подъемных установок в России, приблизительно на 500 м. В проекте будут использоваться два типа подъемных машин, подъемная машина системы Кёпе (Koepe) для обслуживания и двухбарабанная подъемная машина системы Блейр (Blair) для производства. Данный проект СКС-1 «Норильский никель», по мнению экспертов, уже может быть признан важным достижением в области шахтного подъема, а подтверждением нового слова в горнодобывающей отрасли стало проектирование системы Koepe, которая будет транспортировать на 2 км за один подъем.

Компания SIEMAG TECBERG GmbH в течение многих лет сотрудничает и с российской горнодобывающей компанией «Уралкалий», одним из ведущих мировых

производителей и экспортеров ценного сырья. За годы партнерства SIEMAG TECBERG доставила и установила для «Уралкалий» в районе Березников пять двухбарабанных подъемных машин диаметром 5 м, которые используются для транспортировки калийного сырья и перевозки людей. Были установлены также канатные шкивы диаметром 6 м, скиповые подъемники, с полезным грузом 30 т и канатные подвесы для БКПРУ 2 и БКПРУ 4. Также была осуществлена поставка 5 подъемных машин на Усть-Яйвинский рудник.

Клиентами SIEMAG TECBERG также являются такие горнодобывающие компании как АО«АЛРОСА» и ПАО «Акрон».

Сотни успешно реализованных по всему миру проектов, сопровождаемые положительными рекомендациями заказчиков из самых разных стран, становятся главным аргументом в пользу SIEMAG TECBERG.

SIEMAG TECBERG GmbH
TECBERG park 28, 35708 Haiger / Germany
Phone: +49 2773 9161-0, Fax: +49 2773 9161-300
E-Mail: info@siemag-tecberg.com
www.siemag-tecberg.com

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ..... 3
АЛЕКСЕЕВА Л.Б.
УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГОЙ СРЕДЫ ЗОНЫ ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОВОДА..... 4
ВАЖЕНИН А.Ю.
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА СТАНКАХ С ЧПУ..... 7
ВАСИЛЬКОВ Д.В., АЛЕКСАНДРОВ А.С., ГОЛИКОВА В.В., КОЧИНА Т.Б.
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТРИЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОГО ТИПА..... 10
ВАСИЛЬКОВ Д.В., ЧЕРДАКОВА В.С.
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИИ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ТОЧЕНИЕМ..... 15
ВЕСЕЛОВСКИЙ А.П., ГРАЧЕВ С.Ю., ЗВЕРЕВ С.Г.
ПОДЖИГ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА В ВЧИ-ПЛАЗМОТРОНЕ..... 20
ГЛАДУШЕВСКИЙ И.С., ЕВТЮКОВ С.С.
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗАМЕДЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ КАТЕГОРИИ M_1, УЧИТЫВАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС..... 24
ГОРШКОВ И.В., ПОПОВ М.А.
СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ, КАК ФАКТОР, ВЛИЯЮЩИЙ НА КАЧЕСТВО МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ..... 29
ЕРШОВ Д.Ю., ЗЛОТНИКОВ Е.Г.
ПЕРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС ПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО УГЛОВОЙ СКОРОСТИ В РЕЖИМЕ РАЗБЕГА..... 34
ЕФИМОВ А.Е., МАКСАРОВ В.В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЭТАПЕ РАСТАЧИВАНИЯ СВАРНОЙ РАЗНОРОДНОЙ КОНСТРУКЦИИ ИНСТРУМЕНТОМ С РЕГУЛИРУЕМЫМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ..... 39
ЖАВНЕР В.Л., ЖАВНЕР М.В., ЧЖАО ВЭНЬ, БЕЛОГУР В.П.
МЕХАТРОННЫЕ ПРУЖИННЫЕ ПРИВОДЫ ДЛЯ НЕФТЯНЫХ КАЧАЛОК..... 43
ЗЛОТНИКОВ Е.Г., ЕРШОВ Д.Ю.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РЕЖИМЕ РАЗБЕГА..... 48
КЕКСИН А.И.
АЛГОРИТМ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ФУНКЦИОНАЛЬНО РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ ИЗДЕЛИЯ..... 53
КРАСНЫЙ В.А.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ МАСЛОСЪЕМНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ С ПИРОЛИТИЧЕСКИМ КАРБИДОХРОМОВЫМ ПОКРЫТИЕМ..... 58
ЛАРИОНОВА Т.А., ЛЮБОМУДРОВ С.А., ЛАРИОНОВ Е.О.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ТОЧЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ41..... 63
ЛЮБИЧ В.К., КУРМАШЕВ А.Д., ФРОЛОВ В.Я.
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ, МИНИМИЗИРУЮЩИХ КОНТУРНУЮ ОШИБКУ ЧПУ СТАНКА ИСПОЛЬЗУЯ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ..... 68

МАКСАРОВ В.В., ОЛЬТ Ю.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕНИЯ В НАПРАВЛЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАНИЧНОГО СЛОЯ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА..... 73
МАЦКО О.Н., ВОЛКОВ Н.А., КОРНИЛОВА А.А., ПОДКОЛЬЗИНА Л.В.
СТАТИЧЕСКОЕ УРАВНОВЕШИВАНИЕ И ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ..... 80
МЕДУНЕЦКИЙ В.М., ЗИНКОВ В.А
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОНУСООБРАЗНЫХ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 85
МИХАЙЛОВ А.Б., ТРЕТЬЯКОВ С.Д., АНДРЕЕВ Ю.С., АУНГ ТХИН КО
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ПЛАТФОРМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ..... 88
МИХАЙЛОВ С.В., КОВЕЛЕНОВ Н.Ю., МИХАЙЛОВ А.С.
ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ..... 92
НАЗАРОВА М.Н., КОРОБКОВ Г.Е.
ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ НА РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ…… 97
НАЗАРОВА М.Н., КОРОБКОВ Г.Е.
ФОРМИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ФАКТОРОВ…….. 100
НИКОЛАЕВ А.Д.
ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТИ СТЕНОК КОРПУСА ЛАЗЕРНОЙ ГОЛОВКИ ВСАЕ-СИСТЕМЕ..... 103
ПОМПЕЕВ К.П ., ТИМОФЕЕВ Д.Ю., ХАЛИМОНЕНКО А.Д.
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАЗМЕРНО-ТОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАЛОВ..... 108
ПЬЯЕ П.А., ВАСИЛЬЕВ О.С.
АНАЛИЗ И МОДИФИКАЦИЯ ТОПОЛОГИИ КОРПУСА ЛАЗЕРНОЙ ГОЛОВКИ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АДДИТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ..... 114
САФРАЙДЕР А.И., НАЗАРОВА М.Н., ХАФИЗОВ А.Р.
МОДИФИКАЦИЯ ЛЕГКОСПЛАВНЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ ДЛЯ БУРЕНИЯ В ОСЛОЖНЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ…….. 119
ХРУСТАЛЕВА И.Н., ЛЮБОМУДРОВ С.А., ЧЕРНЫХ Л.Г., ЛАРИОНОВА Т.А.
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЕДИНИЧНЫХ И МЕЛКОСЕРИЙНЫХ ПРОИЗВОДСТВ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ..... 123
ЧУКИЧЕВ А.В., ТИМОФЕЕВА О.С., ЯБЛОЧНИКОВ Е.И.
ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАЛЫХ СЕРИЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 127
ШТРЕКЕР Д.С., ПОПОВ А.Н., РЕШЕТОВ Д.В., УТКИН Г.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ФОРМИРОВАТЕЛЯ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА НА ПАРАМЕТРЫ УДАРА..... 132
ЯМНИКОВ А.С., РОДИОНОВА Е.Н., МАТВЕЕВ И.А.
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СБОРКИ ПРОТЯЖЕННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОРПУСОВ..... 136

СЕКЦИЯ 2. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ..... 141
АВРАМОВ Д.В., МАРТЫНОВ Н.В., ДОБРОМИРОВ В.Н.
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАСКРЫТИЯ МИНЕРАЛОВ..... 142
БЛАНК Е.Д., АЛЕКСАНДРОВ Н.В., ШАРАПОВ М.Г., ШАРАПОВА Д.М.
РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ТИПА АБ2..... 148
БОРИСОВА Л.Г.
ПРОИЗВОДСТВО КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 152
ВАСИНКИНА Е.Ю., КАДЫКОВА Ю.А., КАЛГАНОВА С.Г., АРЗАМАСЦЕВ С.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРНОЙ БАЗАЛЬТОВОЙ ПОРОДЫ ДЛЯ НАПОЛНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 154
ВИНТЕР Э.Р., ТИМОФЕЕВ В.Н., ПЕРВУХИН М.В.
ТЕХНОЛОГИЯ И УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНДУКЦИОННОГО РАФИНИРОВАНИЯ РАСПЛАВА В ЛИТЕЙНОМ ЖЕЛОБЕ..... 158
ГАНЗУЛЕНКО О.Ю., ПЕТКОВА А.П.
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АПРОБАЦИЯ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ..... 163
ГАРАНИКОВ В.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПО ПЛОСКИМ ТРАЕКТОРИЯМ ПЕРЕМЕННОЙ КРИВИЗНЫ..... 168
ЕФИМОВ С.В., ЦУКАНОВ В.В., СМИРНОВА Д.Л.
ФАЗОВЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ ШТАМПОВЫХ СТАЛЯХ..... 171
ЕФИМОВ С.В., ЦУКАНОВ В.В., СМИРНОВА Д.Л.
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА (860 И 1200 °С) НА КИНЕТИКУ ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА В ШТАМПОВОЙ СТАЛИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ..... 176
ЗАМОЗДРА М.Ю., ЦЕМЕНКО В.Н., ГАНИН С.В., ТРОЦКИЙ М.В.
ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРЯЧЕЭКСТРУДИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ДИСПЕРСНО УПРОЧЕННЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДАМИ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ..... 179
ЗАХАРЕНКО Е.А, РОМАНОВ В.В, ОДИНЦОВА Г.В.
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОБАР-КОДА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ..... 183
ИГОШИН С.Д., МАСАЙЛО Д.В., ОРЛОВ А.В., ПОПОВИЧ А.А.
НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЬ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МАРГАНЦА МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ..... 186
КИРОС КАБАСКАНГО В.Э., БАЖИН В.Ю.
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОКСИДА НИКЕЛЯ В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ CO / CO_2 В ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ..... 192
КОВАЛЕВ С.М., ПАВИЛАЙНЕН Г.В.
ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ЛЬДА НА ИЗГИБ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ОПОР ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ..... 195
КОНЧУС Д.А., СИВЕНКОВ А.В.
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА..... 199

ЛАРИН С.Н., КОРОТКОВ В.А., ИСАЕВА А.Н., ПАСЫНКОВ А.А.
ВЫДАВЛИВАНИЕ ПРУТКОВОЙ ЗАГОТОВКИ В МАТРИЦУ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ С АКТИВНЫМ ТРЕНИЕМ……. 203
ЛЮБОМУДРОВ С.А., МИРГОРОДСКИЙ Л., ШИРИПА О.Ю., МИРГОРОДСКИЙ С.И.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СЕДЛА ШИБЕРНОЙ ЗАДВИЖКИ НЕФТЕПРОВОДА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ДЛЯ РАБОТЫ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ..... 210
МИХАЙЛОВ А.В., ПРЯХИН Е.И., СИВЕНКОВ А.В.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НИКЕЛЕМ ИЗ СРЕДЫ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ..... 215
ПАСЫНКОВ А.А., ЛАРИН С.Н.
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОБРАТНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ…… 219
ПЕРЕГУДОВ А.А., ВОЛОГЖАНИНА С.А., ИГОЛКИН А.Ф.
ВЛИЯНИЕ ВИДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ СТАЛИ 45ХН2МФА..... 228
ПИИРАЙНЕН В.Ю., ДЕНИСОВ В.М., ТИМОФЕЕВ А.В.
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ И СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КРАЙНЕГО СЕВЕРА..... 233
ПРЯХИН Е.И., ЦУКАНОВ Д.В., СМИРНОВА Д.Л.
АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ПОКОВОК ИЗ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫХ МАРОК СТАЛИ В ХОДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАКАЛКИ ЗАГОТОВОК БОЛЬШИХ СЕЧЕНИЙ..... 239
ПРЯХИН Е.И., ЦУКАНОВ Д.В., СМИРНОВА Д.Л.
КИНЕТИКА ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕЖИМА ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЗАКАЛКЕ..... 242
ПРЯХИН Е.И., ЦУКАНОВ Д.В., СМИРНОВА Д.Л.
ОЦЕНКА УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЗАКАЛКЕ ЗАГОТОВОК БОЛЬШИХ СЕЧЕНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕХНОЛОГИИ ОХЛАЖДЕНИЯ..... 245
РОМАНОВ В.В., ОДИНЦОВА Г.В., ЗАХАРЕНКО Е.А., МОСКВИН М.К.
ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ МЕТКИ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ЦЕЛЬЮ ЗАЩИТЫ ОТ ПОДДЕЛОК..... 248
СЕРДЮК Н.А., МИХАЙЛОВ А.В., ШАРАФУТДИНОВА Г.Р., ПРЯХИН Е.И., СИВЕНКОВ А.В.
АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ИЗ ЛЕГКОПЛАВКИХ РАСПЛАВОВ..... 253
СТЕЛЬМАХ С.А., ХОЛОДНЯК М.Г., ЩЕРБАНЬ Е.М., НАЖУЕВ М.П.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗВЕСТНЯКОВ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ИХ ДОБЫЧЕ И ПРИМЕНЕНИИ..... 256
ТЕПЛУХИН В.Г.,КОЗАРЬ И.И., ТРЕТЬЯКОВ В.П.
О ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ СТАЛИ 95Х18 ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ДЕТАЛЯХ ГОРНОГО И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ..... 260
ФЕДИН М.А., КУВАЛДИН А.Б., КУЛЕШОВ А.О., КОНДРАШОВ С.С.
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПЛАВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ..... 264

ФЕДИН М.А., КУВАЛДИН А.Б., КУЛЕШОВ А.О., КУЗОВЛЕВ И.В., КОНДРАШОВ С.С.
РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ СИНТЕЗА НИТРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 269
ШАРАПОВА Д.М., САМОДУРОВ И.О.
ПРОБЛЕМЫ СВАРИВАЕМОСТИ НОВЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ АЗОТА..... 273
ЩЕРБАНЬ Е.М., СТЕЛЬМАХ С.А., СЫСОЕВ А.К., ЧЕРНИЛЬНИК А.А.
ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА КАК КОНГЛОМЕРАТА И СВОЙСТВ ЕГО КОМПОНЕНТОВ..... 279

СЕКЦИЯ 3. ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ..... 284
БОЛОБОВ В.И., АХМЕРОВ Э.В., ПЛАЩИНСКИЙ В.А., КРИВОКРЫСЕНКО Е.А., БОЧКОВ В.С.
ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ, КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ УДАРНО-АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ БЫСТРОИЗНАШИВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНОРУДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ..... 285
БОЛЬШУНОВА О.М., ВАТЛИНА А.М., КОРЖЕВ А.А.
СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН..... 288
ВАГАПОВА Э.А., ХУДЯКОВА И.Н., ИВАНОВА П.В., ИВАНОВ С.Л.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ В РАБОЧИХ ОРГАНАХ ГОРНЫХ МАШИН..... 290
ГАБОВ В.В., ЗАДКОВ Д.А., СТЕБНЕВ А.В.
РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ АО «СУЭК-КУЗБАСС»..... 297
ГОРЕЛИКОВ В.Г., ЛЫКОВ Ю.В., УСПЕХОВ А.М.
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СЪЕМНЫХ КОЛОНКОВЫХ СНАРЯДОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В МОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ..... 304
ЕЛИХИН А.С., ЗАДКОВ Д.А., ГАБОВ В.В.
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОУДАРНИКОВ В СОСТАВЕ УНИФИЦИРОВАННОГО ВЫЕМОЧНОГО МОДУЛЯ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К НЕМУ..... 308
ЗЮЗИН Б.Ф., ЖИГУЛЬСКАЯ А.И., ЯКОНОВСКАЯ Т.Б., МИХАЙЛОВ А.В.
ИНВАРИАНТЫ ДИСТОРТНОСТИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД..... 313
ЗЮЗИН Б.Ф., ЖИГУЛЬСКАЯ А.И., ЯКОНОВСКАЯ Т.Б., МИХАЙЛОВ А.В.
ЭНТРОПИЯ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ..... 317
ИВАНОВА П.В., КУВШИНКИН С.Ю.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭКСКАВАТОРА ПРИ ДОБЫЧЕ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ..... 321
КАЗАКОВ Ю.А.
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МНОГОКРАТНОЙ ПРОХОДИМОСТИ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО АГРЕГАТА ПО СЛАБЫМ ОСНОВАНИЯМ НА МАССУ ПЕРЕВОЗИМОГО СЫРЬЯ..... 324

КОПТЕВ В.Ю., КОПТЕВА А.В., АЛЕКСАНДРОВ В.И.
НАПРАВЛЕНИЯ В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН ДЛЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ 327
КОРНИЛЬЕВ Е.О.
ПРИМЕНЕНИЕ РАЗБРАСЫВАТЕЛЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОРФЯНОГО РАССТИЛА 330
КОРНИЛЬЕВ Е.О., ЖИГУЛЬСКАЯ А.И., МИХАЙЛОВ А.В.
ВИБРАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СЕПАРАЦИЮ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ 333
КУВШИНКИН С.Ю., ИВАНОВА П.В.
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА НА РЕСУРС МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА 335
КУЗНЕЦОВ Н.К., ИОВ И.А., ИОВ А.А.
СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ГОРНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ 338
КУЗНЕЦОВ Д.В., КОСОЛАПОВ А.И.
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ 344
ЛАГЕРЕВ И.А, ЛАГЕРЕВ А.В., ТАРИЧКО В.И.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАБОТЕ МОБИЛЬНОГО ГРУЗОВОГО КАНАТНОГО КОМПЛЕКСА 349
МАКЕНОВА А., ОМУРАЛИЕВ У.К.
АНАЛИЗ БИЗНЕС ПРОЦЕССОВ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗИФ 354
МЕШКОВСКИЙ Е.О., ФРОЛОВ В.Я., КУРМАШЕВ А.Д.
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЧЕТЫРЁХКОЛЁСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА 360
МИХАЙЛОВ А.В., БРИГЕН Х.
АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ВЫЕМОЧНОГО ТОРФЯНОГО КОВШОВОГО БУРА 367
МУСТЕЙКИС А.И., ЛЕВИХИН А.А.
КОНВЕРСИЯ ДОСТИЖЕНИЙ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ОБРАЗЦОВ БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ 370
МУСТЕЙКИС А.И., ЛЕВИХИН А.А., АНИСТРАТОВ К.Ю.
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОГО БУРЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД 376
НГУЕН ВАН СО, НГУЕН КХАК ЛИНЬ
АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОГРУЗКИ УГЛЯ НА КОНВЕЙЕР ШНЕКОВЫМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ 381
САФРОНЧУК К.А., КНЯЗЬКИНА В.И., ИВАНОВ С.Л.
ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА МАСЛЯНОГО НАСОСА С ЗУБЧАТО-ЭКСЦЕНТРИКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ДВИЖЕНИЯ 386
СЕРЖАН С.Л., МАЛЕВАННЫЙ Д.В.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ ГЛУБОКОВОДНОГО ДОБЫЧНОГО КОМПЛЕКСА С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ КАПСУЛОЙ В УСЛОВИЯХ РРР-ЖМК 392

УРАЗБАХТИН Р.Ю., ЮНГМЕЙСТЕР Д.А., ЯЧЕЙКИН А.И.
ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫРАБОТОК МАЛОГО СЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ..... 397
ШИБАНОВ Д.А.,ИВАНОВ С.Л., ШИШКИН П.В.
ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МОДЕЛИРОВАНИИ И ПРОЕКТИРОВАНИИ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ..... 401
ШИШКИН Е.В., КАЗАКОВ С.В.
ВЛИЯНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ДИНАМИКУ ВИБРОКОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ..... 407
ЮНГМЕЙСТЕР Д.А., КОРОЛЕВ Р.И., БОРОДКИН Э.О., ИВАНОВСКИЙ С.Л.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДОБЫЧИ КОБАЛЬТО-МАРГАНЦЕВЫХ КОРОК..... 410
ЮНГМЕЙСТЕР Д.А., УРАЗБАХТИН Р.Ю., ЯЧЕЙКИН А.И.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РОТОРНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКИХ ЩИТОВ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАЗРУШЕНИЯ СЛОЖНОСРУКТУРИРОВАННОГО ЗАБОЙНОГО МАССИВА..... 415
ЯКОНОВСКАЯ Т.Б., ЖИГУЛЬСКАЯ А.И.
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОРФОДОБЫВАЮЩИХ МАШИН..... 419
ЯКОНОВСКАЯ Т.Б., ЖИГУЛЬСКАЯ А.И., ОГАНЕСЯН А.С.
ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИИ ТОРФЯНЫХ МАШИН НА КАЧЕСТВО ИХ РАБОТЫ..... 422
ЯКУПОВ Д.Р., ИВАНОВ С.Л., ИВАНОВА П.В., ПЕРМЯКОВА Е.К.
МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСОВ ДОБЫЧИ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ..... 425

СЕКЦИЯ 4. ЭЛЕКТРО- ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА..... 432
АБДАЛЛА ВАЭЛЬ, АБРАМОВИЧ Б.Н., УСТИНОВ Д.А.
РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ВИДЕ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ..... 433
АБРАМОВИЧ Б.Н., БОГДАНОВ И.А., ТОКАРЕВ И.С.
ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД В ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ..... 438
БАБУРИН С.В., ТУРЫШЕВА А.В., КОВАЛЬЧУК М.С.
ВЫБОР СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ..... 442
БАКИРОВ Ф.Г., ИБРАГИМОВ Е.С., КАГАРМАНОВА А.А.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ ПОСЛЕ ЕЁ НАДСТРОЙКИ ГАЗОВЫМИ ТУРБИНАМИ ТИПА АЛ-31 СТЭ И 6FA..... 447
БАРДАНОВ А.И., ПУДКОВА Т.В., ВАСИЛЬКОВ О.С.
АНАЛИЗ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ..... 452
БЕЛЬСКИЙ А.А., ГЛУХАНИЧ Д.Ю., ДОБУШ В.С.
АВТОНОМНОЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК НЕФТИ..... 457

БЕЛЬСКИЙ Р.А.
РАБОТА ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА, ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ОТКЛЮЧЕНИИ НЕЗАВИСИМЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ..... 463
БЫСТРОВ А.В., ФРОЛОВ В.Я.
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНО-КОАКСИАЛЬНОГО ПЛАЗМОТРОНА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ..... 467
ВОЛКОВ А.Н., ИЛЬИНЫХ И.В., КОРНИЛОВА А.А., МАЦКО О.Н., СЕРИКОВА Е.А.
ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ РОБОТА..... 473
ВОСТРОВ К.И., МУРАШОВ Ю.В.
РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ ШИМ-СИГНАЛА..... 477
ВОСТРОВ К.И.
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА СЕРДЕЧНИКА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТОКООГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОКООГРАНИЧЕНИЯ..... 480
ГАРИПОВ Б.И., УСТИНОВ Д.А.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДА..... 484
ГЛАДЫШЕВ В.Е, СИНЮКОВ А.В., СИНЮКОВА Т.В
МОДЕРНИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКИПОВЫМ ПОДЪЕМНИКОМ..... 489
ГЕРРА Д.Д., ЯКОВЛЕВА Э.В.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КУБА..... 494
ДАВЫДОВСКАЯ К.С., ЛЕБЕДЕВ А.А., КОЗЛОВСКИЙ В.В.
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ И НИТРИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ..... 497
ДЕРЕВЯНКИН П.Г., ФРОЛОВ В.Я.
АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ГОРЕНИИ ДУГИ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕДНО-ГРАФИТОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ..... 501
ЗАМЯТИНА Е.Н., ЗАМЯТИН Е.О., ШКЛЯРСКИЙ Я.Э.
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА..... 505
КАГАН А.В.
ЭВОЛЮЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН..... 510
КАДЫРОВ А.А., ЮШИН Б.А., ФРОЛОВ В.Я.
РАЗРАБОТКА ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ..... 512
КВАШНИН А., МУРАШОВ Ю., ФРОЛОВ В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ 517
КОСТИН В.Н., СЕРИКОВ В.А.
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ..... 521

КЛЮЧЕРЕВ Н.А., РАСТВОРОВА И.И.
МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО СТАНКА С ЧПУ..... 525
КОТЕЛЕВА Н.И., ЖУКОВСКИЙ Ю.Л.
ТЕХНОЛОГИЯ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ И АНАЛИТИКИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ..... 528
КРЫЛЬЦОВ С.Б., СОЛОВЬЁВ С.В., КОРОБИЦЫНА М.А.
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ
СРЕДНЕГО УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ 533
ЛАВРИК А.Ю., БУЛДЫСКО А.Д., ЖУКОВСКИЙ Ю.Л.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УПРАВЛЕНИИ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЭНЕРГОСИСТЕМ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ..... 537
ЛАНЦЕВ Д.Ю.
РЕАЛИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННОЙ ЦИФРОВОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА КОНТРОЛЛЕ РАХПРИСОЕДИНЕНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ..... 542
ЛЕБЕДЕВ В.А., КАРАБУТА В.С.
РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ПОДГОТОВКИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ..... 547
ЛЕ ВАН ТУНГ
ПРЯМОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С МЕТОДОМ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ..... 552
МАЛАРЕВ В.И., КОПТЕВА А.В., ГОЦУЛ Ю.Д.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТОВ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ С ПОМОЩЬЮ СКВАЖИННЫХ ЭЛЕКТРОПАРОГЕНЕРАТОРОВ..... 557
МАЛЬКОВА Я.М., ВАСИЛЬЕВ Б.Ю.
РАЗРАОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЬНОГО МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В СОСТАВЕ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ..... 561
МИНАКОВА Т. Е., ШИШКИН С.И.
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА..... 567
НЕПША Ф.С., ВОРОНИН В.А.
К ВОПРОСУ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ..... 573
ПЕЛЕНЕВ Д.Н., АБРАМОВИЧ Б.Н., БАБЫРЬ К.В.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ..... 578
ПТИЦЫН Д.В., ПТИЦЫНА Е.В., КУВАЛДИН А.Б.
ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕМНЫХ И СВЕТЛЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРИ ПИТАНИИ ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ..... 583

САФОНОВ Е.П., ФРОЛОВ В.Я.
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА УСЛОВИЯ ОТКЛЮЧЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ГЕНЕРАТОРНЫМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ..... 587
СДВИЖКОВ А.В., СИНЮКОВ А.В., СИНЮКОВА Т.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕКТОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ КОНВЕЙЕРА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА..... 593
СЕМЕНЮК А.В., ЖУКОВСКИЙ Ю.Л.
РОЛЬ ПЛАТФОРМЕННЫХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ «ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ» В УПРАВЛЕНИИ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ..... 598
СКАМЬИН А.Н., РАСТВОРОВА Ю.В.
АЛГОРИТМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК..... 603
СМИРНОВ А.И., ИВАНЧЕНКО Д.И., ВОЙТЮК И.Н.
ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТОКОВУЮ ЗАЩИТУ ЭЛЕКТРОСЕТИ…. 607
СТАРШАЯ В.В., БЕЛЬСКИЙ А.А., ДОБУШ В.С.
УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ БОРЬБЫ С ПАРАФИНОВЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ В НЕФТЯНЫХ СКВАЖИНАХ..... 610
УСТИНОВ Д.А., АБРАМОВИЧ Б.Н., АБДАЛЛА В.
ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПИТАНИЯ С НАГРУЗКОЙ СОИЗМЕРИМОЙ МОЩНОСТИ..... 615
ХАЦАЮК М.Ю., СИЗГАНОВ Н.В.
РЕЗОНАНС СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ..... 620
ХОМЯКОВ К.А., **УСТИНОВ Д.А**.
КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА..... 623
ЦЕНЕВ А.Н., КОРОБКОВ Г.Е., НОСОВ В.В.
ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВОК КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ…….. 627
ЧЕРВОНЧЕНКО С.С., ФРОЛОВ В.Я.
АНАЛИЗ ПРОВАЛА НАПРЯЖЕНИЯ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ, ПОДКЛЮЧЕННОЙ К ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕТИ..... 630
ЧЕРЕНКОВ В.А., ИВАНОВ Д.В., ФРОЛОВ В.Я., ОНЕПАВИНА МАЛАВАНХ
ПОВЫШЕНИЕ ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВДК 10 КВ В СРАВНЕНИИ СОБСТВЕННОГО АКСИАЛЬНОГО И РАДИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ..... 635
ЧМИЛЕНКО Ф.В., ЕРМЕКОВА М.Р., РАСТВОРОВА И.И., КЛЮЧЕРЕВ Н.А.
ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА «ПОЛОСАТОГО НАГРЕВА» ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ ВБЛИЗИ ТОЧКИ КЮРИ..... 641
ШАБАНОВ Д.В., КОЗЛОВИЧ А.В., ВАЛИЕВ Р.Р., КОЧНЕВА О.В.
МАНЕВРИРОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ КОЛЕСНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ. КРИТЕРИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ В РАМКАХ ЗАДАЧИ СЛЕДОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ (TRAJECTORY TRACKING)..... 646

ШКЛЯРСКИЙ А.Я., ЛУТОНИН А.С.
ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВСТРОЕННЫМИ В РОТОР ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ..... 650
ШКЛЯРСКИЙ Я.Э., БАТУЕВА Д.Е.
АНАЛИЗ ГРАФИКОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ВЫБОРА СОСТАВА ГЕНЕРАЦИИ В ВЕТРОДИЗЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ..... 655
ШПЕНСТ В.А.
КОМПЛЕКСНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ШАХТЫ (ПОДЗЕМНОГО СООРУЖЕНИЯ) НА ОСНОВЕ PLC ТЕХНОЛОГИИ..... 659

СЕКЦИЯ 5. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ, МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, ОЦЕНКА КАЧЕСТВА…….. 663
БОРИСОВ С.В., ВЫБОЛДИН Ю.К.
МЕТОДИКА ВЫБОРА МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО ПОДПОВЕРХНОСТНОГО РАДАРА……... 664
БУРЫЛОВ Д.А., БУЛГАКОВ В.А.
КОНТРОЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ ЛИНИЙ УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ЛИНИЙ УДАЛЁННЫХ ОБЪЕКТОВ…….. 668
ВЕСЕЛОВСКИЙ А.П., КОСАРЕВА Л.И., ЗВЕРЕВ С.Г.
ЛИНЕЙНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ DC-DC ТИПА..... 672
ВОЛКОДАЕВА М.В., ВОЛОДИНА Я.А., КУЗНЕЦОВ В.А.
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОБООТБОРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА..... 679
ВОЛКОДАЕВА М.В., ТАРАНИНА О.А.
КОНТРОЛЬ ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСАХ..... 683
ЗАВЬЯЛОВ В.С., МАЛЬЦЕВА Н.К., ФЕДОСОВСКИЙ М.Е., БОЛДЫРЕВ И.П., ШАРШОВ А.Г., ДЕГТЯРЕВ В.В.
НОРМИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЬБЫ РОЛИКОВИНТОВОЙ ПЕРЕДАЧИ..... 687
МАХМУДОВ Х.Ф.
ОБОСНОВАНИЯ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ЭМИССИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ..... 693
МАХМУДОВ Х.Ф., НОСОВ В.В.
МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД..... 700
МАХМУДОВ Х.Ф., ЩЕРБАКОВ И.П.
МЕТОД ФРАКТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И НАНОСЕКУНДНАЯ ДИНАМИКА ИМПУЛЬСОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ, ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН..... 707
НОСОВ В.В.
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ..... 713
НОСОВ В.В., АРТЮЩЕНКО А.П.
АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ..... 718

ПЕРЕТЯТКО С.А.
АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ОСНОВЫ МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕНТРАЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ..... 724
ПОТАПОВ А.И., МИХАЙЛОВ А.А., РОГАЧЕВ В.А.
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ СИГНАЛОВ..... 729
СЯСЬКО В.А., УМАНСКИЙ А.С., КОНДРАТЬЕВ А.В., НИКАЗОВ А.А.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ..... 731
ЦЕНЕВ А.Н., КОРОБКОВ Г.Е., НОСОВ В.В.
МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА И ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОРЫВОВ ПРОТЯЖЕННЫХ АНОДНЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ…… 736
ШИХОВ А.И., ПОТАПОВ А.И., ДУНАЕВА Е.Н.
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ БЕТОНЫХ И АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ..... 739
ЩИГИРЕВ Д.Е.
О ВОПРОСАХ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И СРЕДСТВАХ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ГОРНОДОБЫВЮАЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ..... 743

СЕКЦИЯ 6. ТРАНСПОРТ И ЛОГИСТИКА В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ..... 747
АФАНАСЬЕВ А.С., ЕВТЮКОВ С.А., ЧУДАКОВА Н.В.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ЭКСТРЕННОГО ТОРМОЖЕНИЯ АТС КАТЕГОРИИ M_1..... 748
АФАНАСЬЕВ А.С., ЕГОШИН А.М., АЛЕКСЕЕВ С.В.
ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА НА ДОБЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ..... 752
БАЖЕНОВ А.А.
РАСЧЕТ ОБЪЕМА МАТЕРИАЛА НА ЛЕНТЕ КРУТОНАКЛОННОГО КОНВЕЙЕРА..... 757
БЕЛИКОВА Д.Д.
СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ВЕСОГАБАРИТНОГО КОНТРОЛЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ И КРУПНОГАБАРИТНЫХ ГРУЗОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ..... 760
БЕЛЯЕВ А.М., МАКАРОВ В.С., БЕЛЯКОВ В.В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ..... 764
ДИДМАНИДЗЕ О.Н ., АФАНАСЬЕВ А.С., ХАКИМОВ Р.Т.
МЕТАНОВОЕ ЧИСЛО ПРИРОДНОГО ГАЗА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОВОГО ДВС..... 769
ДОБРОМИРОВ В.Н., МАРТЫНОВ Н.В., **АВРАМОВ Д.В.**
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ СТЕКЛА «ТРИПЛЕКС» ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО–ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН..... 775
КАЦУБА Ю.Н., ГРИГОРЬЕВА Л.В.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ..... 780

КОПТЕВ В. Ю., КОПТЕВА А. В., АЛЕКСАНДРОВ В.И.
РЕАЛИЗАЦИИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ КОНЦЕПЦИЙ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ..... 784
ЛОЖКИН В.Н., ЛОЖКИНА О.В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ..... 790
ЛУТОВ Д.А.
АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ОЦЕНКИ ПРОДОЛЬНОЙ РОВНОСТИ ПОКРЫТИЯ, ВЛИЯНИЕ НА КОМФОРТНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ..... 794
МАКАРОВ В.С., БЕЛЯКОВ В.В.
МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СНЕЖНЫХ КАРТ ПОДВИЖНОСТИ..... 799
ПЕГИН П.А., ИЛЬИН А.А., РУНЕВ Е.В.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОСТАТОЧНОСТИ СЕТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ РЕГИОНА..... 804
ПЛОТНИКОВ А.М.
НОВЫЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ОДНОУРОВНЕВЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ..... 808
САФИУЛЛИН Р.Н., АФАНАСЬЕВ А.С.
ПОСТРОЕНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ВЕСОГАБАРИТНОГО КОНТРОЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ РЕШЕНИИ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ДОСТАВКИ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ И КРУПНОГАБАРИТНЫХ ГРУЗОВ..... 813
ЧЕРНЯЕВ И.О., ЕВТЮКОВ С.А.
РЕАЛИЗАЦИЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ РЕЖИМОВ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ..... 818
ПЕТЕР ХЕННИНГ
О ТРАДИЦИЙ - К ИННОВАЦИЯМ 824

И 665 **Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020:** Сборник тезисов / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2020. 869 с. (Международная научно-практическая конференция. 23-24 апреля 2020 г.)

ISBN 978-5-94211-912-6

УДК 620; 621; 622; 656; 681
ББК 39:34-08:3,2

Научное электронное издание

ИННОВАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГОРНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ: IPDME-2020

Международная научно-практическая конференция

23-24 апреля 2020

Сборник тезисов

Статьи публикуются в авторской редакции
Оригинал-макет подготовлен на электромеханическом факультете

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002
Носитель – CD. Объем 123 Мб Подписано в свет 29.06.2020. Заказ 416

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2