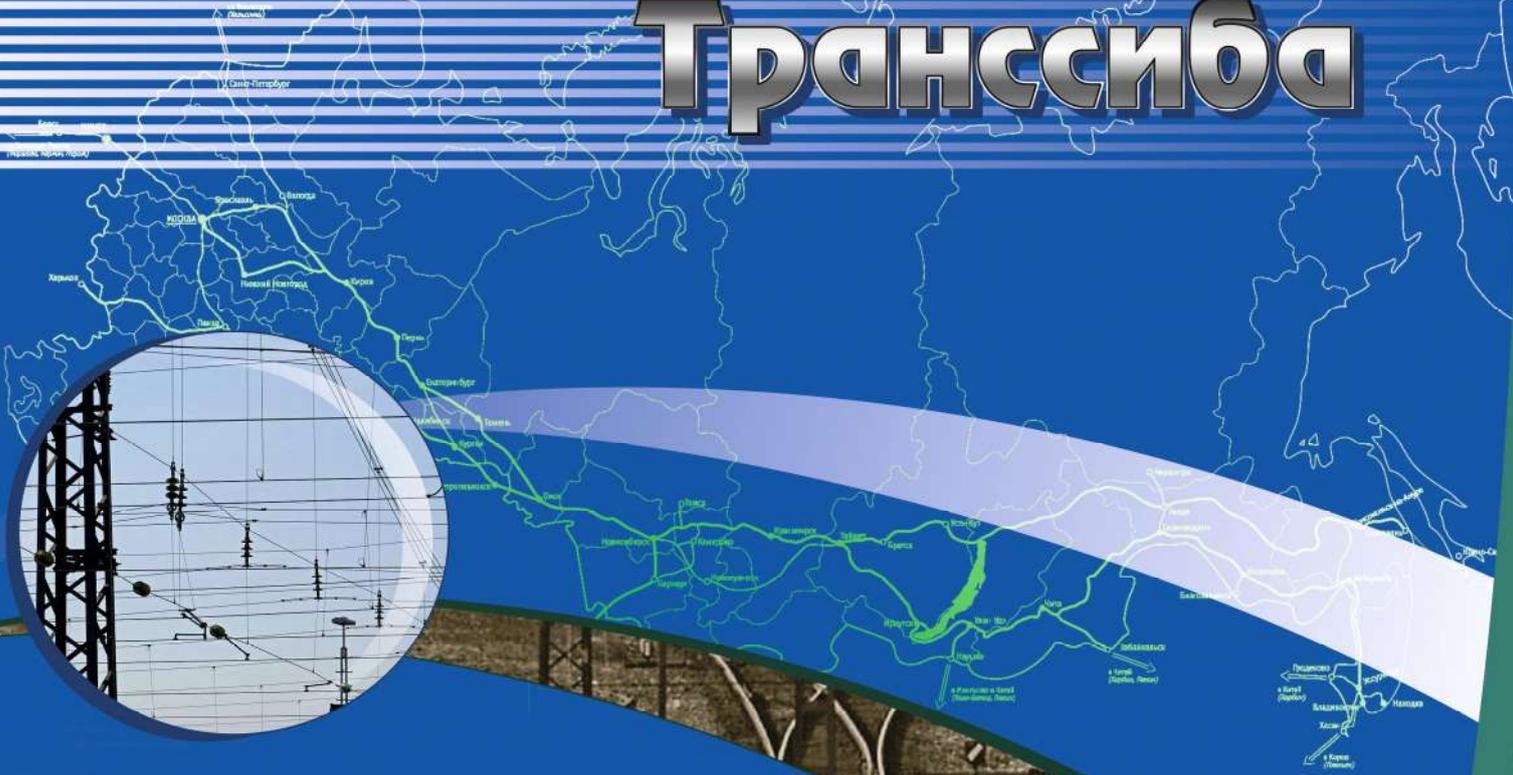


# ИЗВЕСТИЯ

№ 2(42)

2020

# Транссиб



## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
6. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Пльвице, Польша).
7. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
8. Зыкина Анна Владимировна – зав. кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
9. Исаков Александр Леонидович – зав. кафедрой «Исследования, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
10. Каргапольцев Сергей Константинович – ректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
11. Косарев Александр Борисович – первый зам. генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
12. Лю Цзянькунь – доктор, профессор, зам. декана Школы гражданского строительства Университета Сунь Ятсена (Чжухай, Китай).
13. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
14. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
15. Сидоров Олег Алексеевич – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
16. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Подвижной состав» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
17. Файзибаев Шерзод Сабирович – зав. кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» ПТУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
18. Харламов Виктор Васильевич – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор.

## EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. Galiev Ilkham Islamovich – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. Shantarenko Sergey Georgievich – deputy chief editor, vice-rector for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Cherebinsin Vasily Titovich – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
5. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
6. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
7. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
8. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Isakov Alexander Leonidovich – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
10. Kargapolteev Sergey Konstantinovich – rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
11. Kosarev Alexander Borisovich – senior deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
12. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
13. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
14. Paramonov Alexander Mikhailovich – professor of the department «Heat-power» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk).
15. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
16. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Rolling stock» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
17. Fayziybaev Sherzod Sabirovich – head of the department «Wagons and wagon facilities» of ISTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
18. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Иванченко Владимир Иванович – ответственный секретарь, к.т.н. (Омск).

## СОДЕРЖАНИЕ

### Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Филиппов В. М., Сидоров О. А., Миронос Н. В. Совершенствование математической модели изнашивания элементов контактных пар устройств токосъема электрического транспорта при высокоскоростном движении.....2
- Незевак В. Л. Определение мощности и энергоемкости систем накопления электроэнергии для улучшения эксплуатационных показателей тягового электроснабжения.....9
- Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Фомиченко К. И., Запрудский А. А. Исследование процесса коррозии железобетонных опор контактной сети с оценкой параметров прочности.....26
- Грачев Н. В. Анализ мероприятий по повышению энергоэффективности газотурбовозов.....35
- Давыдов Ю. А., Пляскин А. К., Кушнирук А. С. Распознавание дефектов моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотива на основе результатов моделирования искусственной нейронной сети прогнозирования выходных диагностических параметров.....44
- Слатин А. И. Совершенствование методики экспериментального определения жесткости системы подвижных рам однорычажных токоприемников электроподвижного состава.....52

### Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Жигар В. И. Повышение производительности звенооборочной линии КБ03.....60

### Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

- Блинов П. Н., Томиллов В. В. Системный анализ организационно-технических мероприятий по транспортной безопасности на железнодорожных предприятиях.....71

### Совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования

- Слободина Е. Н., Михайлов А. Г. Интенсификация теплообмена в вакуумном котле за счет применения наружного оребрения жаровой трубы.....78

### Электрические станции и электроэнергетические системы

- Архипова О. В., Осипов Д. С., Парамзин А. О. Анализ режимов систем электроснабжения на основе вейвовой обработки потока мгновенных значений напряжений и токов с помощью вейвлет-преобразования.....87
- Якубов М. С., Турдибеков К. Х., Суллиев А. Х. Диагностика твердой изоляции трансформаторов по информационной оценке косвенных показателей.....97
- Шепелев А. О. Разработка алгоритма и метода расчета режима разомкнутой электрической сети напряжением 6-35 кВ с учетом температурной зависимости активных сопротивлений.....103
- Богачков И. М. Оптимизация системы внешнего электроснабжения путем выбора прогрессивного класса напряжения с учетом всего жизненного цикла газового месторождения.....114

### Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Петров К. С., Окишев А. С., Петров В. В. Математическая модель магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе стигматического подхода.....131
- Бычков Е. Д., Лузан Д. С. Использование моделей когнитивных карт для оценки состояний беспроводной сенсорной сети.....141

### Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ))»

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

УДК 621.336.7:620.178.169

**В. М. Филиппов, О. А. Сидоров, Н. В. Миронос**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗНАШИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНЫХ ПАР УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ

***Аннотация.** В статье рассмотрено совершенствование электрической составляющей модели изнашивания элементов контактных пар устройств токосъема в условиях высокоскоростного движения. Приведены гистограммы электрического изнашивания контактных элементов, полученные расчетным путем по существующей и усовершенствованной математическим моделям. Анализ полученных гистограмм позволяет сделать заключение о повышении точности расчета по усовершенствованной математической модели за счет учета влияния аэродинамического воздействия воздушного потока и скорости движения подвижного состава.*

***Ключевые слова:** контактная пара, устройство токосъема, высокоскоростное движение, электроподвижной состав, контактный элемент.*

**Victor M. Philippov, Oleg A. Sidorov, Nikolay V. Myronos**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## IMPROVING THE MATHEMATICAL MODEL OF THE WEAR OF THE ELEMENTS OF CONTACT PAIRS OF ELECTRIC CURRENT COLLECTION DEVICES AT HIGH-SPEED MOVEMENT

***Abstract.** This article discusses the improvement of the electrical component of the wear model of the elements of contact pairs of current collector devices under conditions of high-speed movement. The histograms of the electrical wear of contact elements obtained by calculation using the existing and improved mathematical models are presented. Analysis of the obtained histograms allows us to conclude that the calculation accuracy is improved according to an improved mathematical model by taking into account the influence of the aerodynamic effects of the air flow and the speed of the rolling stock.*

***Keywords:** contact pair, current collector, high-speed movement, electric rolling stock, contact element.*

Долгосрочная программа развития холдинга «Российские железные дороги» [1] предусматривает к 2025 г. комплексную модернизацию инфраструктуры железных дорог с целью создания скоростных и высокоскоростных магистралей для увеличения пассажиро- и грузоперевозок. С учетом существующей энергетической стратегии ОАО «РЖД» энергоемкость компании за 2020 г. должна снизиться относительно 2005 г. на 25 – 27 %, а значит, необходимым остается комплексное внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий.

Для перевозки пассажиров и грузов со скоростями свыше 200 км/ч необходимо осуществить модернизацию конструкции контактной сети, токосъемных устройств, верхнего строения пути. В статье [2] уже отмечалось, что изменение конструкции токосъемного узла электроподвижного состава влечет за собой значительные финансовые и временные издержки. Менее затратным является применение контактных элементов с увеличенным сроком службы, обеспечивающих надежную, экономичную и экологичную передачу электроэнергии подвижному составу.

Важнейшей эксплуатационной характеристикой элементов контактных пар устройств токосъема (УТ), определяющей надежность и экономичность передачи электроэнергии электроподвижному составу, является интенсивность изнашивания. Износ как контактного провода (токопровода), так и контактных вставок (контактных элементов) выше критических значений является недопустимым. Одним из путей повышения срока службы контактных пар является выбор используемых для их изготовления материалов, а также параметров

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

функционирования устройств токосъема, наилучшим образом обеспечивающих выполнение требований качества токосъема и экономии ресурсов.

Интенсивность изнашивания (а следовательно, и качество токосъема) зависит не только от состояния элементов скользящего контакта, но и от множества других факторов (рисунок 1), обусловленных особенностями процесса взаимодействия токоприемников с контактными подвесками (токопроводами). Одним из характерных факторов, оказывающих значительное влияние на износ элементов контактных пар УТ в условиях высокоскоростного движения, является тяговый ток, значение которого может достигать в отдельные моменты времени 3000 – 3500 А, увеличивая (в том числе за счет термического воздействия) электромеханический износ в целом.



Рисунок 1 – Факторы, влияющие на интенсивность изнашивания элементов контактных пар

Сотрудниками лаборатории «Конструкции контактных сетей, линий электропередачи и токосъема» Омского государственного университета путей сообщения разработаны и успешно апробированы программа и методика проведения испытаний элементов контактных пар УТ электрического транспорта на износ [2, 3].

Реализация методики требует наличия специализированных экспериментальных комплексов, а также значительных затрат времени и ресурсов. Для сокращения объема экспериментальных исследований может быть использован комбинированный способ – совокупность необходимого минимума экспериментальных исследований реальных объектов (или их аналогов) и методов расчета, основанных на математическом моделировании процессов, происходящих в контактных парах устройств токосъема.

По причине того, что совокупно токосъемный элемент и токоведущий провод представляет собой узел, который функционирует при высокоскоростном движении в условиях повышенного электромеханического изнашивания, совершенствование математической модели взаимодействия элементов контактной пары осуществляется по двум направлениям [4, 5]:

совершенствование модели механического изнашивания (в зависимости от значения контактного нажатия, рассмотрено в работе [2]) и совершенствование модели электрического изнашивания (от воздействия протекающего через контакт электрического тока).

В рамках выполнения научно-исследовательской работы «Увеличение жизненного цикла контактных вставок токоприемника магистрального электроподвижного состава при высокоскоростном движении», получившей поддержку Совета по грантам Президента Российской Федерации, в данной статье будет рассмотрено совершенствование электрической составляющей модели изнашивания элементов контактных пар в условиях высокоскоростного движения.

Процесс электрического изнашивания элементов контактных пар УТ представляется с помощью функциональной зависимости:

$$I_h = \psi_2(\gamma, Q, s, P, g, I_M, I_{E0}, i), \quad (1)$$

где  $\gamma$  – показатель дугостойкости материала;

$Q$  – количество электричества, определяемое средним значением тока дуги  $I$  и временем ее горения  $t$ ;

$s$  – длина пути трения;

$P$  – значение контактного нажатия;

$g$  – комплекс, характеризующий изменение изнашивания материала вследствие повышения шероховатости поверхностей;

$I_M$  – интенсивность механического изнашивания (без протекания электрического тока);

$I_{E0}$  – интенсивность изнашивания при протекании электрического тока через контакт без искрения;

$i$  – значение протекающего через контакт электрического тока.

Особенностью чисто электрического изнашивания является сложность (а в большинстве случаев – невозможность) получения результатов экспериментальных исследований. Именно поэтому ученый Р. Хольм предложил рассматривать влияние протекающего через контакт электрического тока на износ элементов контактных пар как дополнительный фактор [6], изменяющий механический износ.

Функциональная зависимость (1) уже была представлена в работах [7] в виде математической модели, учитывающей большинство приведенных на рисунке 1 факторов, за исключением тех, что имеют место в условиях высокоскоростного движения. Таким образом, из-за отсутствия учета аэродинамического воздействия воздушного потока и скорости движения электроподвижного состава на процессы, протекающие в электрическом скользящем контакте, результаты расчетов по модели будут не достаточно точными. Так, в условиях невысоких скоростей движения электроподвижного состава (до 60 км/ч) погрешность расчета по отношению к результатам экспериментальных исследований электромеханического изнашивания не превышает 5 %, при скоростях свыше 150 км/ч погрешность становится более 10 %.

Принимая во внимание положения теории подобия и необходимость учета аэродинамического воздействия воздушного потока и скорости движения электроподвижного состава в уравнении (1) можно объединить трудновоспроизводимые параметры в комплексы, а побочные факторы – в симплексы [8]. Тогда в соответствии с  $\pi$ -теоремой и с учетом работ И. В. Крагельского, Э. Д. Брауна [9] и Н. Biesenack [5] получаем следующее уравнение, описывающее процесс электрического изнашивания:

$$I_E = (\zeta_1 \cdot Bi \cdot \xi(\gamma, Q, T_{I_h}) + \zeta_2 \cdot (X_1 \cdot Me)^{k_1} \times \\ \times \left( I_{E0}(P, k_1, k_2) j^{k_3} + \zeta_3 \cdot g(P, X_3, X_4, T_{I_h}, k_4) \sqrt{\frac{Q}{s}} \right)) \times \mathfrak{G}(F_{0i}, \varphi, \kappa), \quad (2)$$

где  $\xi$  – интенсивность электроэрозионного изнашивания;

$\gamma$  – коэффициент дугостойкости материала элемента контактной пары;

$Q$  – количество электричества, прошедшее через электрическую дугу;

$T_{I_h}$  – температурный градиент элемента контактной пары;

$Bi$  – критерий Био;

$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$  – масштабные коэффициенты;

$P$  – контактное нажатие;

$k_1, k_2$  – функционалы, определяющие связь контактного нажатия и рода тока, протекающего через электрический скользящий контакт;

$k_3$  – коэффициент, учитывающий род тока;

$k_4$  – симплекс, учитывающий содержание графита в материале элемента контактной пары;

$g$  – коэффициент, характеризующий износ материала вследствие повышения шероховатости поверхностей;

$s$  – длина следа горения электрической дуги;

$$X_1 = \left( \frac{Ptc_2}{(r(T_{I_h}))^2 \rho_1 c_1 \chi} \right)^{\alpha_m} \quad - \text{комплекс}, \quad X_3 = (Cu)^{\gamma_m}, \quad X_4 = \left( \frac{H_1(T_{I_h})}{H_2(T_{I_h})} \right)^{\varepsilon_m} \quad - \text{симплексы (см.}$$

работу [2]);

$$\vartheta(F_{0i}, \varphi, \kappa) = \left[ F_{0i} \frac{\varphi_0 \kappa_0}{\varphi_1 \kappa_1} (0,1 + v_v)^{\frac{1}{2}} \right]^{\sigma_m} \quad - \text{комплекс, учитывающий влияние факторов окру}$$

жающей среды ( $\varphi_0 / \varphi_1$  – отношение среднего значения относительной влажности окружающей среды за пять лет к значению относительной влажности на момент исследований,  $\kappa_0 / \kappa_1$  – отношение среднего значения запыленности окружающей среды за пять лет к значению ее запыленности на момент исследований,  $v_v$  – скорость встречного воздушного потока аэродинамического воздействия на контактную вставку);

$F_{0i}$  – критерий Фурье;

$\sigma_m$  – коэффициент изменения влияния параметров внешней среды в зоне контакта.

Номограммы и диапазоны изменения коэффициентов и функционалов для расчета по модели (2) приведены в работе [10].

Тепловые процессы, происходящие в элементах контактной пары УТ, математически описываются системой дифференциальных уравнений Пуассона в частных производных и приведены в работе [2].

На рисунке 2 представлены гистограммы электрического изнашивания контактных элементов, полученные в результате расчета по существующей (гистограмма 1) и усовершенствованной (гистограмма 2) математическим моделям. При выполнении расчетов скорость воздушного потока принималась равной 50 м/с. Измерение износа проводилось в соответствии с ГОСТ 32680-2014 «Токосъемные элементы контактные токоприемников электроподвижного состава. Общие технические условия».

На рисунке 2 приняты обозначения: 1 – результаты расчета по существующей модели; 2 – результаты расчета по усовершенствованной модели, 3 – линия тренда.

Анализ гистограмм на рисунке 2 позволяет сделать заключение о повышении точности расчета (по отношению к линии тренда) по математической модели (2) за счет учета влияния аэродинамического воздействия воздушного потока и скорости движения подвижного состава. Точность прогнозирования усовершенствованной модели по отношению к существующей была подтверждена с помощью программного обеспечения фильтрационным методом, проведенным на базе выборки линии тренда. Усовершенствованная математическая модель элек-

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

трического изнашивания совместно с математической моделью механического изнашивания позволят повысить точность прогнозирования износа элементов контактных пар устройств токосъема электрического транспорта.

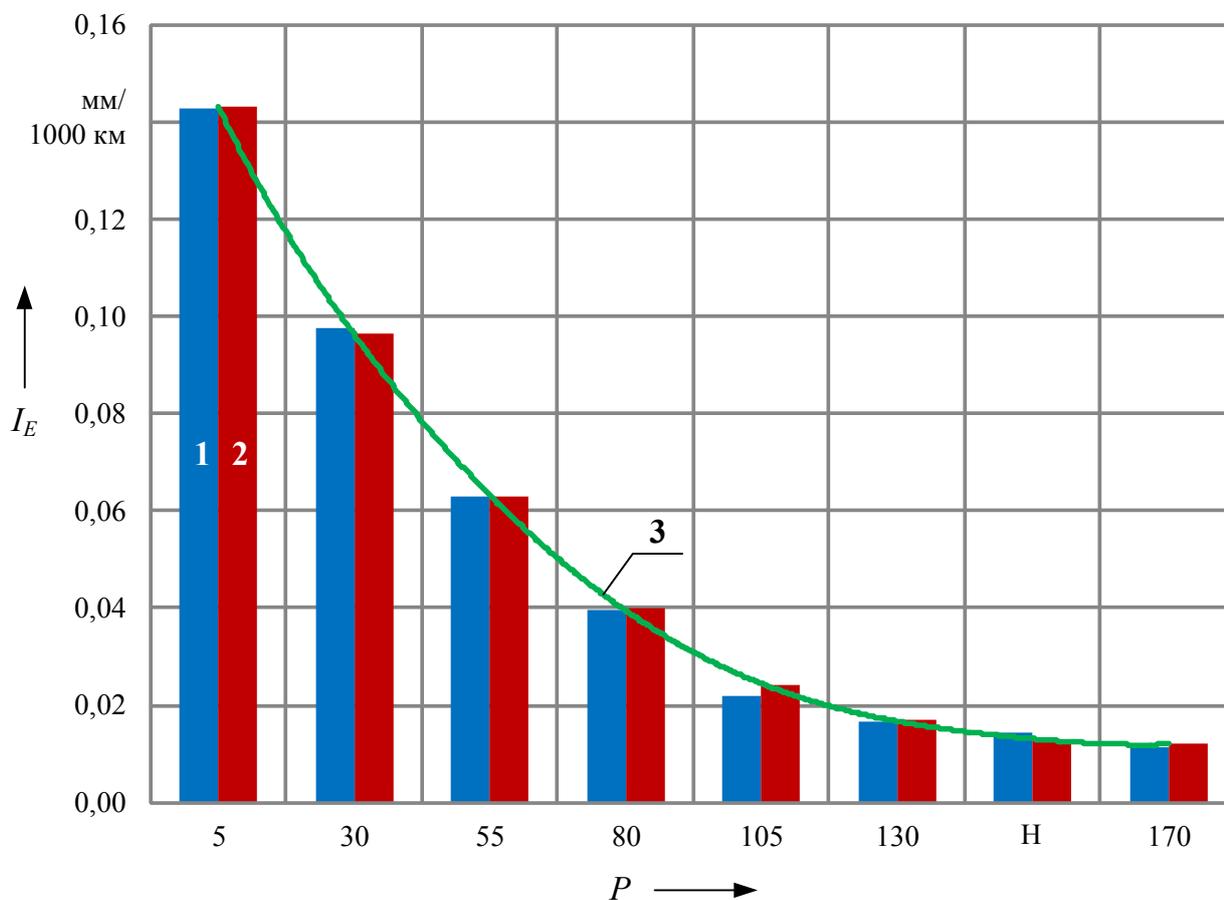


Рисунок 2 – Интенсивность изнашивания угольной контактной вставки типа Б, рассчитанная по существующей и усовершенствованной моделям

### Список литературы

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации 19.03.19: ввод. в действие с 19.03.19. – URL: <http://government.ru/docs/36094> (дата обращения: 17.06.2020). – Текст : непосредственный.
2. Philippov V., Smerdin A. Modeling the mechanical wear of the contact elements of pantograph during high-speed movement, *E3S Web of Conferences*, V. 157, 01022.
3. Голубков, А. С. Повышение эффективности эксплуатации токоприемников электроподвижного состава за счет совершенствования системы автоматического регулирования / А. С. Голубков, Г. Р. Ермачков, А. Н. Смердин, С. Н. Смердин // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы V всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2019. – С. 121 – 127. – Текст : непосредственный.
4. Филиппов, В. М. Совершенствование методов моделирования изнашивания контактных элементов токоприемников электроподвижного состава : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Филиппов Виктор Михайлович; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – 153 с. – Текст : непосредственный.

5. Biesenack H., Pintscher F. Kontakt zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste—Ausgangspunkte zur Bestimmung des elektrischen Verschleißes // *Elektrische Bahnen*. – 2005. – no. 3. P. 138 – 146.

6. Хольм, Р. Электрические контакты / Перевод с английского; под ред. д.т.н., проф. Д. Э. Брускина и д.х.н. А. А. Рудницкого / Р. Хольм. – Москва: Издательство иностранной литературы, 1961. – 464 с. – Текст : непосредственный.

7. Сидоров, О. А. Исследования электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов, С. А. Ступаков // *Трение и износ*. – Гомель, 2015. – Т. 36. – № 5. – С. 390 – 394. – Текст : непосредственный.

8. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Пер. с англ. Е. Г. Коваленко; под ред. чл.-корр. АН РФ Н. П. Бусленко / Х. Шенк. – Москва: Мир, 1972. – 381 с. – Текст: непосредственный.

9. Браун, Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – Москва: Машиностроение, 1982. – 191 с. – Текст : непосредственный.

10. Ступаков, С. А. Моделирование электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта / С. А. Ступаков, О. А. Сидоров, В. М. Филиппов // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. – Москва: Машиностроение, 2012. – № 4. – С. 23 – 30. – Текст : непосредственный.

### References

1. *Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossiiskiy zheleznyye dorogi» do 2025 goda* (Long-term development program of the Russian Railways open joint-stock company until 2025), Moscow, 2019, 135 p., Available at: <http://government.ru/docs/36094> (accessed 17 June 2020).

2. Philippov V., Smerdin A. Modeling the mechanical wear of the contact elements of pantograph during high-speed movement // *E3S Web of Conferences*, V. 157, 01022.

3. Golubkov A. S., Ermachkov G. R., Smerdin A. N., Smerdin S. N. Increase operational efficiency current collectors of electric rolling stock by improving the automatic control system [Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii tokopriemnikov elektropodvizhnogo sostava za schet sovershenstvovaniya sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya]. *Materialy V vserossiyskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Tekhnologicheskoye obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv yruduyutsvytsjartsvytsjny podvizhnogo sostava»* (Materials of the V All-Russian scientific and technical conference from the int. participation «Technological support for repairs and improving the dynamic qualities of railway rolling stock»). – Omsk, 2019, pp. 121 – 127.

4. Philippov V. M. *Sovershenstvovaniye metodov modelirovaniya iznashivaniya kontaknykh elementov tokopriyomnikov elektropodvizhnogo sostava* (Improving methods for modeling wear of contact elements of current collectors of electric rolling stock). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2012, 153 p.

5. Biesenack H., Pintscher F. Kontakt zwischen Fahrdrabt und Schleifleiste—Ausgangspunkte zur Bestimmung des elektrischen Verschleißes, *Elektrische Bahnen*, 2005, no. 3. pp. 138 – 146.

6. Holm, R. *Elektricheskie kontakty* (Electric Contacts), Moscow: Izdatelstvo inostrannoi literatury, 1991, 464 p.

7. Sidorov O. A., Philippov V. M., Stupakov S. A. Studies of the electromechanical wear of contact pairs in the current collection devices of electric transports [Issledovaniya elektromekhanicheskogo iznashivaniy kontaknykh par ustroystv tokosyoma elektricheskogo transporta]. *Treniye i iznos – Journal of Friction and Wear*, 2015, V. 36, no. 5, pp. 390 – 394.

8. Schenck H. *Teoriya inzhenernogo eksperimenta* (Theories of Engineering Experimentation). Moscow: Mir, 1972, 381 p.

9. Braun E. D., Yevdokimov Yu. A., Chichinadze A. V. *Modelirovaniye treniya i iznashivaniya v mashinakh* (Simulation of friction and wear in machines). Moscow: Mashinostroyeniye, 1982, 191 p.

10. Stupakov S. A., Sidorov O. A., Philippov V. M. Modelling of electromechanical wear of contact pairs of current pickup devices electric transport [Modelirovaniye elektromekhanicheskogo iznashivaniya kontaknykh par ustroystv tokosyoma elektricheskogo transporta]. *Treniye i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh – Friction and lubrication in machines and mechanisms*, 2012, no. 4, pp. 23 – 30.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Филиппов Виктор Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-16-07.

E-mail: fvm-omgups@mail.ru

### Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

### Миронос Николай Васильевич

АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»).

3-я Мытищинская ул., д. 10, г. Москва, 129626, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела «Контактная сеть и токосъем», АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-45-08.

E-mail: mironos@vniizht.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Филиппов, В. М. Совершенствование математической модели изнашивания элементов контактных пар устройств токосъема электрического транспорта при высокоскоростном движении / В. М. Филиппов, О. А. Сидоров, Н. В. Миронос. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 2 – 8.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Philippov Victor Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Railway power supply», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-16-07.

E-mail: fvm-omgups@mail.ru

### Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Head of department «Railway power supply», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

### Myronos Nikolay Vasilievich

JSC Scientific Research Institute of Railway Transport (JSC VNIIZhT).

3rd Mytishchinskaya st., 10, Moscow, 129626, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the "Contact network and current collection" department, JSC "VNIIZhT".

Phone: (499) 260-45-08.

E-mail: mironos@vniizht.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Philippov V. M., Sidorov O. A., Myronos N. V. Improving the mathematical model of the wear of the elements of contact pairs of electric current collection devices at high-speed movement. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 2 – 8 (In Russian).

**В. Л. Незевак**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГОЕМКОСТИ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований эффективности работы системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении на примере одного из участков ОАО «РЖД». Рассмотрены результаты измерений электрических величин электроподвижного состава при движении по исследуемому участку железной дороги. На основе имитационного моделирования получена оценка влияния систем накопления электроэнергии на пропускную способность участка железной дороги. Построены графики изменения минимального межпоездного интервала и минимального напряжения на токоприемнике электроподвижного состава в зависимости от мощности системы накопления, энергоемкости и пороговых напряжений для режимов заряда и разряда. Разработан алгоритм работы системы накопления электроэнергии на тяговой подстанции или линейном устройстве. На основе результатов моделирования построен график степени заряженности и определена зарядная характеристика, позволяющая поддерживать глубину разряда на уровне не более заданной. По результатам расчетов определены мощность, энергоемкость и зарядная характеристика системы накопления, обеспечивающие требуемый уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава в границах межподстанционных зон.

**Ключевые слова:** тяговая подстанция, пост секционирования, система тягового электроснабжения, электроподвижной состав, минимальный уровень напряжения на токоприемнике, система накопления электроэнергии, мощность и энергоемкость системы, степень заряженности, глубина разряда, зарядная характеристика.

**Vladislav L. Nezevak**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## DETERMINATION OF POWER AND ENERGY INTENSITY ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR IMPROVEMENT PERFORMANCE INDICATORS OF TRACTION POWER SUPPLY

**Abstract.** The article presents the results of research on the efficiency of the electric energy storage system in traction power supply on the example of one of the sections of JSC "Russian Railways". The results of measurements of electric values of electric rolling stock when moving along the railway section under study are considered. Based on simulation modeling, an assessment of the impact of power storage systems on the capacity of the railway section is obtained. Graphs of changes in the minimum travel interval and the minimum voltage on the current collector of an electric moving train depending on the power of the storage system, energy intensity, and threshold voltages for charge and discharge modes are constructed. An algorithm for the operation of the power storage system at a traction substation or linear device has been developed. Based on the simulation results, a graph of the degree of charge is constructed and a series characteristic is determined that allows maintaining the discharge depth at the level of no more than the specified one. Based on the results of calculations, the power, energy intensity and charging characteristics of the storage system are determined, which provide the required voltage level at the current receiver of an electric moving train within the boundaries of inter-station zones.

**Keywords:** traction substation, partition post, traction power supply system, electric rolling stock, minimum voltage level on the current collector, electric power storage system, power and energy consumption of the system, the degree of charge, depth of discharge, charging characteristic.

Применение в процессах генерации, передачи и распределения электроэнергии различных технологий накопления направлено на решение ряда задач, связанных с необходимостью стабилизации напряжения, повышения качества электроэнергии, выравнивания графика электрической нагрузки, повышения надежности электроснабжения в вынужденных и послеаварийных режимах, повышения энергетической эффективности и др. В системах тягового электро-

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

снабжения (СТЭ) использование систем накопления электроэнергии направлено на потенциальное повышение пропускной и провозной способности в границах межподстанционных зон (МПЗ) путем улучшения эксплуатационных показателей (снижения загрузки силового оборудования, стабилизации уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС) выше минимально требуемого уровня, повышения энергетической эффективности перевозок и др.). Задачи по повышению пропускной и провозной способности участков железных дорог и повышению энергетической эффективности перевозочного процесса для холдинга ОАО «РЖД» носят приоритетный характер, а их решение является актуальным.

В настоящее время отечественными компаниями выпускаются сетевые накопители электроэнергии для работы в электрических сетях общего назначения. Диапазон мощностей данных систем составляет от 0,1 до 100 МВт, в качестве примера можно привести сетевой накопитель, выпускаемый отечественной компанией [1]. Выпускаемые сетевые накопители относятся к управляемым устройствам с активной топологией. Одним из вариантов построения сетевых накопителей является использование электрохимической технологии накопления электроэнергии на базе литий-ионных аккумуляторов (рисунок 1).

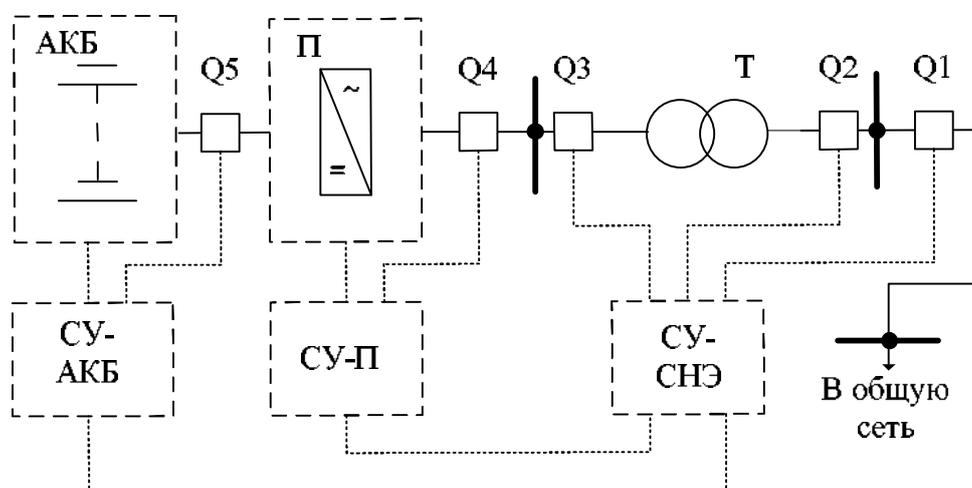


Рисунок 1 – Структурная схема сетевого накопителя электроэнергии

Сетевой накопитель данного вида состоит из аккумуляторной батареи (АКБ), преобразователя (П), силового трансформатора (Т), систем управления АКБ, П и сетевым накопителем (СНЭ), коммутационными аппаратами Q1 – Q5. Приведенная на рисунке 1 схема сетевого накопителя электроэнергии может применяться в СТЭ переменного тока. Для применения в СТЭ постоянного тока данная схема дополняется преобразователем, устанавливаемым между коммутационным аппаратом Q2 и шинами 3,3 кВ.

Возможны и другие варианты схемных решений, в частности, с другой топологией, с применением двух (или более) видов накопителей, схемы без вставки переменного тока и др.

В настоящее время отечественной промышленностью освоен выпуск литий-ионных аккумуляторов различных типоразмеров. В качестве примера можно привести производство аккумуляторов по литий-железо-фосфатной (LiFePO<sub>4</sub>) технологии. Указанные аккумуляторы имеют емкость в диапазоне от 170 до 270 А·ч [2]. В зависимости от типоразмера литий-ионные аккумуляторы отличаются токами в режимах заряда и разряда, принимающими максимальные значения, для указанного типоразмера в размере  $1C_n$  и  $3C_n$  соответственно. Ресурс аккумуляторов определяется условиями работы. Количество циклов до остаточной емкости  $0,8C_n$  определяется глубиной разряда (*DoD*): для *DoD* 40 – 60 % – не менее 5 000 циклов, для *DoD* – 100 % – не менее 1 000 циклов. При глубине разряда до 30 % ресурс определяется не количеством циклов, а условиями эксплуатации и составляет до восьми лет. Коэффициент полезного действия аккумуляторов (без учета преобразователей) составляет 99 %. Зарубежные

аналоги литий-ионных аккумуляторов и их модификаций имеют сопоставимые характеристики.

В настоящее время электрохимические накопители электроэнергии являются одним из перспективных видов, предназначенных для построения систем накопления большой емкости [3]. Исследования в области применения различных материалов показывают потенциал повышения удельных энергетических характеристик литий-ионной технологии аккумуляторов, например, графеновых и других видов аккумуляторов [4, 5]. Несмотря на улучшение характеристик литий-ионных аккумуляторов одной из важнейших задач остается продление срока службы батарей в зависимости от количества циклов и глубины разряда с учетом деградации емкости [6, 7]. Большое внимание применению систем накопления в указанных аспектах уделяется как отечественными, так и зарубежными исследователями [8–11].

Условия работы системы накопления электроэнергии с электротяговой нагрузкой зависят от ряда факторов [12–14]. С целью выбора параметров определенного вида накопителя электроэнергии необходимо оценить динамику изменения степени заряженности накопителя  $SoC$ , глубину разряда  $DoD$ , количество циклов работы и максимальные значения токов и напряжений в точке присоединения. Условия работы зависят от параметров и показателей работы СТЭ и в каждом случае реализации проекта по внедрению системы накопления требуют оценки, основанной на расчетах условий работы, как это показано на примере одного из действующих участков в источниках [15, 16].

Рассмотрим задачу совершенствования СТЭ с целью улучшения эксплуатационных показателей для повышения пропускной способности участка железной дороги путем применения систем накопления электроэнергии на примере одного из участков железной дороги ОАО «РЖД». Участок постоянного тока Волховстрой 1 – Бабаево Октябрьской железной дороги включает в себя 12 тяговых подстанций, присоединенных к электрическим сетям ПАО «Волгодзаэнерго» и «Ленэнерго». Высшее напряжение подстанций составляет 110 кВ (за исключением трех подстанций, получающих питание от линий 10 кВ). Эксплуатационная длина рассматриваемого участка составляет 233,9 км. На всей протяженности участок является двухпутным. В границах рассматриваемого участка смонтировано 10 постов секционирования. На тяговых подстанциях эксплуатируются 24 выпрямительных преобразователя, в т. ч. 22 с 12-пульсовой схемой выпрямления (инверторы отсутствуют). На участке организовано грузовое, пассажирское и пригородное движение. Грузовые перевозки осуществляются электровозами серий ВЛ10, ВЛ10У, ВЛ15, 2ЭС4К, 3ЭС4К и 2ЭС6. По результатам исследований Института экономики и развития транспорта (АО «ИЭРТ») наличная пропускная способность участка составляет 77 пар поездов в сутки, на перспективу до 2025 г. прогнозируется увеличение размеров движения до 115 пар поездов в сутки. Расчетный подъем в четном направлении составляет 7 ‰. На лимитирующем участке «Б. Двор – 248-й км» предусмотрено использование вспомогательных локомотивов для подталкивания поездов с массой от 5230 до 6500 т с электровозами серий ВЛ10, ВЛ10У и 2ЭС4К и поездов с массой от 7830 до 8000 т с электровозами серий 3ЭС4К и ВЛ15. Расчетный подъем в нечетном направлении составляет 6,1 ‰. Использование подталкивающих электровозов не предусмотрено. Максимальная масса поезда для соединенных поездов составляет 12600 т в обоих направлениях. Пассажирское движение осуществляется с помощью локомотивов серий ЭП2К, ЧС2Т и ЧС6(200).

Рассматриваемый участок железной дороги содержит ряд межподстанционных зон, лимитирующих пропускную способность по причине понижения напряжения на токоприемнике ЭПС до критических значений, что фиксируется в результате поездок тягово-энергетической лаборатории и системами регистрации параметров локомотивов. В качестве примера ниже приведены результаты поездки с локомотивом серии 3ЭС4К.

Снижение напряжения на токоприемнике локомотива серии 3ЭС4К для поездки ниже уровня 2 700 В носит кратковременный характер. Распределение напряжения показывает, что снижение уровня напряжения ниже допустимого уровня фиксируется в 2 % случаев наблюде-

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ний (рисунок 2, зоны а и б). Столбчатая гистограмма распределения значений напряжения на токоприемнике локомотива серии ЗЭС4К приведена на рисунке 3.

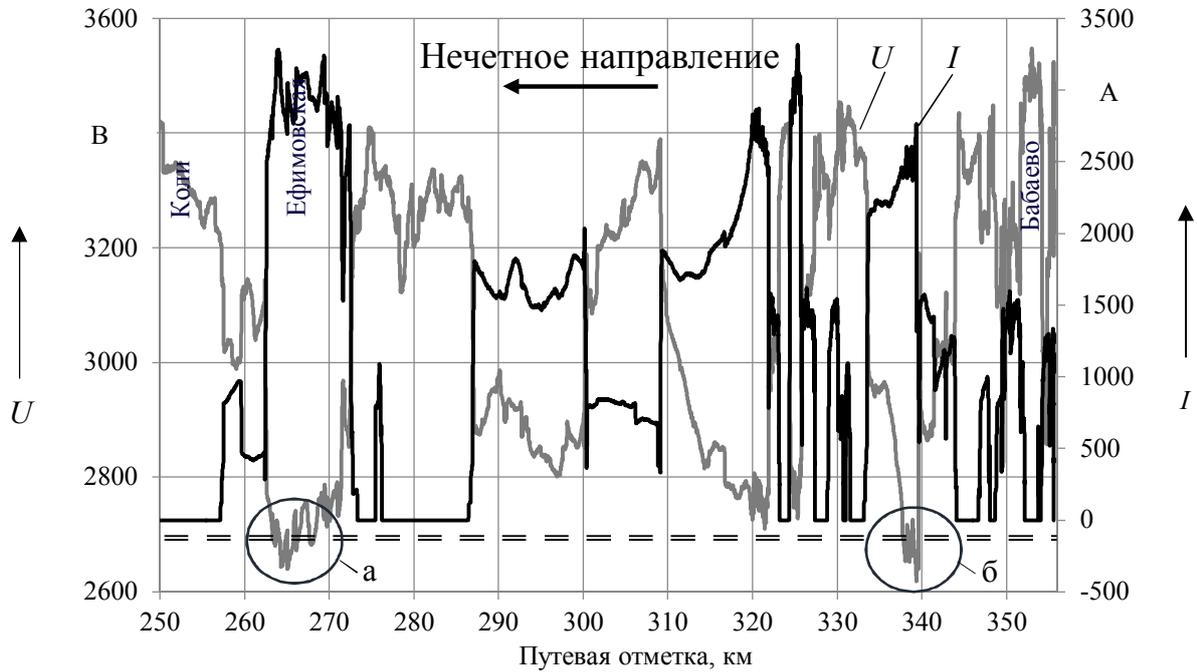


Рисунок 2 – График тока поезда и напряжения с локомотивом серии ЗЭС4К (масса поезда 9006 т)

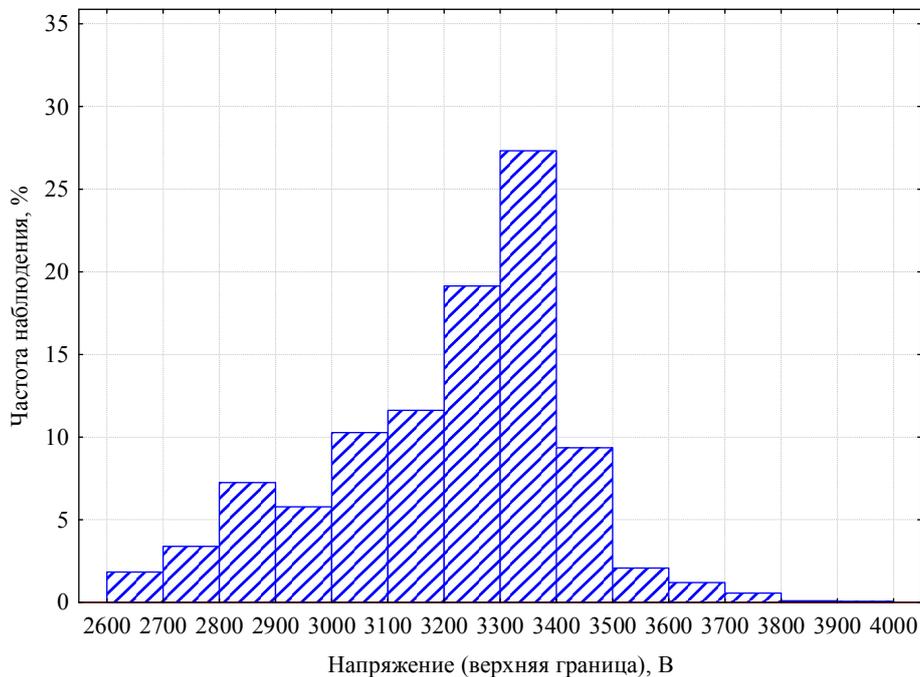


Рисунок 3 – Гистограмма распределения напряжения на токоприемнике локомотива серии ЗЭС4К (масса поезда 9006 т) для рассматриваемого участка

С целью оценки мощности и энергоемкости системы накопления электроэнергии и ее влияния на эксплуатационные показатели СТЭ и пропускную способность межподстанционной зоны рассматриваются варианты размещения систем на тяговых подстанциях и линейных пунктах. Основной целью размещения систем накопления на тяговых подстанциях является снижение загрузки силового оборудования за счет выравнивания графика электрической

нагрузки, для линейных пунктов – поддержание уровня напряжения на токоприемнике в заданном диапазоне в границах межподстанционной зоны. Решение обеих задач направлено на повышение пропускной способности. Далее в расчетах рассматривается вариант установки систем накопления электроэнергии на линейных пунктах (постах секционирования) в связи с имеющейся проблемой поддержания напряжения на токоприемнике.

Продолжительность времени, в течение которого напряжение на токоприемнике на рассмотренном участке снижается до минимально допустимого уровня и ниже находится в диапазоне 4 – 6 мин. Снижение напряжения ниже нормируемого уровня наблюдается на 100 – 200 В. Указанные диапазоны коррелируют с диапазонами изменения напряжения на шинах тяговых подстанций и линейных устройств СТЭ на лимитирующих участках [17 – 19]. Незначительная требуемая продолжительность работы и уровень дополнительной мощности обуславливают возможность рассмотрения систем накопления ограниченной энергоемкости и мощности для применения на постах секционирования.

Эффективность работы систем накопления при решении задачи поддержания уровня напряжения определяется выбором пороговых напряжений для режимов заряда, разряда и ожидания работы.

Изменение напряжения на шинах поста секционирования позволяет рассматривать четыре основных режима работы системы накопления:

«разряд» при снижении напряжения до порогового уровня  $U_{\text{разр}}$  и ниже;

«ожидание» при изменении напряжения на шинах поста секционирования в диапазоне пороговых напряжений для режимов «разряд» и «подзаряд»;

«подзаряд» токами ниже номинального по заданной характеристике до порогового напряжения в режиме заряда;

«заряд» в диапазоне значений напряжения выше напряжения холостого хода смежных тяговых подстанций номинальными токами накопителя.

При выборе максимальной мощности системы накопления необходимо учитывать допустимое падение напряжения в контактной сети в режиме заряда. Максимальное значение тока заряда  $I_{3 \text{ max}}$  в этом случае должно удовлетворять неравенству:

$$I_{3 \text{ max}} \leq \frac{\Delta U_{\text{доп}}}{r_{\text{к.с}}} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{r_{\text{к.с}}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{max}}$  – максимальное напряжение на шинах поста секционирования с учетом рекуперативного торможения электроподвижного состава;

$U_{\text{min}}$  – минимальное допустимое напряжение на шинах поста секционирования по условиям пропуска поездов;

$r_{\text{к.с}}$  – активное сопротивление секции контактной сети от тяговой подстанции до поста секционирования.

Ток подзаряда  $I_3$  системы накопления должен определяться по регулируемой характеристике с учетом уровня напряжения на шинах поста секционирования для условий поддержания минимального напряжения на шинах. Одним из вариантов реализации характеристики изменения  $I_3$  для  $i$ -го момента времени является изменение по линейному закону в заданном диапазоне. Тогда ток заряда в зависимости от своего максимального значения (1) и напряжения на шинах и будет определяться по условиям:

$$I_{3i} = \begin{cases} 0, U_{\text{ПС}i} < U_{\text{min}}; \\ \frac{U_{\text{ПС}i} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \cdot I_{\text{max}}, U_{\text{min}} < U_{\text{ПС}i} < U_{\text{max}}; \\ I_{\text{max}}, U_{\text{ПС}i} > U_{\text{max}}; \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_{ПС i}$  – фактическое напряжение на шинах поста секционирования (ПС) в  $i$ -й момент времени.

Мощность систем накопления, располагаемых на постах секционирования, оказывает влияние на эксплуатационные показатели и, как следствие, на пропускную способность. В расчетах рассматривается диапазон мощности системы накопления от 1,5 до 3,0 МВт. Электротяговая нагрузка определяется схемами пропуска поездов и расчетными режимами СТЭ. В качестве расчетных режимов используется схема с включенным резервом силового оборудования – для определения суточной наличной пропускной способности в нормальных условиях работы и в режиме интенсивной работы участка. Чередование поездов наибольшей массы с поездами средней массы для двухпутных участков принимается в зависимости от доли данной категории поездов в общей массе грузовых поездов: менее 0,25 – 1 из 4; от 0,25 до 0,5 – 1 из 3; от 0,5 до 0,75 – 1 из 2; свыше 0,75 – каждый поезд. Для оценки влияния систем накопления на пропускную способность расчеты проведены для двух вариантов пропуска поездов наибольшей массы: 1 из 2, 1 из 4. В качестве расчетных схем СТЭ приняты существующая нормальная схема и схема в режиме интенсивной работы, а также аналогичные указанным, дополненные системами накопления электроэнергии.

Выбор пороговых напряжений для режимов заряда и разряда системы накопления оказывает влияние на уровень напряжения на токоприемнике ЭПС и, как следствие, на пропускную и провозную способность участка.

Моделирование взаимодействия ЭПС и СТЭ выполняется на основе задаваемых тяговых нагрузок, определяемых в ходе тяговых расчетов для рассматриваемого профиля пути участка, и схемы замещения, учитывающей параметры элементов СТЭ (сопротивления силового оборудования и участков тяговой сети). Расчет тяговой нагрузки при имитационном моделировании осуществляется на основе мгновенных схем, позволяющих определить установившиеся значения токов и напряжений для всех ветвей и узлов схемы замещения. В качестве методов решения указанных задач хорошо зарекомендовали себя методы контурных токов и узловых потенциалов. Применение указанных методов реализуется в программных средах Matlab и специализированных комплексах. Примером последних является программный «Комплекс расчетов тягового электроснабжения», разработанный ВНИИЖТом для проведения расчетов устройств СТЭ. Указанный комплекс использован в настоящей работе для получения значений токов и напряжений в рассматриваемой СТЭ участка, усредняемых на интервале 30 с.

С целью оценки влияния порогового напряжения в режиме разряда рассмотрим вариант, в котором номинальный ток накопителя равен 1000 А, а напряжение изменяется в диапазоне от 2800 до 3200 В.

Результаты расчетов для интенсивного режима работы СТЭ при схеме пропуска поездов повышенной массы 1 из 2 показывают, что изменение интервала движения при изменении порогового напряжения в режиме разряда для трех МПЗ рассматриваемого участка происходит в узком диапазоне – 1 мин. При увеличении порогового напряжения для условий постов секционирования ПС Коли и ПС 343 км снижение минимального интервала наблюдается с 9 до 8 мин, для ПС 291 км – с 8 до 7 мин (рисунок 4, а). В данном случае в условиях ограниченной мощности системы накопления пороговое напряжение режима разряда оказывает существенное влияние на изменение минимального межпоездного интервала рассматриваемых МПЗ, для рассмотренного диапазона мощности (от 1,5 до 3 МВт) изменение интервала составило 1 мин.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

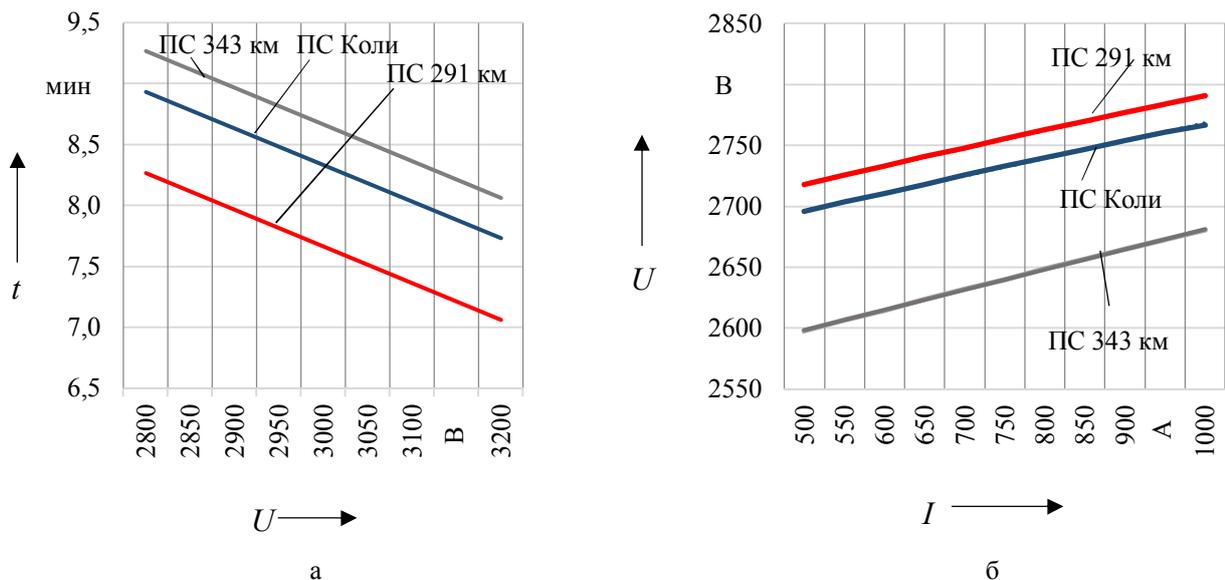


Рисунок 4 – График минимального межпоездного интервала при изменении напряжения включения (а) и минимального напряжения на токоприемниках локомотивов (б)

Степень влияния мощности системы накопления на уровень напряжения в контактной сети и минимальный межпоездной интервал определяются значениями порогового напряжения режима разряда. Рассмотрим варианты изменения тока систем накопления в диапазоне от 500 до 1000 А, что соответствует номинальной мощности системы от 1,5 до 3,0 МВт, для значений порогового напряжения режима разряда 2800 и 3200 В. Результаты расчетов по оценке влияния максимального тока системы накопления на минимальные межпоездные интервалы в границах МПЗ для пороговых значений напряжения 2800 и 3200 В приведены на рисунке 5. Увеличение мощности систем накопления в диапазоне от 1,5 до 3,0 МВт оказывает различное влияние на минимальный межпоездной интервал. При увеличении порогового напряжения в режиме разряда до 3200 В для рассматриваемого диапазона максимального тока системы накопления наблюдается сокращение диапазона изменения минимальных межпоездных интервалов.

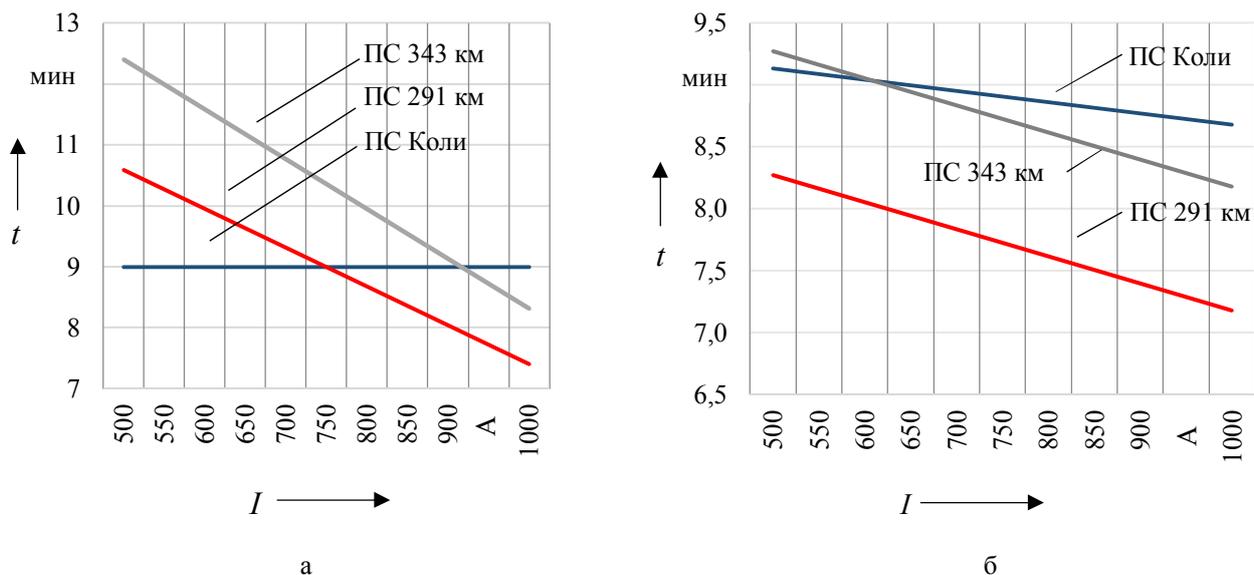


Рисунок 5 – График межпоездного интервала при изменении максимального тока системы накопления при пороговом напряжении 2800 В (а); 3200 В (б)

Повышение порогового напряжения режима разряда приводит к уменьшению межпоездного интервала, что обусловлено повышением минимального напряжения на токоприемниках локомотивов на лимитирующих МПЗ. В границах рассматриваемых лимитирующих МПЗ изменение напряжения на токоприемнике локомотива для диапазона увеличения номинальных токов накопителей от 500 до 1000 А и порогового напряжения разряда 3200 В носит линейный характер (см. рисунок 4, б).

Изменение минимального напряжения на токоприемнике локомотивов для условий размещения накопителей на постах секционирования на основе метода линейной аппроксимации описывается с помощью следующих функций:

- для ПС Коли:  $U_{\min} = 0,143 \cdot I + 2625,545$ ;
- для ПС 291 км:  $U_{\min} = 0,146 \cdot I + 2645,818$ ;
- для ПС 343 км:  $U_{\min} = 0,166 \cdot I + 2515,727$ .

Увеличение максимального тока системы накопления на 100 А в диапазоне от 500 до 1000 А в режиме разряда приводит к повышению напряжения на шинах поста секционирования в среднем на 15 В. Рассмотренные варианты работы систем накопления в границах МПЗ показывают возможность сокращения межпоездных интервалов. Повышение порогового напряжения приводит к увеличению требуемой мощности и энергоемкости накопителей. Указанное обстоятельство необходимо учитывать при оценке времени, необходимого для восстановления заряда накопителя. Для рассматриваемых МПЗ пороговое напряжение целесообразно принимать в диапазоне от 2950 до 3100 В. Для дальнейших расчетов пороговое напряжение принято на уровне 3000 В.

Условия работы системы накопления на тяговой подстанции или линейном устройстве определяются уровнем напряжения на шинах, нагрузкой по вводу выпрямительного преобразователя и степенью заряженности системы накопления. Настройка режимов работы систем накопления электроэнергии в общем случае должна учитывать построение системы по гибридной технологии, как это показано, например, на физической модели [20, 21]. Для поста секционирования условия определяются данными измерений напряжения на шинах поста  $U_{ПС}$  и степени заряженности системы  $SoC$ . Алгоритм работы системы накопления предусматривает реализацию четырех основных режимов: «разряда», «ожидания», «заряда» и «подзаряда». Учет последнего режима в зависимости от уровня напряжения на шинах поста секционирования является отличительной особенностью предлагаемого алгоритма от существующих. Реализация указанных режимов определяется на основе данных измерений уровня напряжения на шинах поста и состояния аккумуляторной батареи (рисунок 6).

В блоке (а) алгоритма выполняется тестирование оборудования системы при первоначальном включении и в процессе работы. Переход к выбору режима (блоки алгоритма (б) и (в)) выполняется через проверку измеренного напряжения на шинах поста секционирования  $U_{ПС}$  и индекса состояния режима  $k$ . В алгоритме различаются условия начала и продолжения работы вследствие различия напряжений для перехода в один из режимов и возврата из него (гистерезисная характеристика). Для обеспечения устойчивой работы помимо ступени напряжения  $\Delta U$  необходимо предусмотреть задержку по времени для исключения явления «прыгания» системы из одного режима работы в другой.

Для перехода в режим разряда степень заряженности должна быть выше минимального уровня  $SoC_{\min}$ , при котором обеспечивается режим разряда (блок (б)). При выполнении данного условия, система переходит в режим разряда (режиму присваивается индекс  $k = 1$ ), при невыполнении – в режим ожидания (индекс режима –  $k = 2$ ). Индексы режима  $k = 3$  и  $k = 4$  соответствуют режимам заряда и подзаряда системы соответственно,  $k = 0$  – начальное значение индекса при включении устройства. В блоке (в) алгоритма реализуется выбор режима заряда или подзаряда. В режиме подзаряда ток накопителя определяется как функция напряжения на шинах поста секционирования (например, по формуле (2)) до полного заряда. В случае невыполнения условий накопитель переходит в режим ожидания.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Проверка условий для перехода в режим разряда или продолжение работы в нем выполняется в зависимости от индекса режима:

включение ( $k \neq 1$ ) –

$$U_{\text{ПС}i} \leq U_{\text{min ПС}}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{ПС}i}$  – напряжение, измеренное на шинах поста секционирования в  $i$ -й момент времени;  $U_{\text{min ПС}}$  – минимальный уровень напряжения, при котором накопитель включается на разряд; сохранение режима разряда ( $k = 1$ ) –

$$U_{\text{ПС}i} \leq U_{\text{min ПС}} + \Delta U. \quad (4)$$

Алгоритм управления реализует циклическую работу системы на каждом интервале времени в соответствии с уровнем напряжения на шинах поста секционирования и степенью заряженности аккумуляторной батареи. Для выхода из соответствующего режима необходимо отклонение напряжения на значение напряжения  $\Delta U$  или достижение системой экстремальных значений заряженности или разряженности.

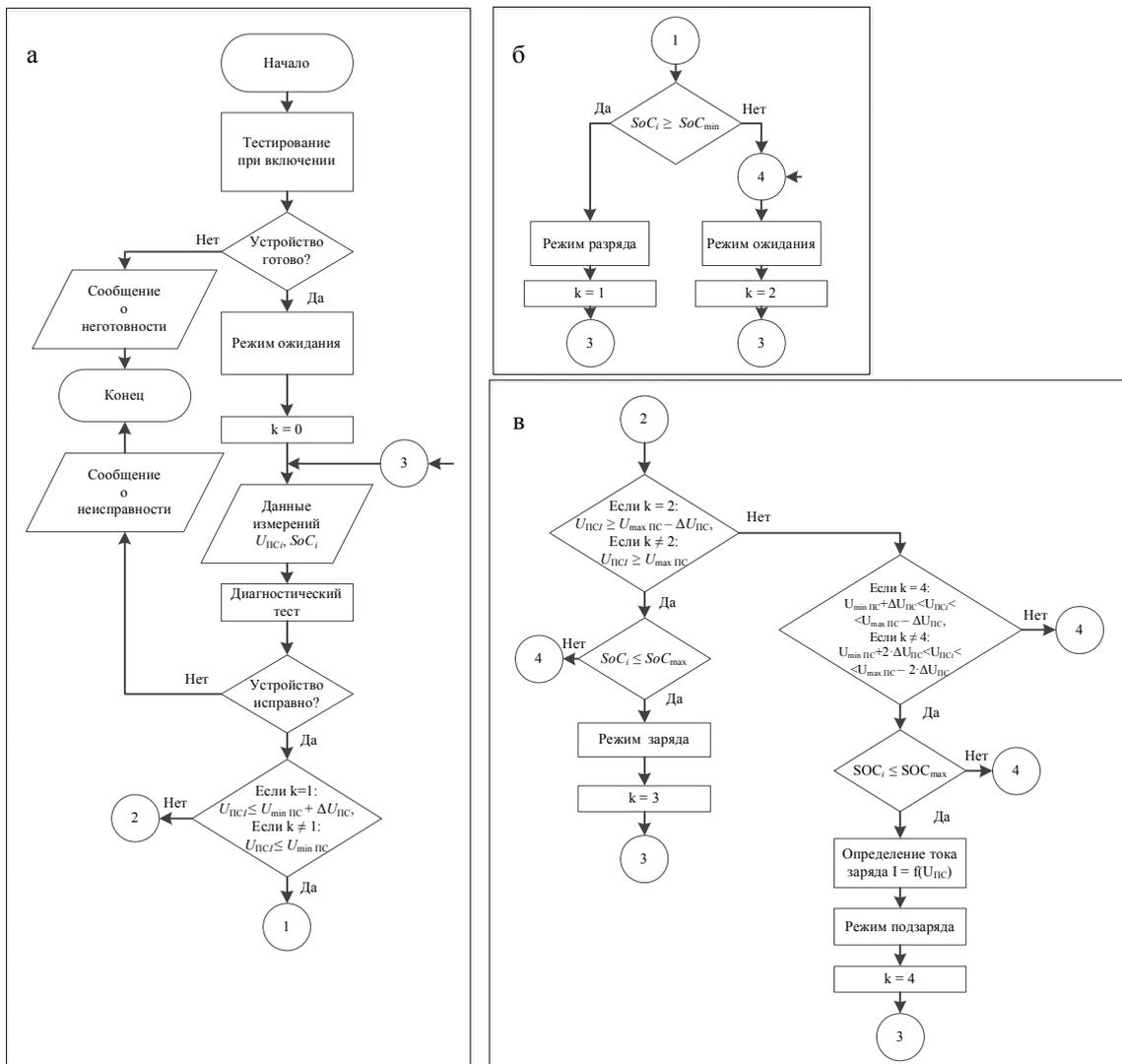


Рисунок 6 – Алгоритм работы системы накопления на шинах поста секционирования

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

При соответствии измеренного напряжения рабочему напряжению в режиме разряда выполняется проверка степени заряженности:

$$SoC_i \geq SoC_{\min}, \quad (5)$$

где  $SoC_i$ ,  $SoC_{\min}$  – текущий уровень степени заряженности в  $i$ -й момент времени и минимальный уровень заряженности, при котором допустим переход накопителя в режим разряда.

Аналогично выполняется проверка условий для перехода в режим заряда с максимальным током. При несоблюдении условий, при которых возможен переход в режим разряда или заряда с максимальными токами, выполняется определение тока подзаряда в зависимости от напряжения на шинах поста секционирования.

В этом случае напряжение для перехода в режим подзаряда должно удовлетворять условию:

включение ( $k \neq 4$ ) –

$$U_{\min \text{ ПС}} + 2 \cdot \Delta U < U_{\text{ПС}i} < U_{\max \text{ ПС}} - 2 \cdot \Delta U, \quad (6)$$

где  $U_{\max \text{ ПС}}$  – максимальный уровень напряжения, соответствующий условиям перехода накопителя в режим заряда.

сохранение режима подзаряда ( $k = 4$ ) –

$$U_{\min \text{ ПС}} + \Delta U < U_{\text{ПС}i} < U_{\max \text{ ПС}} - \Delta U. \quad (7)$$

Проверка степени заряженности выполняется до достижения максимального уровня:

$$SoC_i \leq SoC_{\max}, \quad (8)$$

где  $SoC_{\max}$  – максимальный уровень степени заряженности, при достижении которого система переходит в режим ожидания.

Схема пропуска поездов наибольшей массы 1 из 2 реализуется при интенсивном режиме работы СТЭ, для которого расчетными условиями работы на участке являются повышение напряжения холостого хода на тяговых подстанциях и включение вторых выпрямительных преобразователей.

При пропуске поездов повышенной массы по схеме 1 из 2 в условиях интенсивного режима работы СТЭ применение систем накопления на постах секционирования позволяет сократить минимальный межпоездной интервал при пороговом напряжении разряда  $U_{\text{пор р}} = 3000$  В на 4 мин (с 13 до 9 мин) для мощности системы в диапазоне от 1,8 до 3,0 МВт и на 2 мин (с 13 до 11 мин) для мощности системы 1,5 МВт. Увеличение порогового напряжения системы на 200 В приводит к сокращению межпоездных интервалов на 1 – 2 мин относительно рассмотренного выше варианта.

Максимальное сокращение межпоездного интервала обеспечивается применением систем накопления мощностью от 1,6 до 3 МВт (600 – 1000 А) при пороговом напряжении разряда 3000 В и мощностью от 2,9 до 3,2 МВт (900 – 1000 А) при пороговом напряжении 3200 В. В рассматриваемом случае выбор мощности систем накопления будет определяться требованиями по сокращению межпоездных интервалов на участке железной дороги.

Энергоемкость накопителя определяется, с одной стороны, требованиями по объему хранения электроэнергии, а с другой – ограничениями, связанными зарядными и разрядными характеристиками аккумуляторов. Электротяговая нагрузка в тяговой сети железной дороги носит резкопеременный характер. В связи с этим ограничивающим фактором в данном случае является скорость приема/отдачи тока аккумуляторной батареей. Максимально допустимые токи приема/отдачи аккумулятором нормируются величиной кратности по отношению к

номинальной емкости аккумулятора  $C_n$ . Согласно рекомендациям производителей литий-железо-фосфатных аккумуляторов эксплуатация должна проводиться при токах заряда/разряда, близких к  $1C_n / 2C_n$  соответственно. Учитывая то, что мощность системы в режиме разряда/заряда принята равной 3/1,5 МВт, а номинальный ток составляет 1000/500 А, необходимая для сокращения межпоездного интервала для рассматриваемого участка на требуемую величину минимальная энергоемкость системы накопления должна быть на уровне не менее 1500 кВт·ч.

Сокращение энергоемкости аккумуляторной батареи приведет к необходимости снижения токов в режимах заряда и разряда и, как следствие, к увеличению минимальных межпоездных интервалов на лимитирующих МПЗ участка.

Учитывая процесс деградации емкости литий-ионных батарей в процессе эксплуатации, энергоемкость батарей необходимо выбирать с запасом больше расчетного значения:

$$W_{НЭЭ} = k_3 \cdot W_{\text{расч}}, \quad (9)$$

где  $W_{\text{расч}}$  – расчетная энергоемкость, определяемая по условиям обеспечения режимов работы накопителя в системе тягового электроснабжения;

$k_3$  – коэффициент запаса, учитывающий процесс потери энергоемкости во время эксплуатации.

Для дальнейших расчетов по определению режима работы, степени заряженности и глубины разряда мощность накопителей принята равной 3,0 МВт, энергоемкость с учетом уравнения (9) увеличена до 1600 кВт·ч.

Оценка работы системы накопления электроэнергии на лимитирующих МПЗ в условиях переменной тяговой нагрузки и смены режимов работы ЭПС выполняется на основе полученных при моделировании графиков изменения напряжения на шинах постов секционирования и токов системы накопления в режиме разряда. Результаты изменения напряжения на шинах постов секционирования и токов систем накопления получены на основе мгновенных расчетных схем для интервала графика движения поездов в два часа. Для базового варианта (системы накопления не установлены) минимальный межпоездной интервал на участке для параллельного графика в четном и нечетном направлениях составляет 13 мин.

Для варианта расчета с системами накопления используются следующие условия расчета: система накопления переходит в режим разряда при падении напряжения на шинах поста секционирования ниже 3000 В, максимальный ток системы в режиме разряда равен 1000 А. Состояние системы тягового электроснабжения соответствует интенсивному режиму работы – на подстанциях на параллельную работу включен второй выпрямительный преобразователь.

В расчетах используется сформированный параллельный график движения в обоих направлениях. Для расчетного варианта минимальный межпоездной интервал сокращается до 9 мин (13 мин – для базового варианта). Результаты расчетов напряжения и тока разряда накопителей для варианта размещения систем накопления электроэнергии позволяют построить графики изменения напряжения и тока разряда.

Статистические показатели расчетных величин напряжения на шинах постов секционирования и токов систем накопления для трех лимитирующих МПЗ расчетного варианта приведены в таблице 1.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Статистические показатели графиков напряжения и тока накопителя

Показатель	Пост секционирования					
	ПС Коли		ПС 291 км		ПС 343 км	
	<i>U</i> , В	<i>I</i> , А	<i>U</i> , В	<i>I</i> , А	<i>U</i> , В	<i>I</i> , А
min	2951,0	0,0	2959,0	0,0	3000,0	0,0
max	3451,0	1002,0	3556,0	1004,0	3803,0	1009,0
Среднее значение	3141,4	145,8	3157,5	110,8	3184,2	60,1
Среднеквадратичное отклонение	143,8	275,6	159,3	247,2	151,2	168,6

Расчет напряжения на шинах постов секционирования трех лимитирующих МПЗ показывает, что для варианта пропуска поездов по схеме 1 из 2 в условиях интенсивного режима работы СТЭ минимальное напряжение на шинах постов секционирования и токоприемниках ЭПС не должно быть ниже уровня 2900 В.

Средние токи систем накопления на постах секционирования в режиме разряда получены для мощности 3 МВт для двухчасового интервала. Аналогичные результаты получены для условий пропуска поездов повышенной массы по схеме пропуска поездов наибольшей массы 1 из 4.

Приведенные результаты расчетов показывают, что энергетические показатели работы накопителей для трех рассмотренных постов секционирования различаются. В соответствии с этим различны условия заряда и разряда систем.

Для оценки указанных условий и определения глубины разряда накопителей построены графики степени заряженности. При работе накопителя электроэнергии условием для его эффективной работы является возможность поддержания степени заряженности в заданном диапазоне, позволяющем обеспечить устойчивую работу устройства в течение суток и ограничить глубину разряда с целью увеличения ресурса работы устройства в условиях реальной эксплуатации.

Условия заряда накопителей должны предусматривать режимы заряда номинальными токами для диапазонов напряжения на шинах поста секционирования, близких и выше напряжения холостого хода смежных тяговых подстанций. При снижении напряжения ток заряда накопителя должен уменьшаться, чтобы снизить потери напряжения в контактной сети, при увеличении напряжения – возрасти.

В общем виде характеристика тока заряда для накопителя определяется параметрами СТЭ и пороговыми напряжениями режимов заряда и разряда. Вид зарядной характеристики определяется требованиями поддержания напряжения на шинах и может иметь как линейный, так и нелинейный характер в зависимости от особенностей МПЗ.

Задачей расчета в рамках цикличности следования поездов повышенной массы 1 из 2 является оценка степени заряженности в конце рассматриваемого интервала. Степень заряженности на начальном этапе должна обеспечивать прием энергии рекуперации. В связи с этим на начало расчета принято, что степень заряженности не равна 100 % для создания условий по приему энергии рекуперации. В расчетах по оценке степени заряженности принят уровень 75 %.

Степень заряженности системы на *k*-м интервале времени определяется с учетом коэффициента полезного действия  $\eta$ , учитывающего эффективность работы схемы преобразования и аккумуляторной батареи, по формуле:

$$SOC_k = \frac{\sum_{t_0}^{t_k} u_k \cdot i_k \cdot \Delta t_k}{W_{НЭЭ}} \cdot \eta \cdot 100, \quad (10)$$

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

где  $u_k, i_k$  – значения напряжения и тока для  $k$ -го интервала времени;

$\Delta t_k$  – шаг времени.

В расчетах принято, что коэффициент полезного действия системы накопления, включающий в себя преобразователи, составляет 0,9. Результаты расчетов позволяют построить график степени заряженности. Для условий работы системы на посту секционирования ПС Коли график степени заряженности и соответствующая ему зарядная характеристика приведены на рисунке 7. Для рассматриваемых условий глубина разряда  $DOD$  составляет 14 %.

Результаты расчета межпоездных интервалов для лимитирующих МПЗ в рассматриваемых диапазонах параметров приведены в таблице 2. Во всех случаях работы на интервале времени в два часа, в течение которых осуществляется движение поездов наибольшей массы, обеспечивается восстановление степени заряженности аккумуляторной батареи и глубина разряда не превышает 30 % от полной энергоемкости, что гарантирует максимальный срок службы аккумуляторной батареи в расчетных режимах работы.

Полученные уровни токов разряда и заряда, графики степени заряженности аккумуляторной батареи являются необходимыми и достаточными данными, на основании которых производитель оборудования может оценить ресурс батареи до её плановой замены при эксплуатации в расчетных условиях.

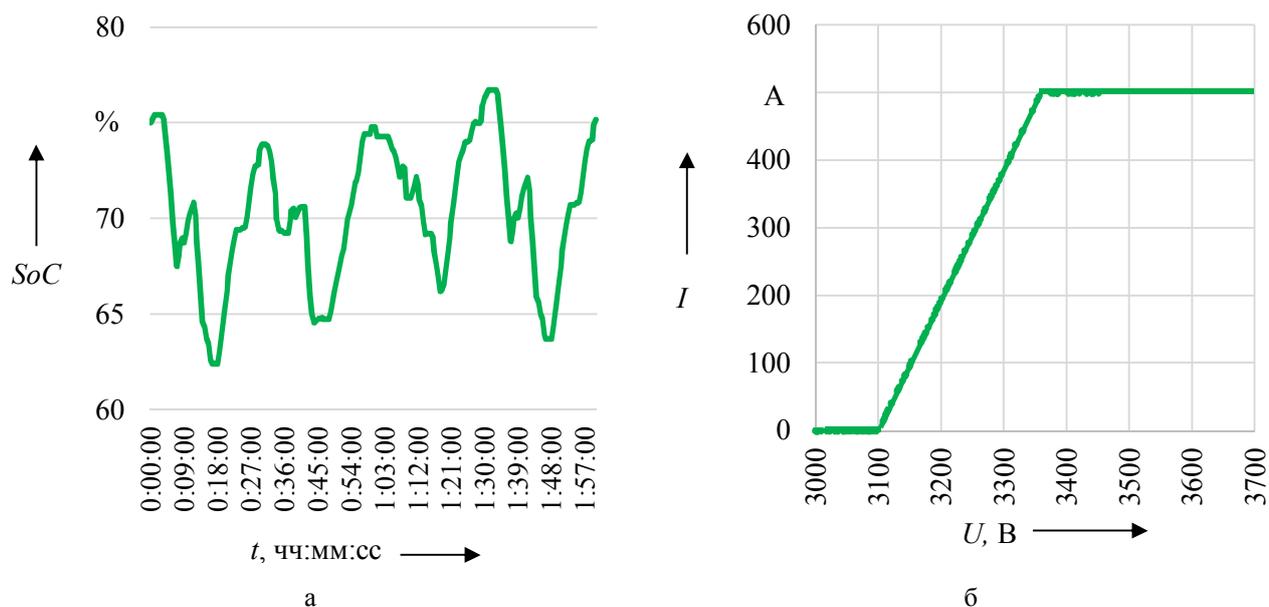


Рисунок 7 – График степени заряженности (а) и зарядной характеристики (б) системы накопления

Таблица 2 – Минимальные межпоездные интервалы

Напряжение включения на разряд, В	Межподстанционная зона	Минимальные межпоездные интервалы, мин					
		схема пропуска «Н-с-с-с»			схема пропуска «Н-с-Н-с»		
		базовый	1600 кВт·ч, 1000 А	900 кВт·ч, 600 А	базовый	1600 кВт·ч, 1000 А	900 кВт·ч, 600 А
3000	П – Е	19	15	15	12	8	9
	Е – З	19	15	15	13	8	8
	Т – Б	18	12	12	13	9	9
3200	П – Е	19	12	12	12	8	9
	Е – З	19	12	13	13	7	8
	Т – Б	18	11	11	13	8	9

Примечание. П, Е, З, Т, Б – тяговые подстанции участка железной дороги.

Применение систем накопления электроэнергии для участка железной дороги позволяет сократить минимальный межпоездной интервал в границах лимитирующих межподстанционных зон путем повышения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава. Сокращение минимальных межпоездных интервалов происходит в диапазоне мощностей разряда системы накопления от 2,1 до 3,0 МВт. Снижение порогового напряжения разряда до уровня 2800 В приводит к уменьшению степени влияния мощности системы накопления на минимальное напряжение на токоприемнике локомотива и минимальный межпоездной интервал. Увеличение порогового напряжения приводит к сокращению интервала времени, доступного для восстановления степени заряженности, и необходимости увеличения мощности и полной энергоемкости системы.

Параметры системы накопления и алгоритм ее работы для рассматриваемого участка железной дороги следует выбирать на основе следующих значений: номинальная мощность в режиме разряда не менее 3,0 МВт, в режиме заряда не менее 1,5 МВт; номинальная энергоемкость не менее 1,6 МВт·ч; пороговое напряжение разряда 3000 В. Уменьшение указанной мощности приводит к снижению влияния на минимальное напряжение на токоприемнике и ухудшает условия эксплуатации аккумуляторов в части перегрузки в режимах заряда и разряда. Применение систем накопления с указанными параметрами на трех постах секционирования рассмотренного участка позволяет сократить межпоездной интервал на 4 мин: при пропуске поездов повышенной массы по схеме 1 из 2 в условиях интенсивного режима работы системы тягового электроснабжения с 13 до 9 мин; при пропуске поездов повышенной массы по схеме 1 из 4 в условиях нормального режима работы системы тягового электроснабжения с 19 до 15 мин.

Для базового варианта (без систем накопления) в условиях пропуска поездов повышенной массы по схеме 1 из 4 при параллельном графике движения поездов с интервалом движения 19 мин и нормальном режиме работы системы тягового электроснабжения расчетные значения минимального напряжения на шинах поста секционирования и токоприемниках электроподвижного состава фиксируются ниже минимально допустимого уровня. Для систем накопления в расчетном режиме работы для выбранного уровня полной энергоемкости обеспечивается восстановление степени заряженности, а глубина разряда не превышает 30 %, что обеспечивает максимальный срок службы литий-ионной аккумуляторов. Уменьшение полной энергоемкости приводит к увеличению глубины разряда и сокращает ресурс работы аккумуляторов. Размещение систем накопления на трех постах секционирования позволяет исключить случаи понижения напряжения ниже допустимого на шинах постов секционирования и токоприемнике электроподвижного состава.

### Список литературы

1. Сетевые накопители электроэнергии (СНЭ):. Лиотех. – URL: <https://www.liotech.ru/products/batarei-i-nakopiteli/setevye-nakopiteli-energii/> (дата обращения: 17.01.2020). – Текст : электронный.
2. Литий-ионные аккумуляторы: Лиотех – URL: <https://www.liotech.ru/products/akkumulyatory/> (дата обращения: 17.01.2020). – Текст : электронный.
3. Maddukuri, S., Malka, D., Chae, M. S., Elias, Y., Luski, S., & Aurbach, D. (2020). On the Challenge of Large Energy Storage by Electrochemical Devices. *Electrochimica Acta*, 136771. doi:10.1016/j.electacta.2020.136771.
4. Chen, X., Hu, S., Liu, Y., Ali, A., Li, S., Zhang, X., Shen, P. K. (2020). Membrane and electrode engineering of high-performance lithium-sulfur batteries modified by stereotaxically-constructed graphene. *Journal of Alloys and Compounds*, 155096. doi:10.1016/j.jallcom.2020.155096.
5. Zhou, Y., Shan, W., Hou, X., Lam, K., Zhao, X., Liu, X., & Wu, Y. (2020). Study of spherical  $\text{Li}_{1.2-x}\text{Na}_x\text{Mn}_{0.534}\text{Ni}_{0.133}\text{Co}_{0.133}\text{O}_2$  cathode based on dual  $\text{Li}^+/\text{Na}^+$  transport system for Li-ion batteries. *Solid State Ionics*, 350, 115326. doi:10.1016/j.ssi.2020.115326.

6. Moncecchi, M., Brivio, C., Mandelli, S., & Merlo, M. (2020). Battery Energy Storage Systems in Microgrids: Modeling and Design Criteria. *Energies*, 13(8), 2006. doi:10.3390/en13082006.
7. Cha, E., Patel, M., Bhooyate, S., Prasad, V., & Choi, W. (2020). Nanoengineering to achieve high efficiency practical lithium-sulfur batteries. *Nanoscale Horizons*. doi:10.1039/c9nh00730j.
8. Евстафьев, А. М. Оценка энергоемкости бортового накопителя энергии для тягового подвижного состава / А. М. Евстафьев // БРНИ. – 2018. – № 2. – С. 7 – 15. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-energoemkosti-bortovogo-nakopitelya-energii-dlya-tyagovogo-podvizhnogo-sostava> (дата обращения: 02.10.2019). – Текст : электронный.
9. Шевлюгин, М. В. Опыт пуска электроподвижного состава при помощи «накопительных» тяговых подстанций на московском метрополитене / М. В. Шевлюгин, Д. В. Ермоленко, А. Н. Стадников // Электротехника. – 2017. – № 11. – С. 75 – 80. – Текст : непосредственный.
10. He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of Lithium-ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach, *Energies*, 2011, vol. 4 (4), pp. 582 – 598.
11. Nezevak V., Cheremisin V., Shatokhin A. Assessment of energy intensity of the drive for traction power supply system, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 982, pp. 524 – 538.
12. Черемисин, В. Т. Оценка влияния пакетной организации движения на объем электроэнергии на тягу на участках постоянного тока с I типом профиля / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, С. С. Саркенов. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 3 (55). – С. 135 – 144.
13. Незевак, В. Л. Мониторинг выполнения норм удельной рекуперации в границах произвольной зоны мониторинга участка постоянного тока / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 2 (22). – С. 87 – 96.
14. Незевак, В. Л. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 2 (75). – С. 84 – 94.
15. Nezevak, V., Cheremisin, V., & Shatokhin, A. (2019). Operating modes of electric energy storage systems on the Moscow central ring, *E3S Web of Conferences*, 135, 01063, doi:10.1051/e3sconf/201913501063.
16. Nezevak V. L., Cheremisin V. T., Shatokhin A. P. (2020). Electric energy storage units applicability assessment of different kinds in the conditions of Moscow central ring, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, V. 1115, pp. 42 – 51, doi: 10.1007/978-3-030-37916-2\_5.
17. Черемисин, В. Т. Результаты оценки режимов работы активных и пассивных постов секционирования в системе тягового электроснабжения с целью выбора параметров накопителей электроэнергии / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба.– 2017. – № 3 (31). – С. 132 – 143.
18. Незевак, В. Л. Моделирование режимов работы накопителя электроэнергии на шинах поста секционирования в условиях пропуска тяжеловесных поездов / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 3 (59). – С. 47 – 57.
19. Черемисин, В. Т. Перспективы применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – № 2. – С. 33 – 44.
20. Незевак, В. Л. Моделирование процессов работы гибридного накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения на физической модели. Часть 1 / В. Л. Незевак, Ю. В. Плотников, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 1. – С. 33 – 37.
21. Незевак, В. Л. Моделирование процессов работы гибридного накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения на физической модели. Часть 2 / В. Л. Незевак,

Ю. В. Плотников, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 2. – С. 26 – 30.

## References

1. *Setevye nakopiteli elektroenergii* (SNE): Liotech (Network power storage devices: Liotech), Available at: <https://www.liotech.ru/products/batarei-i-nakopiteli/setevye-nakopiteli-energii/> (accessed 17 January 2020).
2. *Litij-ionnye akkumulyatory: Liotech* (Lithium-ion batteries: Liotech), Available at: <https://www.liotech.ru/products/akkumulyatory/> (accessed 17 January 2020).
22. Maddukuri, S., Malka, D., Chae, M. S., Elias, Y., Luski, S., & Aurbach, D. (2020). On the Challenge of Large Energy Storage by Electrochemical Devices. *Electrochimica Acta*, 136771. doi:10.1016/j.electacta.2020.136771.
23. Chen, X., Hu, S., Liu, Y., Ali, A., Li, S., Zhang, X., Shen, P. K. (2020). Membrane and electrode engineering of high-performance lithium-sulfur batteries modified by stereotaxically-constructed graphene. *Journal of Alloys and Compounds*, 155096. doi:10.1016/j.jallcom.2020.155096.
24. Zhou, Y., Shan, W., Hou, X., Lam, K., Zhao, X., Liu, X., & Wu, Y. (2020). Study of spherical  $\text{Li}_{1.2-x}\text{Na}_x\text{Mn}_{0.534}\text{Ni}_{0.133}\text{Co}_{0.133}\text{O}_2$  cathode based on dual  $\text{Li}^+/\text{Na}^+$  transport system for Li-ion batteries. *Solid State Ionics*, 350, 115326. doi:10.1016/j.ssi.2020.115326.
25. Moncecchi, M., Brivio, C., Mandelli, S., & Merlo, M. (2020). Battery Energy Storage Systems in Microgrids: Modeling and Design Criteria. *Energies*, 13(8), 2006. doi:10.3390/en13082006.
26. Cha, E., Patel, M., Bhoyate, S., Prasad, V., & Choi, W. (2020). Nanoengineering to achieve high efficiency practical lithium-sulfur batteries. *Nanoscale Horizons*. doi:10.1039/c9nh00730j.
8. Evstafev, A. M. Estimation of the energy intensity of an onboard energy storage device for traction rolling stock [Ocenka energoemkosti bortovogo nakopitelya energii dlya tyagovogo podvizhnogo sostava]. *BRNI – BRNI*, 2018, № 2. pp. 7 – 15, Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-energoemkosti-bortovogo-nakopitelya-energii-dlya-tyagovogo-podvizhnogo-sostava> (accessed 02 October 2019).
9. Shevlyugin M. V., Ermolenko D. V., Stadnikov A. N. Experience in starting electric rolling stock using «accumulative» traction substations on the Moscow metro [Opyt puska elektropodvizhnogo sostava pri pomoshchi «nakopitel'nyh» tyagovyh podstancij na moskovskom metropolitene]. *Elektrotehnika – Electrical engineering*, 2017, no. 11, pp. 75 – 80.
27. He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of Lithium-ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach, *Energies*, 2011, vol. 4(4), pp. 582 – 598.
28. Nezevak V., Cheremisin V., Shatokhin A. Assessment of energy intensity of the drive for traction power supply system, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 982, pp. 524 – 538.
12. Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Sarkenov S. S. Assessment of the impact of packet traffic organization on the amount of electric power on traction in DC sections with type I profile [Ocenka vliyaniya paketnoj organizacii dvizheniya na ob'em elektroenergii na tyagu na uchastkah postoyanogo toka s I tipom profilya]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. – Modern technology. System analysis. Modeling*, 2017, no. 3 (55), pp. 135 – 144.
13. Nezevak V. L., Shatohin A. P. The monitoring of the execution of the specific regeneration's norms within the ambit of the arbitrary monitoring's area of the dc area [Monitoring vpolneniya norm udel'noj rekuperacii v granicah proizvod'noj zony monitoringa uchastka postoyanogo toka]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 2 (22), pp. 87 – 96.
14. Nezevak V. L., Shatohin A. P. Characteristics of the traction load for determining the parameters of an electric energy storage device [Harakteristika tyagovoj nagruzki dlya opredeleniya

parametrov nakopatelya elektri-cheskoj energii ]. *Mir transporta – The world of transport*, 2018, vol. 16, no. 2 (75), pp. 84 – 94.

29. Nezevak, V., Cheremisin, V., Shatokhin, A. (2019). Operating modes of electric energy storage systems on the Moscow central ring, *E3S Web of Conferences*, 135, 01063, doi:10.1051/e3sconf/201913501063.

30. Nezevak V. L., Cheremisin V. T., Shatokhin A. P. (2020). Electric energy storage units applicability assessment of different kinds in the conditions of Moscow central ring, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, V. 1115, pp. 42 – 51, doi: 10.1007/978-3-030-37916-2\_5.

17. Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Erbes V. V. Results of evaluation of operating modes active and passive sectioning posts in the traction power supply system for the purpose of electricity storage device parameters selection [Rezultaty ocenki rezhimov raboty aktivnyh i passivnyh postov sekcionirovaniya v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya s cel'yu vybora parametrov nakopitelej elektroenergii]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017. no. 3 (31), pp. 132 – 143.

18. Nezevak V. L. Simulation of the modes of operation of the electric power storage on the tires of the sectioning post in the conditions of passing heavy trains [Modelirovanie rezhimov raboty nakopatelya elektroenergii na shinah posta sekcionirovaniya v usloviyah propuska tyazhe-lovesnyh poezdov]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. – Modern technology. System analysis. Modeling*, 2018, no. 3 (59), pp. 47 – 57.

19. Cheremisin V. T., Nezevak V. L. Prospects for the use of power storage systems on the Moscow Central ring [Perspektivy primeneniya sistem nakopleniya elektroenergii na Moskovskom central'nom kol'ce]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij – Bulletin of research results*, 2020, no. 2, pp. 33 – 44.

20. Nezevak V. L., Plotnikov Yu. V., Shatokhin A. P. Modeling of hybrid power storage processes in a traction power supply system on a physical model. Part 1 [Modelirovanie processov raboty gibridnogo nakopatelya elektro-energii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya na fizi-cheskoj modeli. Chast' 1]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Transport electronics and electrical equipment*, 2020, no. 1, pp. 33 – 37.

21. Nezevak V. L., Plotnikov Yu. V., Shatokhin A. P. Modeling of hybrid power storage processes in a traction power supply system on a physical model. Part 2 [Modelirovanie processov raboty gibridnogo nakopatelya elektro-energii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya na fizi-cheskoj modeli. Chast' 2]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Transport electronics and electrical equipment*, 2020, no. 2, pp. 26 – 30.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nezevakwl@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nezevakwl@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Незевак, В. Л. Определение мощности и энергоёмкости систем накопления электроэнергии для улучшения эксплуатационных показателей тягового электро-снабжения / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 9 – 25.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nezevak V. L. Determination of power and energy intensity energy storage systems for improvement performance indicators of traction power supply. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 9 – 25 (In Russian).

УДК 620.193

**А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, К. И. Фомиченко, А. А. Запрудский**  
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОРРОЗИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ С ОЦЕНКОЙ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований по образованию продуктов коррозии в результате воздействия на железобетонные конструкции агрессивной среды и электрического тока. Обсуждаются способы создания образцов с искусственной электрокоррозией в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Приведены результаты испытаний образцов с использованием рентгенографического метода и моделирования их прочностных характеристик.

**Ключевые слова:** железобетонные конструкции, дефекты коррозии, рентгенографический метод, моделирование прочности.

**Andrey A. Kuznetsov, Anton V. Ponomarev, Kirill I. Fomichenko, Alexandr A. Zaprudskiy**  
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## ANALYSIS OF CORROSION PROCESS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH STRENGTH PARAMETERS ESTIMATION

**Abstract.** This article contains results of experimental studies on the formation of corrosion products as a result of aggressive environment and electric currents action on the reinforced concrete structures. There are discussed a method of creating models with artificial electrocorrosion under conditions close to real working. The results of testing models using the X-ray method and modeling their strength characteristics are presented.

**Keywords:** reinforced concrete structures, corrosion defects, X-ray method, strength characteristics modeling.

Диагностирование коррозионного состояния полых железобетонных конструкций, к которым относятся опоры контактной сети железных дорог постоянного тока, является актуальной задачей. В эксплуатации используется более 1 млн опор, многие из которых могут находиться в аварийном состоянии. Большое значение имеют методы диагностирования, выявляющие дефекты, в первую очередь потерю прочности, обусловленные коррозией арматурных стержней и бетонного камня.

Известен ряд методов неразрушающего контроля, основанных на ультразвуковом, электрохимическом и визуальном контроле. Их преимущества и недостатки описаны в работах [1 – 3]. В предлагаемой статье обсуждается использование рентгенографического метода по определению потери металла арматурных стержней, последующего использования приборов лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (ЛИЭС) для обнаружения продуктов коррозии на поверхности железобетонных конструкций [4]. Помимо этого обсуждаются вопросы создания лабораторных образцов с различной степенью коррозии, аналогичной для реальных конструкций. Приведены результаты моделирования прочности элементов железобетонных конструкций с разным диаметром арматурных стержней.

Лабораторные образцы, исследуемые в работе, представляют собой бетонные блоки размером 200 × 60 × 60 мм с металлической арматурой в центре диаметром 10 мм и длиной 200 мм. Арматура выходит от верхней поверхности бетонного образца на 30 мм.

Для проведения эксперимента были подготовлены образцы без отверстий, а также образцы, в которых были выполнены отверстия диаметром 2 мм перпендикулярно оси от поверхности до арматуры, моделирующие трещины в бетоне:

- без отверстий (обозначение – БО);
- одно отверстие (1О);
- два отверстия (2О);
- четыре отверстия (4О, рисунок 1).

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Технология изготовления соответствует технологии изготовления реальных железобетонных опор контактной сети. Цемент соответствует марке М350, а класс бетона по прочности – В30. Бетон состоит из цемента, песка, щебня (керамзит) и воды. Щебень и песок являются заполнителями бетонной смеси, а цемент – связующим веществом. Раствор замешан в отношении 1/1,9/3,7/0,5 (цемент/песок/щебень/вода). Стальная арматура соответствует классу А-III по ГОСТ 5781. Марка стальной арматуры 25Г2С, химический состав которой представлен в таблице 1.

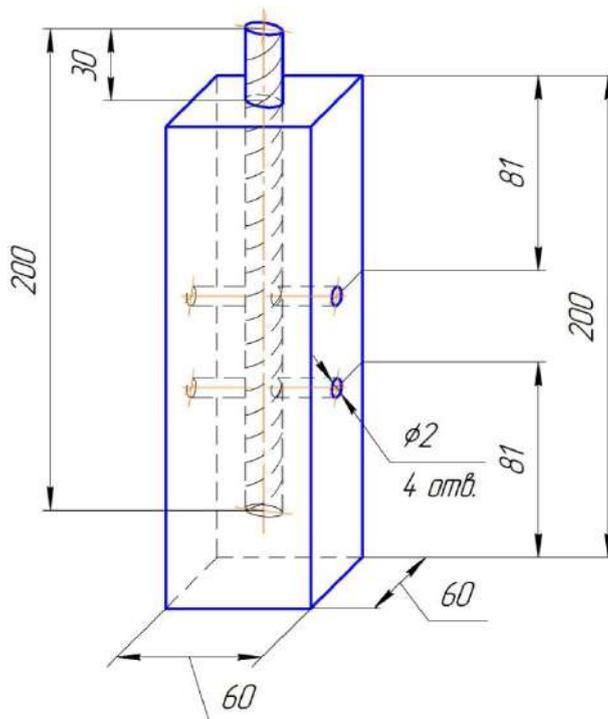


Рисунок 1 – Схематичное изображение лабораторного образца с четырьмя отверстиями (4О)

Таблица 1 – Химический состав арматурной стали марки 25Г2С

С, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	Ni, %	S, %	P, %	Cu, %
0,20-0,29	1,20-1,60	0,60-0,90	≤0,30	≤0,30	≤0,045	≤0,04	≤0,30

Образцы подключались к внешнему источнику напряжения, что соответствует реальным условиям эксплуатации опор контактной сети. В трех ваннах, заполненных 3 %-ным раствором NaCl, находилось по четыре образца, арматура которых соединялась электрическим проводником. Время воздействия электрического тока и параметры источника питания приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сводная таблица данных по эксперименту

Номер ванны	Обозначение образцов	Кол-во образцов	Напряжение источника, В	Среднее значение тока, А	Время включения тока, ч
1	1В2О	2	5	0,40	102
	1В4О	2			
2	2В1О	2		0,45	102
	2В2О	2			
3	3ВБО	4		0,30	78

Подключение внешнего источника питания позволяет имитировать воздействие токов утечки и блуждающих токов от электрифицированного рельсового транспорта. Место стека-

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ния электрического тока с арматуры является анодом – на нем происходит окисление железа. Слой бетона будет выступать в качестве электролита, насыщенного различными ионами, где будет проходить процесс электролиза. В качестве катода выступает медная пластина. Расположение образцов в электролитической ванне представлено на рисунках 2, 3.

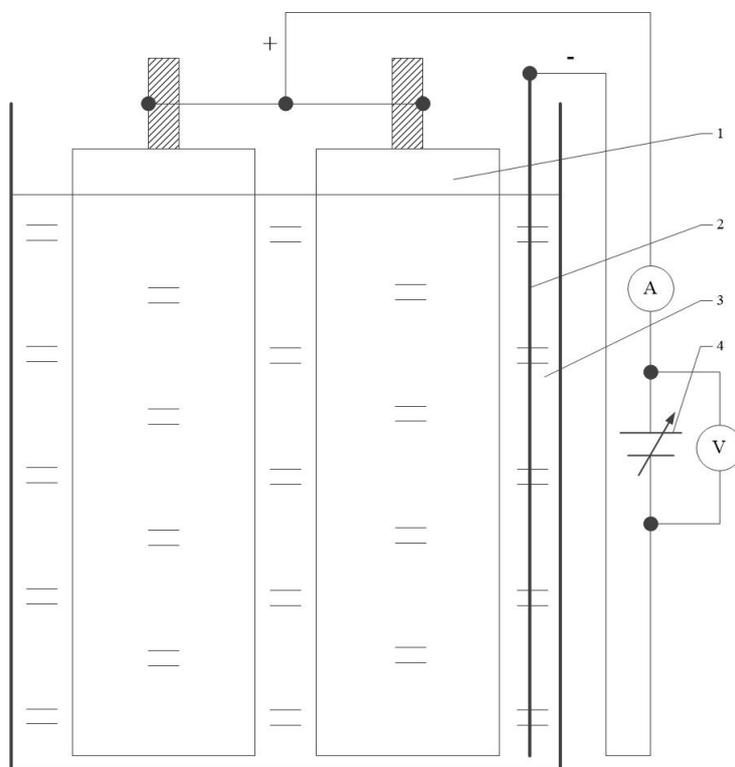


Рисунок 2 – Схема проведения электролиза (вид сбоку): 1 – лабораторный образец; 2 – медная пластина; 3 – раствор NaCl; 4 – регулируемый источник питания постоянного тока

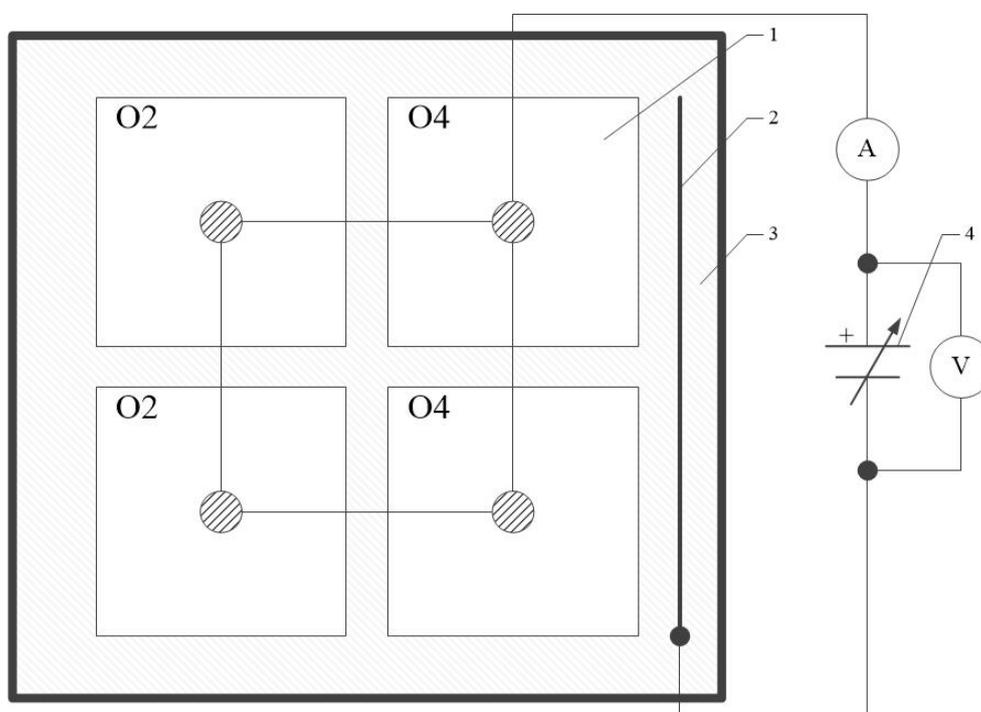


Рисунок 3 – Схема проведения электролиза (ванна 1): 1 – лабораторный образец; 2 – медная пластина; 3 – раствор NaCl; 4 – регулируемый источник питания постоянного тока

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Параметры прочности во многом определяются состоянием арматурных стержней, степенью их сцепления с бетонным камнем. Фотографии визуального состояния образцов после электролиза представлены на рисунках 4, а и 5, а. Рентгеновские снимки тех же образцов во взаимно перпендикулярных положениях показаны на рисунках 4, б, в и 5, б, в.

Как видно из указанных рисунков, наибольшей коррозии при использованной схеме электролиза подверглись верхние участки арматурных стержней (см. рисунки 5, б, в), что обусловлено контактом с атмосферным воздухом, наличием агрессивной среды и протеканием электрического тока. Потеря металла по площади поперечного сечения для испытуемых образцов составляла до 43 %.

Другой случай потери металла арматурных стержней наблюдался для дефектов сплошности железобетонного образца. Через отверстие, имитирующее трещину, в электролит переносились продукты коррозии, состоящие из оксидов железа. На рисунке 4, а показан след от оксидов железа, перенесенных от поверхности арматурного стержня через отверстие, имитирующее трещину, на поверхность бетона. В нижней части арматурного стержня (см. рисунок 4, б) показан выход металла напротив сквозного отверстия от поверхности бетона до арматурного стержня. Потеря металла по площади поперечного сечения для образца 1В20 составила 15,9 %.

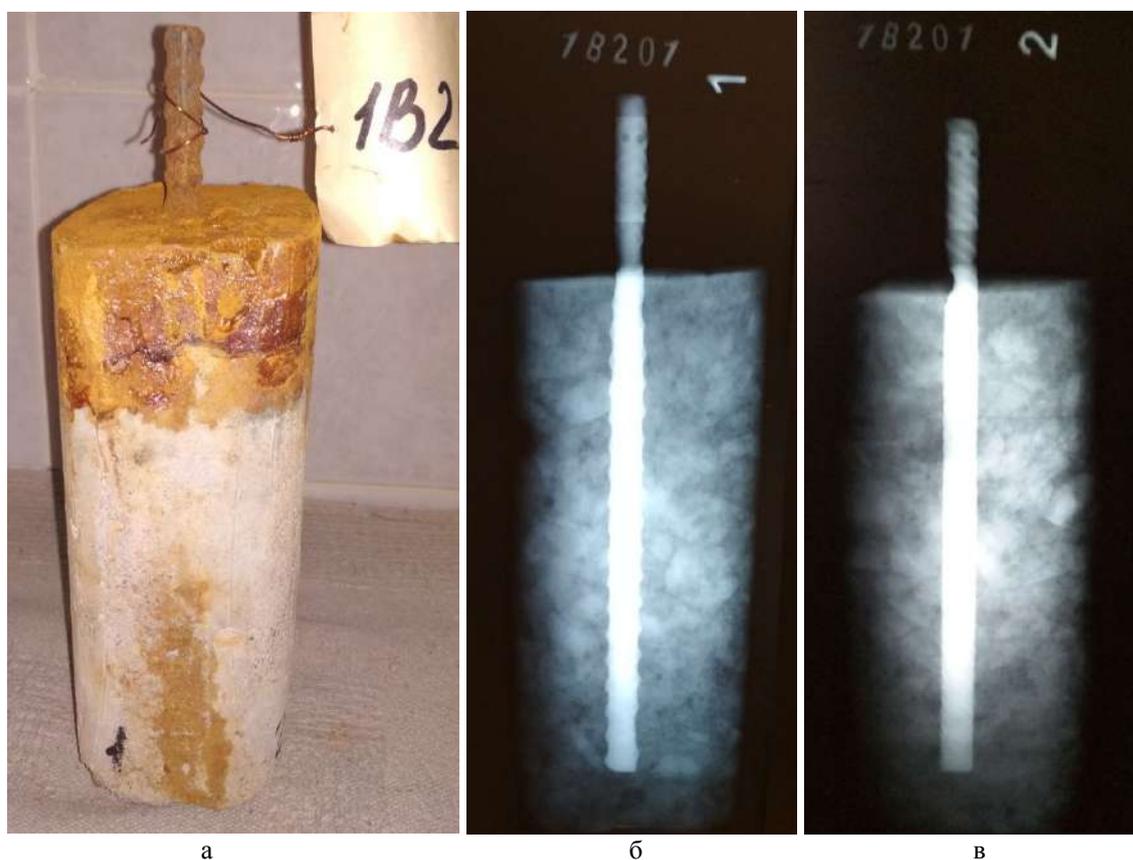


Рисунок 4 – Внешний вид (а) и рентгеновские снимки (б, в) образца 1В20

Для моделирования процессов, происходящих в железобетоне под нагрузкой [5], был использован программный комплекс *ABAQUS* [6, 7]. Данный программный комплекс конечноэлементного моделирования предназначен для проведения многоцелевого прочностного анализа поведения сложных конструкций. Преимуществом данного комплекса является возможность учитывать нелинейные физико-механические свойства бетона и арматуры, для чего в программе имеются следующие модели деформирования и прочности бетона:

*Concrete Smeared Cracking* моделирует монотонно изменяющиеся нагрузки на железобетонные конструкции;

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

*Cracking Model for Concrete (Brittle Cracking)* позволяет прогнозировать трещинообразование при растяжении;

*Concrete Damage Plasticity* моделирует поведение при статических, циклических и динамических нагрузках на железобетон.

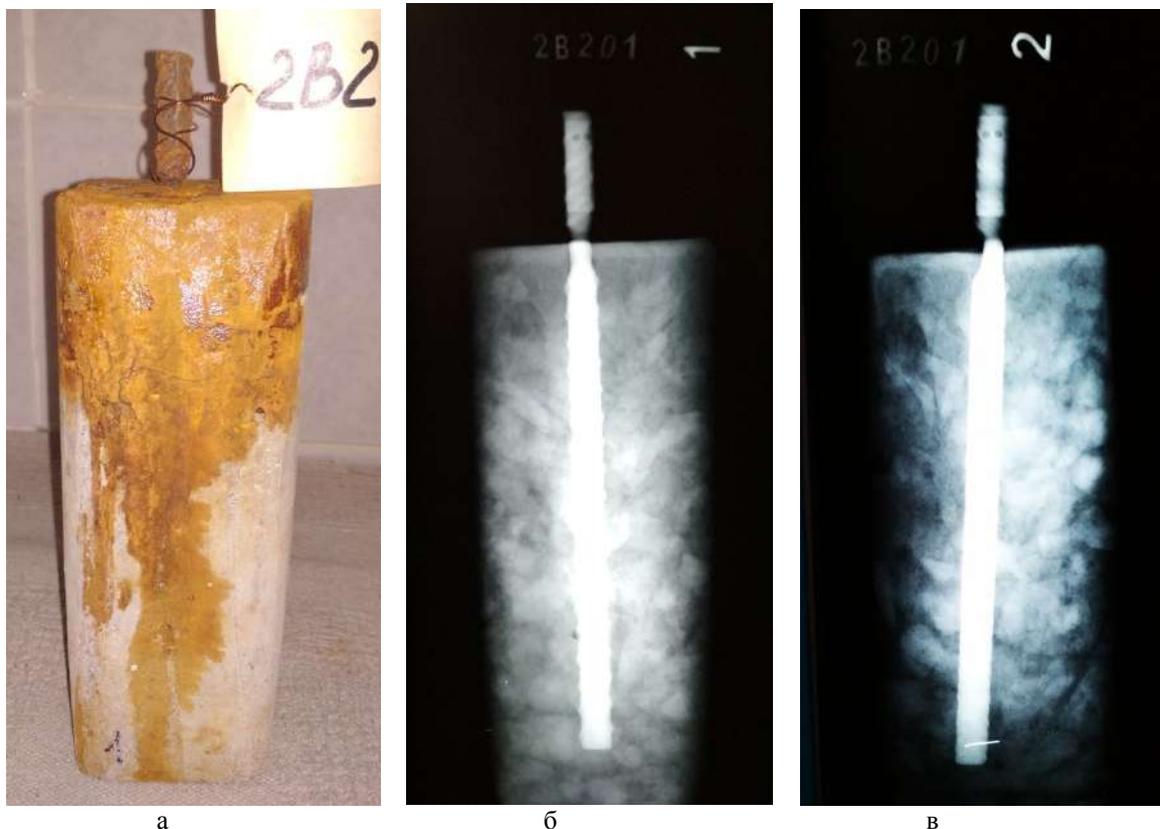


Рисунок 5 – Внешний вид (а) и рентгеновские снимки (б, в) образца 2B20

Для оценки прочности при различном сечении арматуры в программном комплексе была смоделирована бетонная балка с размерами  $60 \times 60 \times 1500$  мм (рисунок 6). Для нее были заданы характеристики модели *Concrete Damage Plasticity* в соответствии с исследуемой маркой бетона.

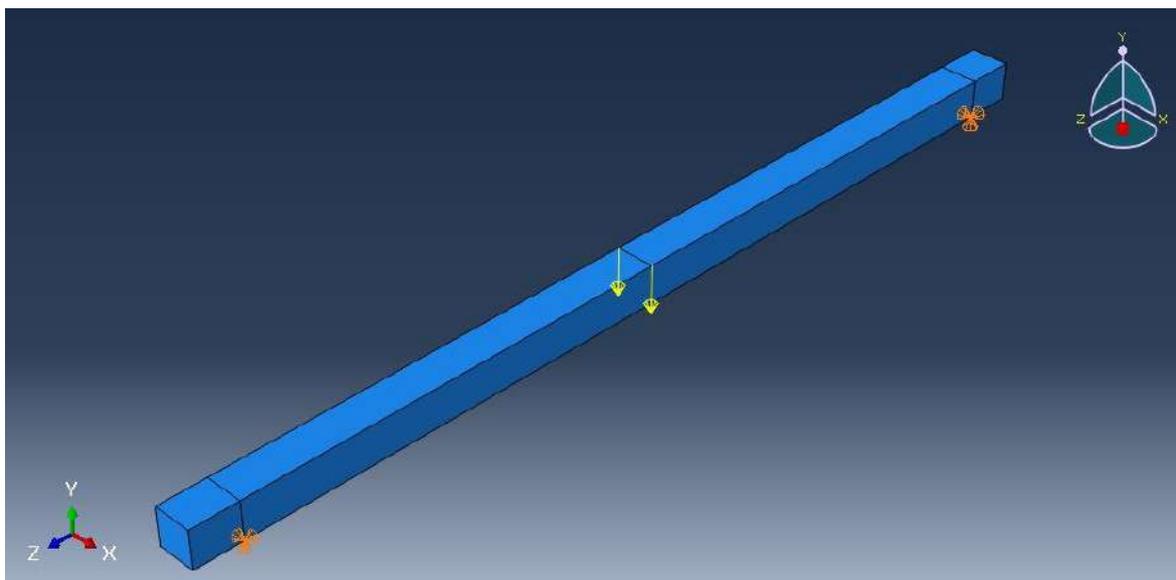


Рисунок 6 – Схема испытания бетонной балки с арматурным стержнем

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Металлическая арматура с заданными свойствами соответствует приведенной выше марке стали. Арматура внедрена в бетон с помощью инструмента *Embedded region*. Использование данного инструмента позволяет внедрять внутрь объекта элементы с другими свойствами, за счет чего поступательные степени свободы внедренного элемента (арматуры) рассчитываются в соответствии со значениями степеней свободы основного объекта (бетонного камня).

Балка была закреплена с отступом от края с возможностью вращательного движения вокруг оси закрепления. К средней части была приложена концентрированная нагрузка от 2000 до 5000 Н (рисунки 7, 8).

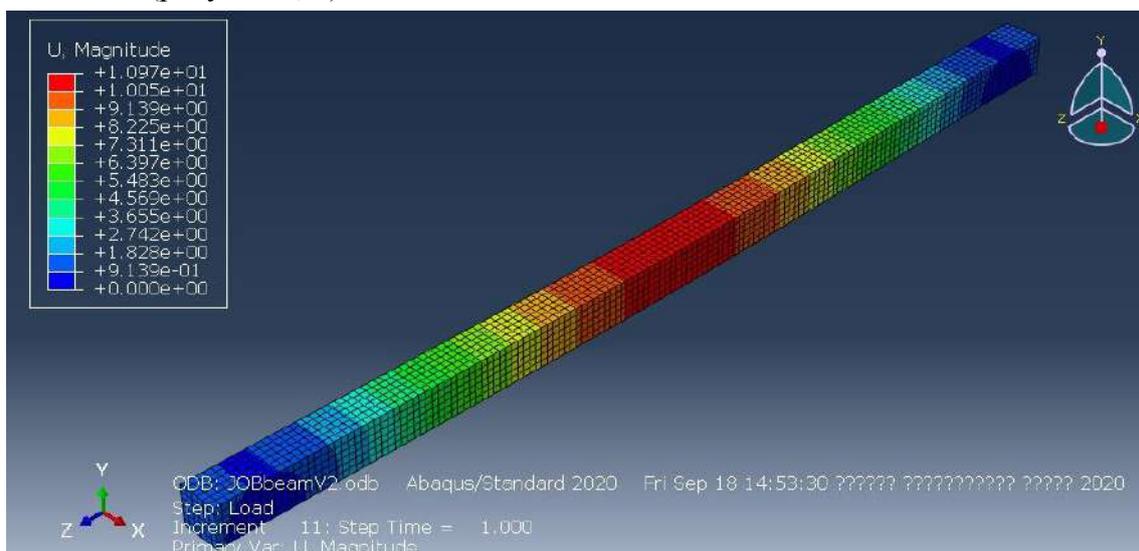


Рисунок 7 – Результат моделирования прогиба балки с арматурой 8 мм и нагрузкой 5000 Н

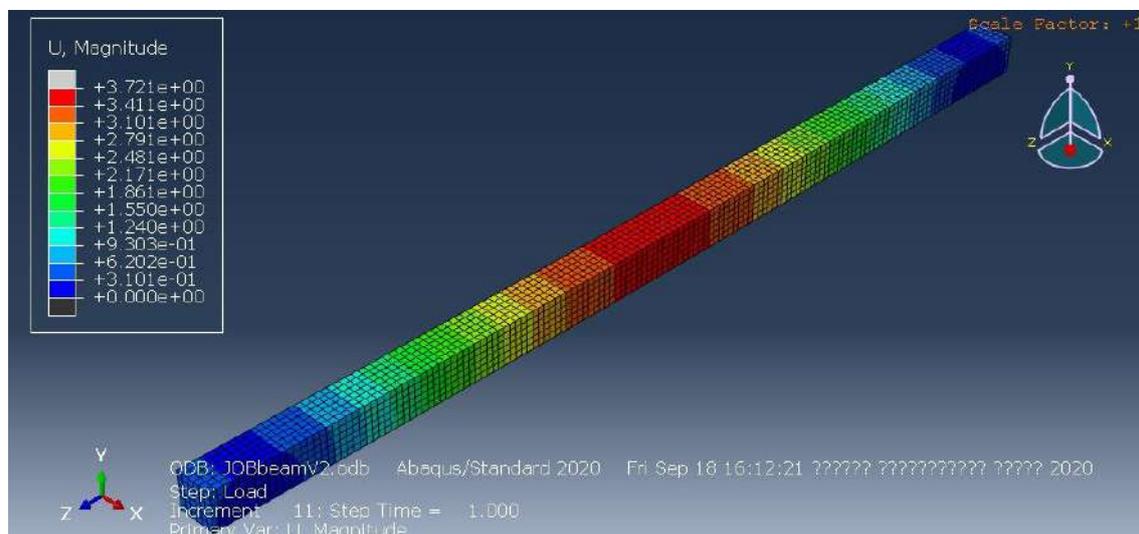


Рисунок 8 – Результат моделирования прогиба балки с арматурой 12 мм и нагрузкой 2000 Н

Численные значения максимального прогиба железобетонной балки с различными сечениями арматурного стержня и с различным значением приложенной нагрузки приведены в таблице 3. Графическое представление прогиба балки показано на рисунке 9

Таблица 3 – Прогиб балки в зависимости от сечения арматуры и нагрузки

Диаметр арматуры, мм	Величина максимального прогиба, мм, при нагрузке	
	2000 Н	5000 Н
12	3,538	10,67
10	3,773	10,83
8	3,821	10,97

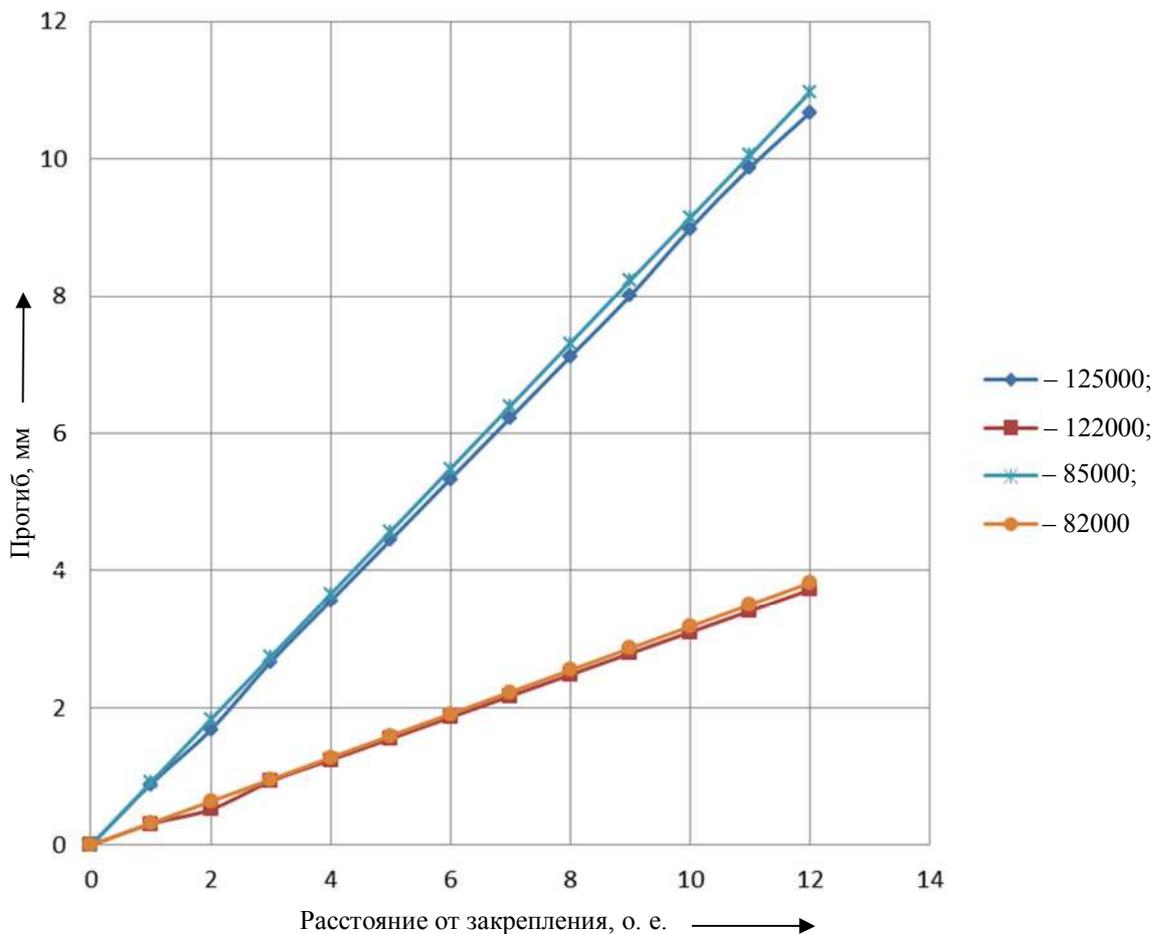


Рисунок 9 – Изменение прогиба в зависимости от сечения арматуры и приложенной нагрузки

В статье показан вариант изменения прочностных характеристик железобетонных конструкций при возникновении процесса коррозии с изменением диаметра арматурных стержней. Показано, что опасными местами являются участки, на которых образовались трещины, способствующие выходу продуктов коррозии на поверхность железобетонного изделия. Последующие исследования будут направлены на моделирование заданной железобетонной конструкции с приложением сил, возникающих при эксплуатации опор контактной сети. Определение изменения диаметра арматурных стержней будет продолжено методом определения концентрации продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий с применением оптических и спектральных методов [8 – 10].

### Список литературы

1. Кузнецов, А. А. Определение количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 160 – 164.
2. Кандаев, В. А. Метод определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. В. Колесник, А. В. Пономарев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 1 (25). – С. 54 – 60.
3. Кандаев, В. А. Программный модуль формирования панорамного изображения внутренней поверхности подземной части пустотелых железобетонных опор контактной сети и анализа распознанных неоднородностей / В. А. Кандаев, М. А. Леденёв, А. В. Пономарев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 99 – 105.

4. Labutin T. A., Popov, A. M., Zaytsev S. M., Zorov N. B., Belkov M. V., Kiris V. V., Raikov S. N. Determination of chlorine, sulfur and carbon in reinforced concrete structures by double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy, *Spectrochimica Acta. Part B-Atomic Spectroscopy*, 2014, no. 99, pp. 94 – 100.

5. Nada Curović, Concrete poles of transmission lines on the end of service life, *Journal of Applied Engineering Science*, 2016, no. 14, pp. 361 – 366.

6. Masoud Zabihi-Samani, Mohsenali Shayanfar, Amir Safiey, Amir Najari, Simulation of the Behavior of Corrosion Damaged Reinforced Concrete Beams with/without CFRP Retrofit, *Civil Engineering Journal*, 2018, no. 5, (4), pp. 679 – 689.

7. Mehran Zeinalian, Mehrdad Zamani Khorasgani, Structural performance of concrete poles used in electric power distribution network, *Civil and Mechanical Engineering*, 2018, no. 7, pp. 863 – 876.

8. Alfred Ng. Video Endoscopic Metrology for Pipeline Welding, *Singapore International NDT Conference & Exhibition*, 2013, no. 7, pp. 124 – 128.

9. Кузнецов, А. А. Система позиционирования оптического зонда для исследования внутренних поверхностей полых железобетонных конструкций / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова, Ю. В. Демин. – Текст : непосредственный // *Известия вузов. Приборостроение*. – 2019. – Т. 62. – № 3. – С. 157 – 166.

10. Кандаев, В. А. Программное повышение качества изображений, полученных в условиях недостаточной освещенности / В. А. Кандаев, М. А. Леденёв, А. В. Пономарев. – Текст : непосредственный // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. – 2015. – № 2 (4). – С. 35 – 38.

### References

1. Kuznetsov A. A., Bryukhova A. S. Determination of quantitative content corrosion products on concrete products surface [Opredelenie kolichestvennogo sodержaniya produktov korrozii na poverhnosti zhelezobetonnyh izdelij]. *Omskij nauchnyj vestnik – The journal of Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 6 (162), pp. 160 – 164.

2. Kandaev V. A., Avdeeva K. V., Kolesnik A. V., Ponomarev A. V. Method of corrosion state determining of contact system concrete poles [Metod opredeleniya korrozionnogo sostojaniya podzemnoj chasti zhelezobetonnyh opor kontaktnoj seti]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 1 (25), pp. 54 – 60.

3. Kandaev V. A., Ledenjov M. A., Ponomarev A. V. The software module of formation of the panoramic image of an internal surface of an underground part of hollow reinforced concrete support of contact network and the analysis of the recognizable inhomogeneities [Programmnyj modul' formirovaniya panoramnogo izobrazhenija vnutrennej poverhnosti podzemnoj chasti pustotelyh zhelezobetonnyh opor kontaktnoj seti i analiza raspoznannyh neodnorodnostej]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 1 (29), pp. 99 – 105.

4. Labutin T. A., Popov, A. M., Zaytsev S. M., Zorov N. B., Belkov M. V., Kiris V. V., Raikov S. N. Determination of chlorine, sulfur and carbon in reinforced concrete structures by double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy, *Spectrochimica Acta. Part B-Atomic Spectroscopy*, 2014, no. 99, pp. 94 – 100.

5. Nada Curović, Concrete poles of transmission lines on the end of service life, *Journal of Applied Engineering Science*, 2016, no. 14, pp. 361 – 366.

6. Masoud Zabihi-Samani, Mohsenali Shayanfar, Amir Safiey, Amir Najari, Simulation of the Behavior of Corrosion Damaged Reinforced Concrete Beams with/without CFRP Retrofit, *Civil Engineering Journal*, 2018, no. 5, (4), pp. 679 – 689.

7. Mehran Zeinalian, Mehrdad Zamani Khorasgani, Structural performance of concrete poles used in electric power distribution network, *Civil and Mechanical Engineering*, 2018, no. 7, pp. 863 – 876.

8. Alfred Ng. Video Endoscopic Metrology for Pipeline Welding, Singapore International NDT Conference & Exhibition, 2013, no. 7, pp. 124 – 128.

9. Kuznetsov A. A., Brjuhova A. S., Demin Ju. V. System of optical probe positioning for diagnosing internal surface of hollow reinforced concrete structures [Sistema pozicionirovaniya opticheskogo zonda dlja issledovaniya vnutrennih poverhnostey polyh zhelezobetonnykh konstrukcij]. *Izvestija vuzov. Priborostroenie – The journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 62, no. 3, pp. 157 – 166.

10. Kandaev V. A., Ledenjov M. A., Ponomarev A. V Software enhancement of image obtained in low light conditions [Programmnoe povyshenie kachestva izobrazheniy poluchaemykh v usloviyah nedostatochnoy osveshennosti]. *Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona – Pacific Rim countries transportation system*, 2015, no. 2 (4), pp. 35 – 38.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Кузнецов Андрей Альбертович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: 8-904-321-50-90.

E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

### Пономарев Антон Витальевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: 8-923-690-48-28.

E-mail: antonyswork@gmail.com

### Фомиченко Кирилл Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Магистрант, ОмГУПС.

### Запрудский Александр Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информатика и компьютерная графика», ОмГУПС.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кузнецов, А. А. Исследование процесса коррозии железобетонных опор контактной сети с оценкой параметров прочности / А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, К. И. Фомиченко, А. А. Запрудский. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 26 – 34.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Kuznetsov Andrey Albertovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Dr. Tech. Sci., professor, head of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: 8-904-321-50-90.

E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

### Ponomarev Anton Vitalievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of chair «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Тел.: 8-923-690-48-28.

E-mail: antonyswork@gmail.com

### Fomichenko Kirill Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Student, OSTU.

### Zaprudskiy Alexandr Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of chair «Informatics and computer graphics», OSTU.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kuznetsov A. A., Ponomarev A. V., Fomichenko K. I., Zaprudskiy A. A. Analysis of corrosion process in reinforced concrete structures with strength parameters estimation. *The Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 26 – 34 (In Russian).

УДК 629.426(045)

**Н. В. Грачев**

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна, Российская Федерация

## АНАЛИЗ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОТУРБОВОЗОВ

**Аннотация.** Статья посвящена одной из актуальных проблем в деятельности ОАО «РЖД» – повышению показателей энергоэффективности работы локомотивов, а именно локомотивов нового поколения, работающих на сжиженном природном газе (СПГ), – газотурбовозов серии ГТ1h. Представлены результаты анализа типовых диаграмм тяговой работы при вождении поездов газотурбовозом на участке Сургут – Войновка Свердловской железной дороги. Предложены мероприятия, позволяющие снизить удельный расход топлива, используемого на тягу поездов, для различных режимов работы газотурбовоза (режима тяги, холостого хода, переходных режимов). Дано обоснование и описание выбранных технических решений по снижению расхода топлива системой «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» при работе газотурбовоза в режимах холостого хода и тяги. Представлены результаты испытаний газотурбовоза при работе на холостом ходу и в режиме тяги с использованием предложенных технических решений. Проведен сравнительный анализ полученных результатов и дана экономическая оценка эффективности выбранных мероприятий при работе газотурбовоза в режимах холостого хода и тяги. Предложена математическая модель тягового электропривода и системы автоматического регулирования газотурбовоза, разработанная с использованием среды Matlab Simulink и предназначенная для исследования работы и оптимизации электромагнитных процессов, происходящих в тяговом электроприводе газотурбовоза в различных режимах его работы. По результатам моделирования алгоритмов работы системы автоматического регулирования (САР), позволяющих обеспечить энергооптимальные траектории нагружения системы «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» во всем диапазоне регулирования мощности, дана экономическая оценка эффективности работы алгоритмов САР. Представлена экономическая оценка внедрения комплекса предложенных мероприятий по повышению энергоэффективности газотурбовозов.

**Ключевые слова:** сжиженный природный газ, расход топлива, тяга поездов, газотурбинный двигатель, газотурбовоз.

**Nikolay V. Grachev**

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «ВНИКТИ»),  
Kolomna, the Russian Federation

## ANALYSIS OF MEASURES TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF GAS TURBINE LOCOMOTIVES

**Abstract.** The article is devoted to one of the urgent problems in the activities of JSC “RZD” – increasing the energy efficiency indicators of locomotives, namely, new generation locomotives running on liquefied natural gas (LNG) – GT1h series gas turbine locomotives. The results are presented for the analysis of typical diagrams of traction work at hauling trains by the gas turbine locomotive on the Surgut – Voinovka section of the Sverdlovsk Railway. Measures are proposed to reduce the specific consumption of the fuel used for hauling operations for various running duties of a gas turbine locomotive (traction mode, idling, transient modes). The justification and description are given for the selected technical solutions to reduce fuel consumption by the “gas turbine engine-traction generator” system during gas turbine locomotive operation in idle and traction modes. The results of tests of the gas turbine locomotive during idling and in traction mode using the proposed technical solutions are presented. The comparative analysis of the results obtained is carried out and the economic assessment of the effectiveness of the selected measures is given when the gas turbine locomotive is operating in idle and traction modes. A mathematical model is proposed for the electric traction drive and the automatic control system of the gas turbine locomotive, developed using the Matlab Simulink environment and designed to study the operation and optimization of electromagnetic processes occurring in the electric traction drive of the gas turbine locomotive in various modes of its operation. Based on the results of modeling the algorithms for the operation of the automatic control system (CAP) allowing to provide energy-optimal loading paths for the “gas turbine engine – traction generator” system in the entire power control range, the economic assessment of the effectiveness of the CAP algorithms is given. The economic assessment is presented for the implementation of a set of proposed measures to improve the energy efficiency of gas turbine locomotives.

**Keywords:** liquefied natural gas, fuel consumption, hauling operations, gas turbine engine, gas turbine locomotive.

В «Энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2020 года», разработанной в развитие «Энергетической стратегии Российской Федерации», предусмотрено снижение удельных расходов топливно-энергетических ресурсов во всех сферах деятельности ОАО «РЖД», включая локомотивы; одновременно с этим ставится задача по использованию альтернативных видов топлива взамен дизельного на автономных локомотивах [1, 2].

Во исполнение «Энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2020 года» [1] в 2006 г. на Воронежском тепловозоремонтном заводе началось изготовление первого отечественного газотурбовоза ГТ1h-001, работающего на сжиженном природном газе – метане, а 4 июля 2008 г. была проведена первая опытная поездка газотурбовоза от ст. Смышляевка до ст. Курумоч Куйбышевской железной дороги [3].

В качестве газотурбинного двигателя (ГТД) на газотурбовозе использован газотурбинный компрессорный двухвальный двигатель со свободно вращающейся турбиной последней ступени (силовой турбиной) НК-361, созданный на базе авиационного двигателя НК-32 [4].

Необходимо отметить, что режимы работы газотурбинного двигателя в составе системы «газотурбинный двигатель – тяговый генератор», применяемой в качестве силовой установки для локомотивов на железнодорожном транспорте, существенно отличаются от режимов работы газотурбинных двигателей в авиационной промышленности и на газоперекачивающих станциях. Поэтому для накопления опыта в начальный период эксплуатации газотурбовоза ГТ1h-001 для системы «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» был выбран режим работы, при котором поддерживается постоянное число оборотов вала силовой турбины: 5400 об/мин в режиме тяги и 5000 об/мин в режиме холостого хода локомотива [5].

После окончательной доработки всех технических решений и успешного проведения всех видов испытаний на первый план выступила задача повысить энергоэффективность работы газотурбовоза. Поскольку одним из основных показателей энергоэффективности локомотивов является удельный расход топлива, затраченного на тягу поездов, то возможным решением указанной выше задачи является снижение расхода СПГ газотурбинным двигателем.

Анализ типовых диаграмм тяговой работы на предполагаемых участках эксплуатации газотурбовоза [6] показал, что от трети до половины общего времени поездок газотурбовоз работает в режиме холостого хода (рисунок 1).

Один из способов повышения энергоэффективности работы газотурбовоза состоит в снижении расхода топлива газотурбинным двигателем в режиме холостого хода. Ввиду особенностей работы двухвальной газовой турбины решением этой задачи явился перевод ГТД на холостом ходу в режим, аналогичный режиму «малого газа» для авиационных турбин, т. е. режим работы с поддержанием минимально возможных устойчивых частот вращения валов ГТД.

После проведения математического моделирования физических и механических процессов работы системы «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» с последующим их уточнением в ходе натурных экспериментов при реостатных испытаниях было установлено, что поддержание минимально возможных устойчивых частот вращения валов ГТД определяется уровнем не ниже 2700 об/мин. Дальнейшему снижению частоты вращения вала силовой турбины препятствуют физические процессы горения топлива, а именно недопустимое увеличение температуры газов перед силовой турбиной (более 500 °С) [7].

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

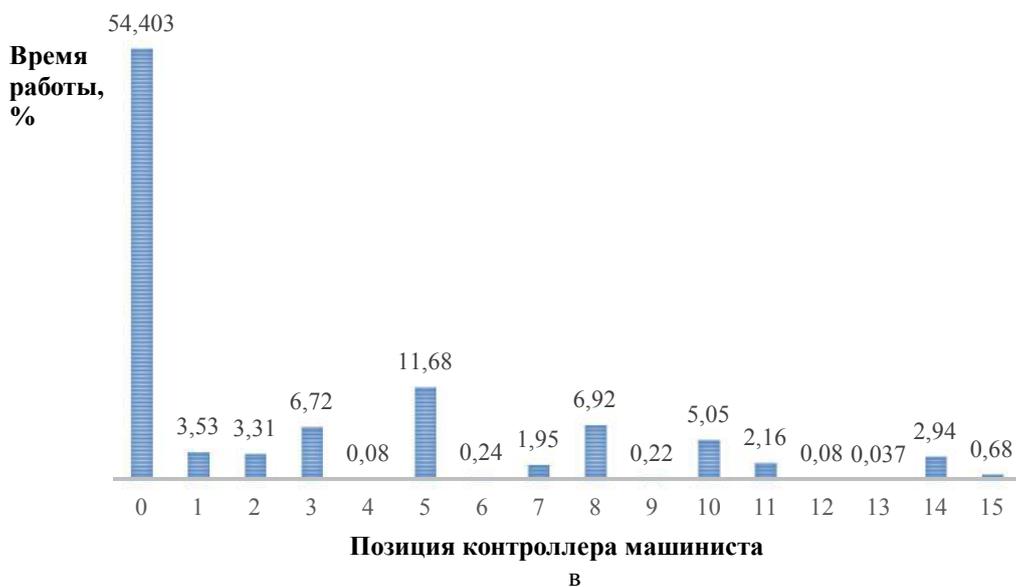
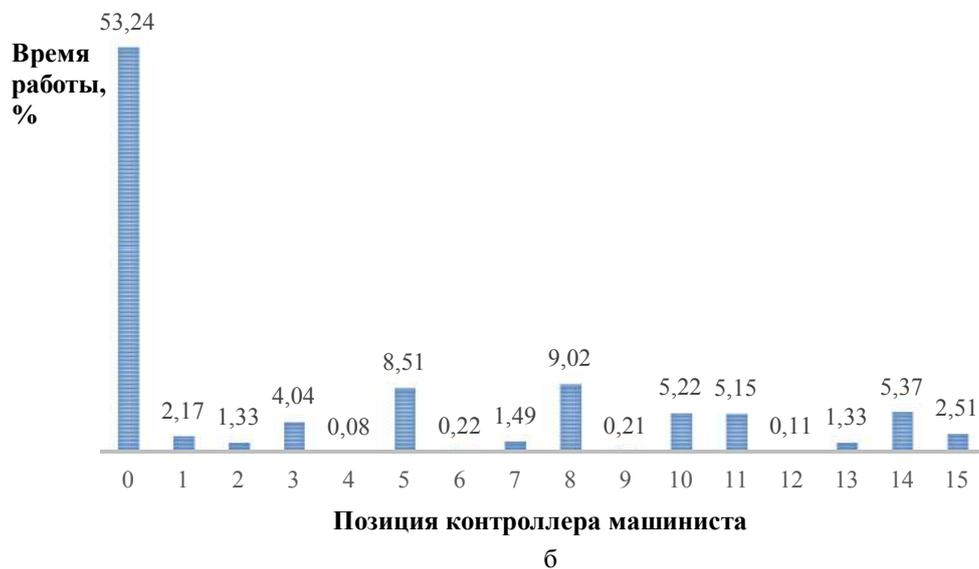
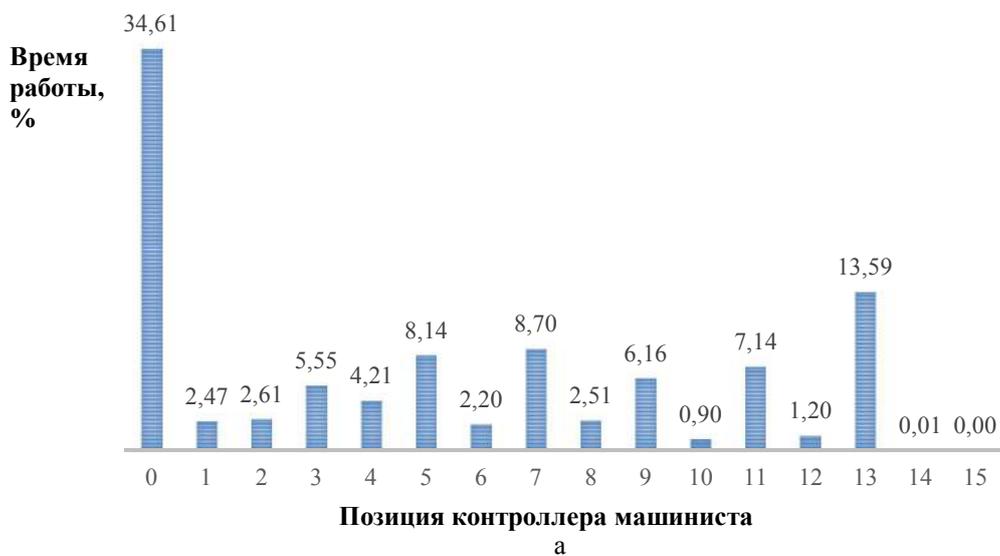


Рисунок 1 – Время работы газотурбовоза на разных позициях контроллера машиниста при выполнении тяговой работы на участках: а – Surgut – Войновка; б – Лимбей – Surgut; в – Surgut – Карачаево

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Анализ полученных данных по расходу топлива (рисунки 2, 3) показал, что при работе на холостом ходу в улучшенном режиме (с частотой вращения вала силовой турбины 2700 об/мин) расход топлива в среднем составляет 400 кг/ч, что на 200 кг/ч меньше, чем при работе на холостом ходу в штатном режиме (5000 об/мин).

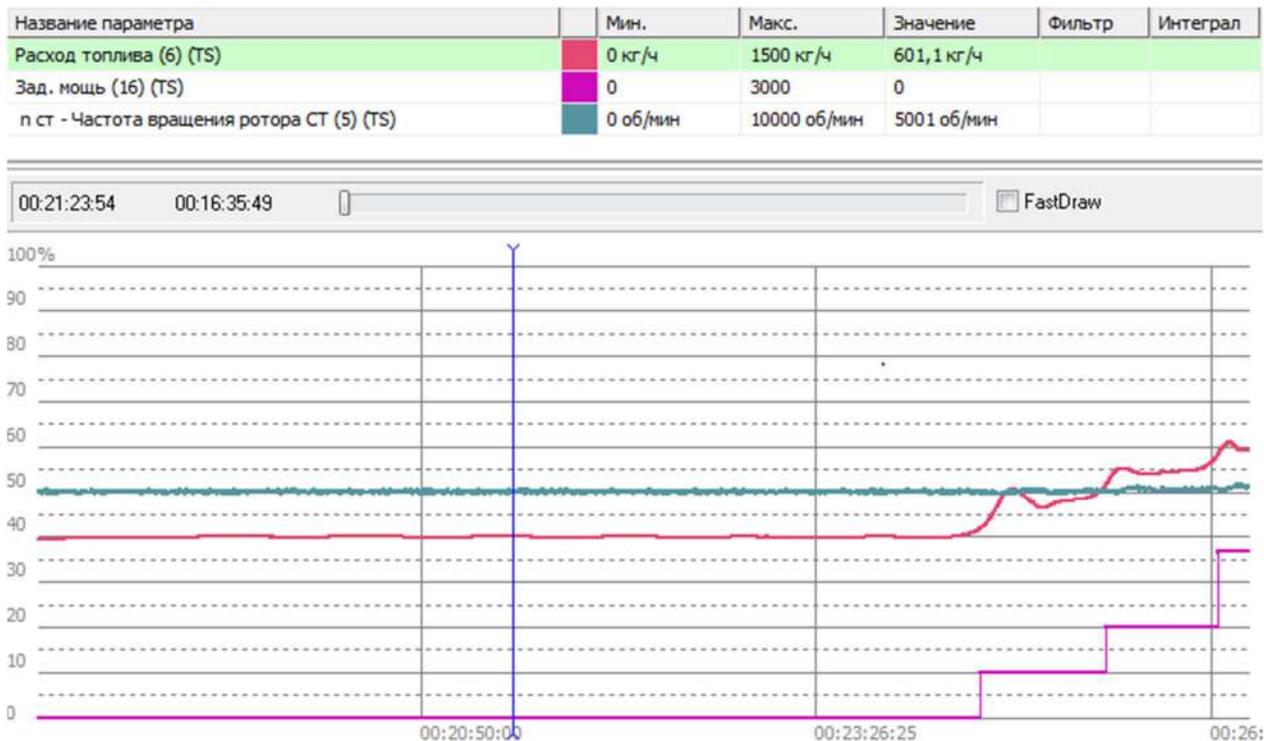


Рисунок 2 – Расход топлива при работе газотурбовоза на холостом ходу в штатном режиме



Рисунок 3 – Расход топлива при работе газотурбовоза на холостом ходу в улучшенном режиме

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Величины расхода топлива по позициям контроллера машиниста в штатном режиме представлены в таблице 1, в улучшенном – в таблице 2. На рисунке 4 представлены графики зависимости расхода топлива от заданной мощности в штатном и улучшенном режимах.

Таблица 1 – Расход топлива по позициям контроллера машиниста в штатном режиме

Номер ПКМ	Заданная мощность, кВт	Расход СПГ, кг/ч	Номер ПКМ	Заданная мощность, кВт	Расход СПГ, кг/ч
0	0	600	8	3750	1500
1	300	745	9	4300	1610
2	600	825	10	4850	1715
3	1100	930	11	5350	1810
4	1650	1035	12	5900	1870
5	2150	1135	13	6450	2020
6	2700	1255	14	6950	2130
7	3250	1380	15	7500	2250

Таблица 2 – Расход топлива по позициям контроллера машиниста в улучшенном режиме

Номер ПКМ	Заданная мощность, кВт	Расход СПГ, кг/ч	Номер ПКМ	Заданная мощность, кВт	Расход СПГ, кг/ч
0	0	400	8	3750	1470
1	300	585	9	4300	1590
2	600	705	10	4850	1705
3	1100	835	11	5350	1810
4	1650	960	12	5900	1870
5	2150	1075	13	6450	2020
6	2700	1205	14	6950	2130
7	3250	1340	15	7500	2250

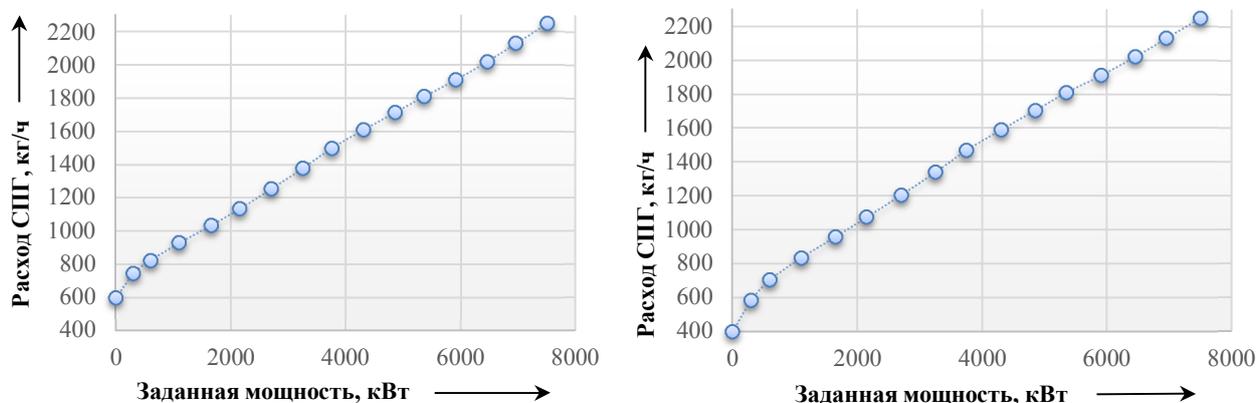


Рисунок 4 – Зависимость расхода топлива от заданной мощности: а – в штатном режиме; б – в улучшенном режиме

Сравнительный анализ величин расхода топлива системой «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» показал, что при переходе на улучшенный режим работы наибольшее снижение расхода топлива достигается в режиме холостого хода и в режиме тяги на первых позициях контроллера машиниста. С ростом заданной мощности (числа позиций контроллера) разница между величинами расхода топлива в штатном и улучшенном режимах работы снижается и на мощности, равной 5250 кВт (11-я позиция контроллера), величины расхода сравниваются. График зависимости снижения расхода топлива от заданной мощности представлен на рисунке 5.

Таким образом, экономия топлива за поездку на участках эксплуатации газотурбовоза может составить:

– Лимбей – Сургут (режим холостого хода – 7,72 ч): до 1621 кг;

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Сургут – Войновка (режим холостого хода – 4,67 ч): до 980 кг;
- Сургут – Карачаево (режим холостого хода – 8,26 ч): до 1734 кг.

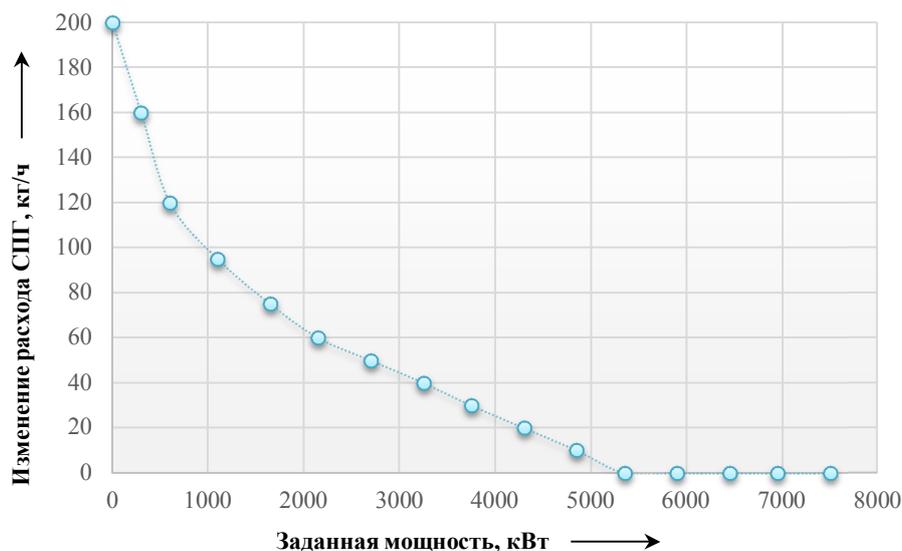


Рисунок 5 – Зависимость снижения расхода топлива от заданной мощности

Экономия удельного расхода топлива при выполнении тяговой работы на участке Лимбей – Сургут протяженностью 532 км с поездом массой 9220 т при работе ГТД на холостом ходу в улучшенном режиме может составить до 10,3 % за поездку.

Моделирование физических процессов работы ГТД показывает, что дальнейшее снижение частоты вращения вала силовой турбины в режиме холостого хода газотурбовоза возможно за счет использования принудительной подкрутки ротора турбины высокого давления ГТД штатным электростартером СТЭ-18СТ-361, предназначенным для запуска ГТД. По предварительным оценкам, подкрутка электростартером ротора турбины высокого давления позволит снизить расход топлива в режиме холостого хода до 100 кг/ч и будет обеспечивать в таком режиме приемлемую температуру газов перед силовой турбиной, а также поддерживать минимально устойчивые частоты вращения турбокомпрессоров ГТД.

Как показали расчеты, данные мероприятия позволят дополнительно снизить расход топлива при выполнении тяговой работы на участке Лимбей – Сургут до 2316 кг СПГ за поездку. При этом дополнительная экономия удельного расхода топлива на этом участке составит до 16 % топлива за поездку.

Еще одним вариантом решения задачи по увеличению энергоэффективности газотурбовоза стал перевод системы «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» в транспортный «тепловозный» режим при работе газотурбовоза в режиме тяги, который характеризуется ступенчатым повышением частоты вращения вала силовой турбины соответственно тяговой позиции контроллера машиниста (ПКМ).

По результатам математического моделирования физических процессов работы системы «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» с последующим их уточнением в ходе натурных экспериментов были сформированы следующие параметры транспортного «тепловозного» режима (таблица 3).

Анализ полученных данных по расходу топлива показал, что работа системы «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» в транспортном «тепловозном» режиме позволит дополнительно снизить расход топлива при выполнении тяговой работы на участках эксплуатации газотурбовоза до 400 кг СПГ за поездку. При этом дополнительная экономия удельного расхода топлива составит до 4 % топлива за поездку.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 3 – Параметры транспортного «тепловозного» режима

Номер ПКМ	Заданная мощность, кВт	Частота вращения вала силовой турбины, об/мин	Номер ПКМ	Заданная мощность, кВт	Частота вращения вала силовой турбины, об/мин
0	0	2700	8	3750	5100
1	300	3000	9	4300	5200
2	600	3400	10	4850	5300
3	1100	3900	11	5350	5400
4	1650	4700	12	5900	5400
5	2150	4800	13	6450	5400
6	2700	4900	14	6950	5400
7	3250	5000	15	7500	5400

Таким образом, перевод системы «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» на улучшенный режим работы на холостом ходу и транспортный «тепловозный» режим в тяге может обеспечить суммарную экономию удельного топлива до 14,3 % за поездку.

Тем не менее переход системы «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» на улучшенный режим газотурбинного двигателя при работе на холостом ходу, а также на транспортный «тепловозный» режим в тяге повлек за собой появление ряда ограничений [8] при регулировании электромагнитных процессов в тяговом электроприводе газотурбовоза.

Для исследования работы и оптимизации электромагнитных процессов, происходящих в тяговом электроприводе газотурбовоза в различных режимах его работы (холостой ход, тяга, переходные режимы), с использованием среды Matlab Simulink [9] разработана математическая модель тягового электропривода и системы автоматического регулирования газотурбовоза [10], общий вид которой представлен на рисунке 6.

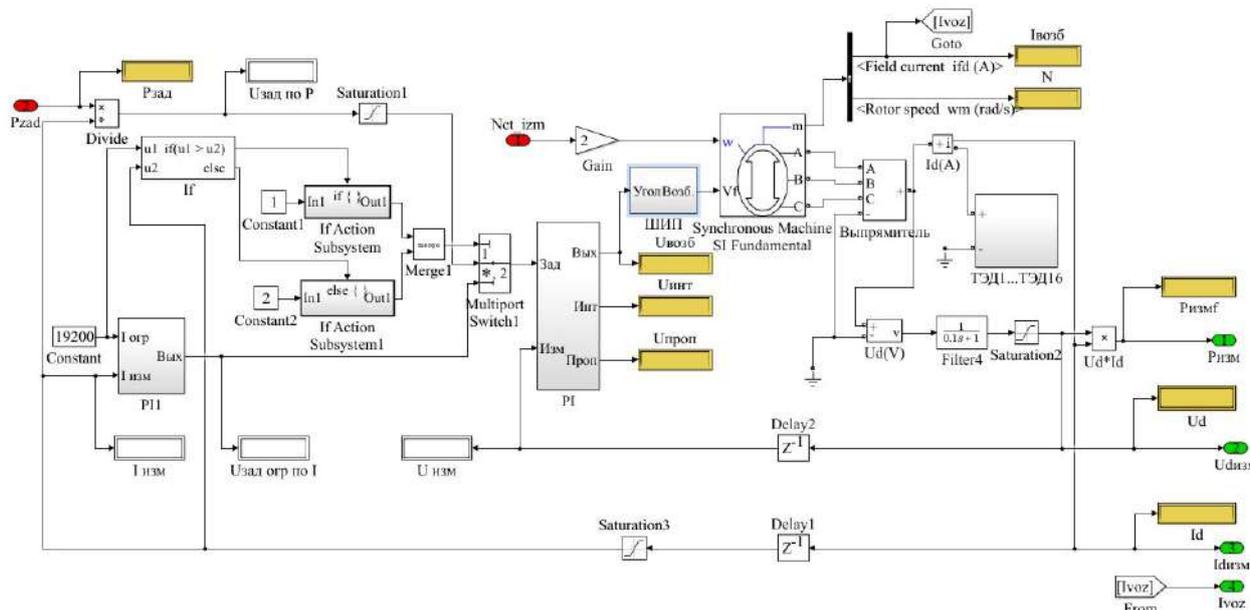


Рисунок 6 – Модель тягового электропривода и САР газотурбовоза в Matlab

По результатам математического моделирования электромагнитных процессов, происходящих в тяговом электроприводе газотурбовоза в различных режимах его работы, были сформированы алгоритмы работы системы автоматического регулирования, позволяющие обеспечить энергооптимальные траектории нагружения системы «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» во всем диапазоне регулирования мощности.

В настоящее время ведется разработка программного обеспечения микропроцессорной системы управления газотурбовоза, реализующая разработанные алгоритмы регулирования.

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

По предварительным оценкам, реализация этих алгоритмов позволит обеспечить дополнительную экономию удельного расхода топлива до 3 % топлива за поездку.

Экономический эффект от перевода газотурбинного двигателя на улучшенный режим работы на холостом ходу и транспортный «тепловозный» режим в тяге, а также от реализации энергооптимальных алгоритмов нагружения системы «газотурбинный двигатель – тяговый генератор» во всем диапазоне регулирования мощности суммарно составит до 17,3 % удельного топлива, затраченного газотурбовозом при выполнении тяговой работы за поездку.

### Список литературы

1. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2020 года: Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 11.02.2008 № 269-р. – Текст: электронный. – URL: [https://old-doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE\\_ID=704&layer\\_id=5104&refererLayerId=5103&id=4043#6007](https://old-doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&refererLayerId=5103&id=4043#6007) (дата обращения: 10.09.2020).
2. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года: Утв. распоряжением Правительства РФ от 28.08.2003 № 1234-р. – Текст : электронный. – URL: [http://www.energystrategy.ru/projects/ES-28\\_08\\_2003.pdf](http://www.energystrategy.ru/projects/ES-28_08_2003.pdf) (дата обращения: 10.09.2020).
3. Руденко, В. Ф. Газотурбовоз ГТ1 на альтернативном моторном топливе СПГ / В. Ф. Руденко, А. Г. Воронков, Е. Ю. Стальнов. – Текст : непосредственный // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 5. – С. 63 – 65.
4. Двигатель газотурбинный НК-361. Руководство по эксплуатации: РЭ 361.000.000. – Текст: непосредственный / ПАО «Кузнецов». – Самара, 2017. – 353 с.
5. Магистральный газотурбовоз мощностью 8300 кВт. Отладка систем регулирования газотурбинного двигателя при работе на режимах частичного и полного нагружения. Реостатные испытания силового блока газотурбовоза на сжиженном природном газе со снятием нагрузки: отчет о НИР: И-06-08 / ОАО «ВНИКТИ». – Коломна, 2008. – 74 с. – Текст : непосредственный.
6. Отчет по проведению тягово-энергетических испытаний для проверки возможности вожждения грузовых поездов массой до 9000 т при следовании с газотурбовозом ГТ1h-002 на участке Сургут – Войновка: ТЭЛ 076-0302015 / ОАО «РЖД», Свердловская дирекция тяги. – Екатеринбург, 2016. – 35 с. – Текст : непосредственный.
7. Разработка мероприятий по повышению эффективности применения сжиженного природного газа как моторного топлива на железнодорожном транспорте при эксплуатации газомоторных локомотивов на основе мониторинга и анализа их работы в условиях Свердловской железной дороги : техн. отчет: И-28-18 / АО «ВНИКТИ». – Коломна, 2018. – 155 с. – Текст : непосредственный.
8. Карпов, А. Г. Теория автоматического управления : учебное пособие / А. Г. Карпов. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. – Ч. 1. – 212 с. – Текст : непосредственный.
9. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. – Москва: ДМК Пресс; Санкт-Петербург: Питер, 2008. – 288 с. – Текст : непосредственный.
10. Иноземцев, А. А. Газотурбинные двигатели : учебное пособие / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий / ОАО «Авиадвигатель». – Пермь, 2006. – 1204 с. – Текст : непосредственный.

### References

1. *Energeticheskaya strategiya OAO «RZhD» na period do 2010 goda i na perspektivu do 2020 goda* (Energy strategy of JSC «RZD» for the period up to 2010 and for the future until 2020). Approved by Order of JSC «RZD» dated 11.02.2008 No. 269r, Available at: [42](https://old-</a></li></ol></div><div data-bbox=)

doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE\_ID=704&layer\_d=5104&refererLayerId=5103&id=4043#6007 (accessed 10 September 2020).

2. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2020 goda* (Energy strategy of Russia for the period up to 2020). Approved by RF Government Executive Order of August 28, 2003 No. 1234-r, Available at: [http://www.energystrategy.ru/projects/ES-28\\_08\\_2003.pdf](http://www.energystrategy.ru/projects/ES-28_08_2003.pdf). ((accessed 10 September 2020)).

3. Rudenko V. F., Voronkov A. G., Stalnov E.Yu. GT1 gas turbine locomotive running on alternative motor fuel LNG [Gazoturbovoz GT1 na al'ternativnom motornom toplive SPG]. *Transport na al'ternativnom toplive – Alternative fuel transport*, 2009, no. 5, pp. 63 – 65.

4. *Dvigatel' gazoturbinnyy NK-361, Rukovodstvo po ekspluatatsii RE 361.000.000* (Gas turbine engine NK-361, Operation manual RE 361.000.000). Samara, PJSC “Kuznetsov”, 2017, 353 p.

5. *Magistral'nyy gazoturbovoz moshchnost'yu 8300 kVt. Otladka sistem regulirovaniya gazoturbinного dvigatelya pri rabote na rezhimakh chastichnogo i polnogo nagruzheniya. Reostatnyye ispytaniya silovogo bloka gazoturbovoza na szhizhennom prirodnom gaze so snyatiyem nagruzki* (8300 kW mainline gas turbine locomotive. Debugging of the gas turbine engine control systems when operating at partial and full loading conditions. Rheostatic tests of the power unit of the gas turbine locomotive running on liquefied natural gas with unloading), Research Report I-06-08, Kolomna, JSC “VNIKTI”, 2008, 74 p.

6. *Otchet po provedeniyu tyagovo-energeticheskikh ispytaniy dlya proverki vozmozhnosti vozhdeniya gruzovykh poyezdov massoy do 9000 t pri sledovanii s gazoturbovozom GT1h-002 na uchastke Surgut – Voynovka: TEL 076-0302015* (Report on pull and energy efficiency tests to check the possibility of hauling freight trains weighing up to 9000 tons when travelling with GT1h-002 gas turbine locomotive on the Surgut – Voynovka section: TEL 076-0302015), JSC “RZD”, Sverdlovsk Traction Directorate. Yekaterinburg, 2016, 35 p.

7. *Razrabotka meropriyatiy po povysheniyu effektivnosti primeneniya szhizhennogo prirodnogo gaza kak motornogo topliva na zheleznodorozhnom transporte pri ekspluatatsii gazomotornykh lokomotivov na osnove monitoringa i analiza ikh raboty v usloviyakh Sverdlovskoy zh.d.* (Development of measures to improve the efficiency of using liquefied natural gas as a vehicle fuel in railway transport during the operation of gas engine locomotives on the basis of monitoring and analysis of their work in the conditions of Sverdlovsk Railway.), Techn. Report I-28-18, Kolomna, JSC “VNIKTI”, 2018, 155 p.

8. Karpov A. G. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* (Automatic control theory). Tomsk: TML-Press, 2011, 212 p.

9. Chernykh I. V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink* (Modeling electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink). Moscow: DMK Press, SPb.: Piter, 2008, 288 p.

10. Inozemtsev A. A., Sandratsky V. L. *Gazoturbinnyye dvigateli* (Gas turbine engines). Perm: JSC «Aviadvigatel», 2006, 1204 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Грачев Николай Валерьевич

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, 140402, Российская Федерация.

Заведующий лабораторией систем управления газовых локомотивов отдела тяговых и вспомогательных статических преобразователей.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 15-71.

E-mail: [vnikti@ptl-kolomna.ru](mailto:vnikti@ptl-kolomna.ru), [grachev-nv@vnikti.com](mailto:grachev-nv@vnikti.com)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Grachev Nikolay Valerievich

JSC “Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock” (JSC “VNIKTI”).

410, Oktyabrskoy Revolyutsii str., Kolomna, 140402, Russian Federation.

Head of the laboratory of control systems for gas locomotives of the department of traction and auxiliary static converters.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 15-71.

E-mail: [vnikti@ptl-kolomna.ru](mailto:vnikti@ptl-kolomna.ru), [grachev-nv@vnikti.com](mailto:grachev-nv@vnikti.com)

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Грачев, Н. В. Анализ мероприятий по повышению энергоэффективности газотурбовозов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 35 – 44.

## BIBLIOGRAFIC DESCRIPTION

Grachev N. V. Analysis of measures to improve the energy efficiency of gas turbine locomotives. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 2 (42), pp. 35 – 44 (In Russian).

УДК 629.4.053.2

**Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин, А. С. Кушнирук**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск,  
Российская Федерация

## РАСПОЗНАВАНИЕ ДЕФЕКТОВ МОТОРНО-ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ КОЛЕСНО-МОТОРНОГО БЛОКА ЛОКОМОТИВА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

**Аннотация.** В статье представлены результаты проведенного авторами исследования, целью которого была разработка модели распознавания дефектов моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотива для реализации заблаговременного автоматического оповещения управляющих структур о необходимости проведения обслуживающих или ремонтных операций и устранения дефектов на ранней стадии их возникновения. При проведении исследования использовались следующие междисциплинарные и математические методы: компьютерное и математическое моделирование, методы математической статистики, методы теории искусственного интеллекта и параметрической надежности. В результате проведенного исследования получена математическая формализация модели распознавания одного из дефектов моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотива – проточка (выкрашивание) баббитового слоя. С помощью полученной модели возможна реализация автоматического распознавания дефектов не только моторно-осевых подшипников, но и других узлов технических систем. Разработанная модель может быть использована в системах мониторинга, контроля, диагностирования технического состояния локомотивного парка с целью снижения простоев в ремонте и вынужденных затрат на плановые операции. Предложенная модель решает круг задач, описанных в концепции развития ОАО «РЖД», связанных с реализацией фактической системы ремонта по текущему техническому состоянию локомотива, а также с цифровизацией передовых направлений компании.

**Ключевые слова:** модель, распознавание, дефект, моторно-осевые подшипники, локомотив, искусственный интеллект, параметрическая надежность, мониторинг, контроль, диагностирование, техническое состояние.

**Yuri A. Davydov, Artyom K. Plyaskin, Alexey S. Kushniruk**

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

## DEFECTS RECOGNITION OF AXLE CAPS OF THE ROLLING STOCK WHEEL-MOTOR BLOCK BASED ON THE RESULTS OF MODELING AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR PREDICTING OUTPUT DIAGNOSTIC PARAMETERS

**Abstract.** The article presents the results of the research conducted by the authors, the purpose of which was to develop a model for recognizing defects in axle caps of a wheel-motor block of a locomotive in order to implement automatic advance notification of management structures about the need for maintenance or repair operations to eliminate defects at an early stage of their occurrence. The research used the following interdisciplinary and mathematical methods: computer and mathematical modeling, methods of mathematical statistics, methods of the theory of artificial intelligence and parametric reliability. As a result of the research, a mathematical formalization of the model for recognizing one of the defects in the axle caps of the wheel-motor block of the locomotive - the groove (chipping) of the babbitt layer was obtained. With the help of the obtained model, it is possible to implement automatic recognition of defects, pre-failure states not only of axle caps, but also of other units of technical systems. The developed model can be used in monitoring systems, control, diagnostics of the technical condition of the locomotive fleet, in order to reduce

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

downtime in repairs and forced costs for scheduled operations. The proposed model solves the range of problems described in the development concept of JSCo Russian Railways associated with the implementation of the actual repair system for the current technical condition of the locomotive, as well as with the digitalization of the company's advanced areas.

**Keywords:** model, recognition, defect, axle caps, locomotive, artificial intelligence, parametric reliability, monitoring, control, diagnostics, technical condition

Одной из основных задач в системе управления техническим состоянием локомотивного парка является диагностика отказов узлов, деталей и элементов. В условиях работы планово-предупредительной системы ремонта и обслуживания локомотивов преобладает стационарная методика проведения диагностических работ, характеризующаяся высокими периодами дискретизации (периодами между проведением диагностики отказов). Наличие высоких периодов дискретизации способствует увеличению вероятности внезапных отказов, что подтверждается отрицательной динамикой unplanned repairs of locomotives on the network of OJSC «RZD» (рисунок 1).

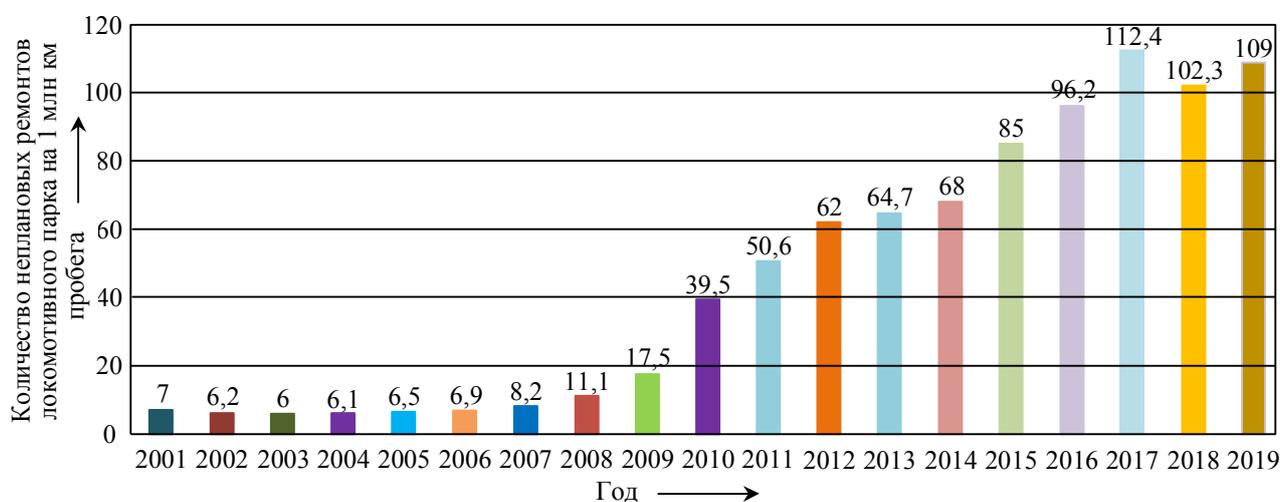


Рисунок 1 – Динамика unplanned repairs of locomotives on the network of OJSC «RZD»

Помимо затрат на устранение отказов локомотивов значительные средства (в среднем за год около 3 % от дохода компании ОАО «РЖД») расходуются на выполнение плановых ремонтных и обслуживающих операций. Компромиссным решением для сокращения затрат на устранение отказов локомотивов и их плановый сервис является переход с планово-предупредительной системы ремонта и обслуживания на фактическую [1, 2]. Однако для такого перехода необходимо наличие точных систем непрерывного контроля и диагностирования в составе бортовых микропроцессорных комплексов управления и диагностики локомотивов с функцией дистанционной (удаленной) передачи данных. Для реализации таких систем необходима универсальная и адаптивная математическая модель, способная к автоматической регистрации и обработке данных с учетом влияния различных входных и выходных факторов.

Известны работы ученых, связанные с применением методов теории искусственного интеллекта в области управления техническим состоянием локомотивного парка [3, 4]. Основной задачей является структуризация и обучение искусственных нейронных сетей (ИНС) прогнозирования по результатам технического мониторинга и диагностики отказов. В данных работах в качестве входных слоев ИНС на основании корреляционного анализа принимаются факторы, влияющие на изменение диагностических параметров, которые в свою очередь являются переменными выходных слоев ИНС. По результатам обучения формируются

дефектологические ИНС, обученные по выборке данных мониторинга и результатам диагностики конкретного отказа;

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

эталонные ИНС, также обученные по выборке данных мониторинга и имеющие значения эталонных выходных параметров, когда физическое состояние технической системы является исправным.

Несмотря на качество реализации процесса прогнозирования отказов с помощью данных методов имеется сложность в обработке результатов прогнозирования ИНС, где требуются значительные человеческие ресурсы – наличие специалистов, подтверждающих прогноз отказов конкретных узлов. Для решения данной проблемы необходима разработка математической модели регистрации отказа или предотказного состояния путем сравнения прогнозируемых выходных параметров моделируемых ИНС различных состояний рассматриваемого узла или элемента.

Рассмотрим ИНС прогнозирования выходных диагностических параметров на примере моторно-осевых подшипников (МОПов) колесно-моторного блока (КМБ) локомотива, результаты обучения которой представлены на рисунке 2.

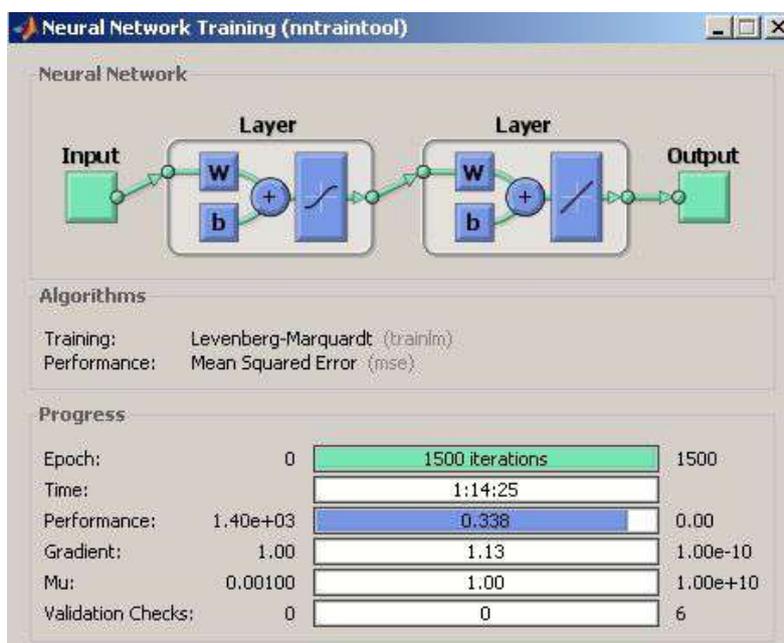


Рисунок 2 – Результаты обучения ИНС прогнозирования выходных диагностических параметров

Процесс обучения осуществлялся в пакете *Neural Network* программного обеспечения *MATLAB*.

В результате обучения искусственной нейронной сети прогнозирования *Net* по количеству итераций обучения в  $j = 1500$  (Epoch) с помощью метода Левенберга – Марквардта (Training: Levenberg – Marquardt) по выборке обучения объемом в  $i = m = 59305$  точек достигнут коэффициент детерминации  $R^2 = 0,98$  (коэффициент корреляции  $R = 0,99$ ). Процесс обучения длился 1 час 14 минут (Time), при этом среднеквадратическое отклонение  $S_{yij}$  выходной выборки составило 0,338 (Perfomance), достигнут минимальный градиент функции  $\nabla_{U_{ij} \min} = 1,13$  (Gradient), регуляризационный коэффициент  $\mu$  (Mu) достиг значения 1, что в рамках обучающей выборки свидетельствует об использовании метода Гаусса – Ньютона в конце процесса обучения сети.

В качестве структуры ИНС была принята однонаправленная многослойная нейронная сеть прогнозирования с одним скрытым слоем и двумя функциями активации, соответственно сигмовидной и линейной [5, 6]. Сигмовидная функция активации была использована в скрытом слое с целью исключения насыщения мощных по номинальному значению сигналов и усилению слабых сигналов. Линейная функция активации использовалась в выходном слое с целью дальнейшего проведения регрессионного анализа [7] и оценки качества обучения ИНС. Во входном слое на основании корреляционного анализа [8] были приняты следующие вход-

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ные параметры: температура условий эксплуатации  $T_b$ , скорость движения  $V_d$ , ускорение  $\frac{\partial V_d}{\partial t}$ . В выходном слое в качестве выходных диагностических параметров были приняты значения температуры исправного (эталонного) вкладыша МОП КМБ  $T_{\text{МОП}^{\text{И}}}$  и вкладыша с дефектом  $T_{\text{МОП}^{\text{Д}}}$ , а именно с проточкой баббитового слоя, характеризующейся диаметральным зазором между вкладышем и шейкой оси колесной пары в 2,26 мм с выкрашиванием баббита относительно общей площади контакта вкладыша в 28,6 %.

Структура обученной ИНС представлена на рисунке 3.

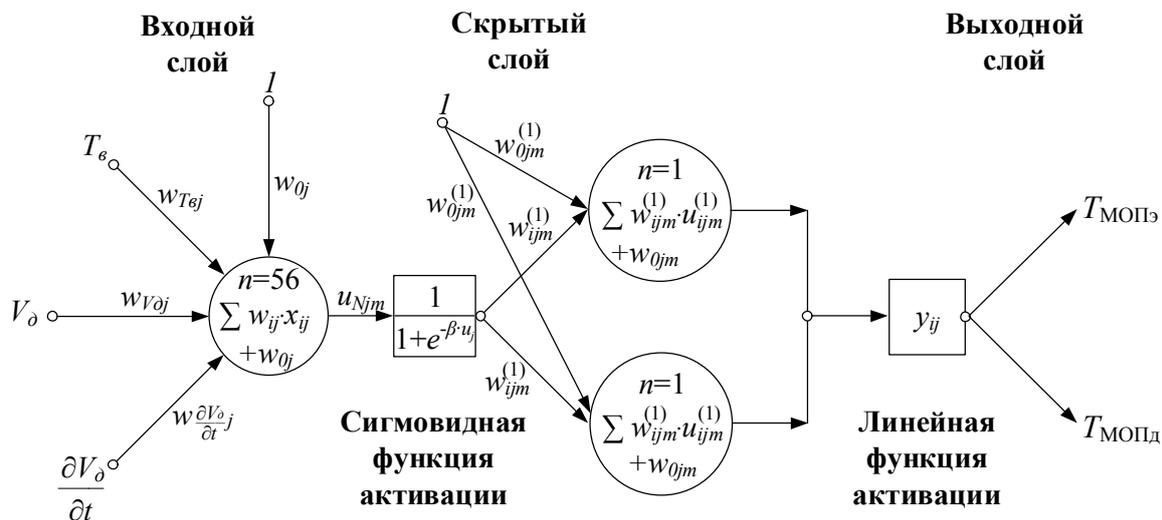


Рисунок 3 – Структура нейросетевой модели прогнозирования выходных диагностических параметров с учётом влияния входных влияющих воздействий моторно-осевых подшипников колёсно-моторного блока локомотива:  $n$  – количество нейронных связей;  $w$  – весовой коэффициент уравнения нейронной связи;  $N$  – номер персептрона (нейрона);  $m$  – номер выходного параметра слоя сети;  $u$  – значения уравнений нейронных связей скрытого слоя ИНС;  $\beta$  – коэффициент усиления сигнала сигмовидной функции активации;  $y$  – значения уравнений нейронных связей выходного слоя ИНС

На основании представленных результатов обучения ИНС прогнозирования выходных диагностических параметров МОП КМБ можно сделать вывод об адекватности её работы ввиду наличия высокого уровня регрессии [9], который подтверждается проведённым линейным регрессионным анализом, результаты которого представлены на рисунке 4.

Для получения и дальнейшего исследования данных прогноза отказа МОП КМБ, произведём моделирование обученной ИНС *Net* по входному слою выборки результатов технического мониторинга данного узла и сравним прогнозируемые значения ИНС с фактическими значениями диагностического параметра  $T_{\text{МОП}}$ . Результаты моделирования ИНС *Net* и фактическое распределение диагностического параметра  $T_{\text{МОП}}$  представлены на рисунке 5.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

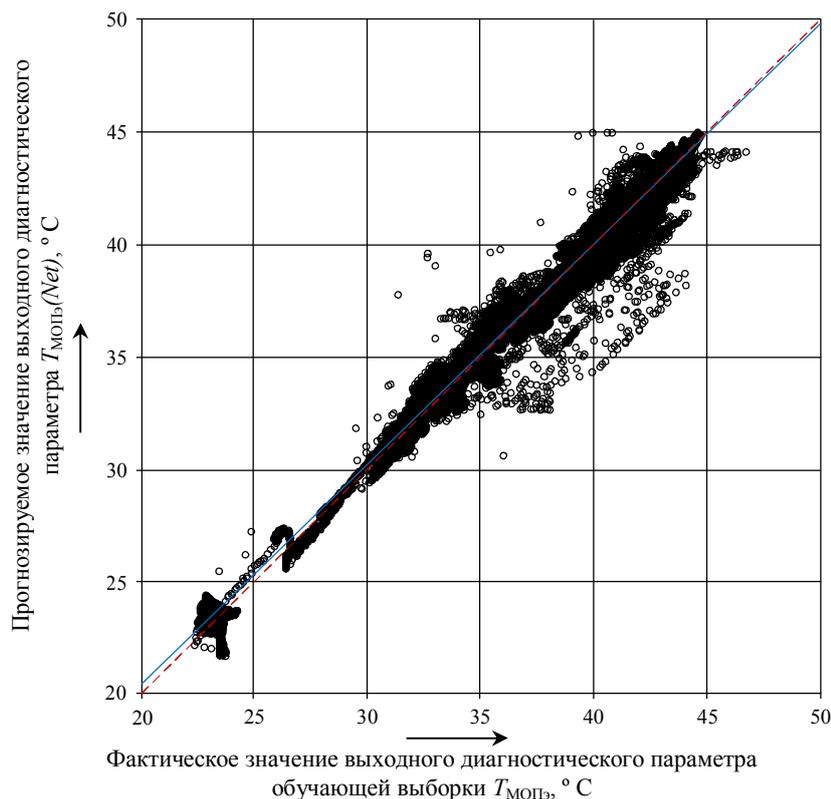


Рисунок 4 – Результаты линейного регрессионного анализа искусственной нейросетевой модели прогнозирования и диагностических характеристик моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотива: — фактическая линия регрессии; - - - линия регрессии вида  $T_{МОПб}(Net) = T_{МОПб}$

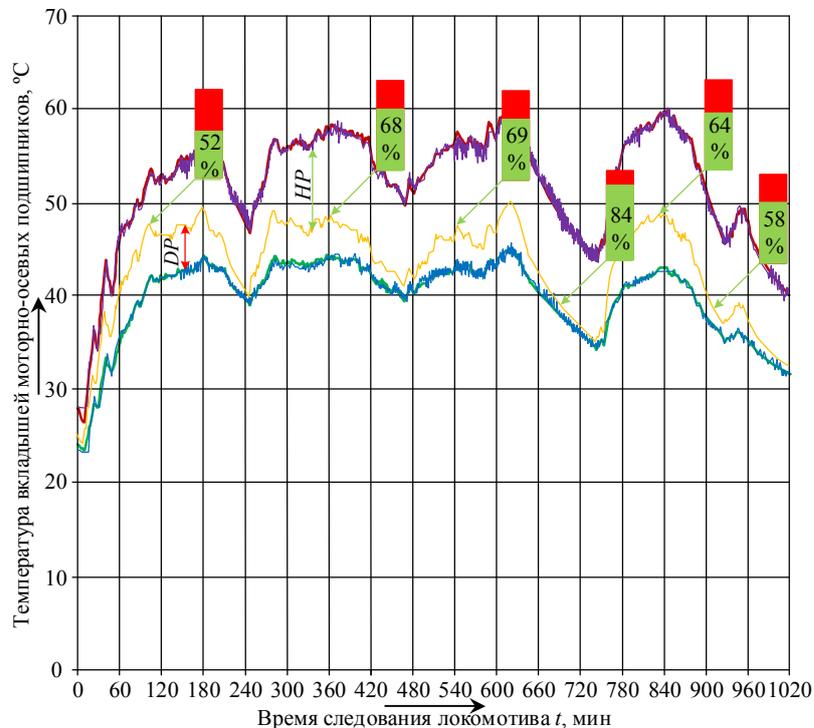


Рисунок 5 – Результаты моделирования разработанной нейросетевой модели оценки технического состояния моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов: — температура эталонного подшипника  $T_{МОПб}$ ; — температура дефектного подшипника  $T_{МОПд}$ ; — температура эталонного подшипника, прогнозируемая сетью  $T_{МОПб}(Net)$ ; — температура дефектного подшипника, прогнозируемая сетью  $T_{МОПд}(Net)$ ; — фактическое значение температуры диагностируемого подшипника  $T_{МОП}$ ;  $HP$  – показатель технического состояния, %;  $DP$  – показатель достижения дефекта, %

На основании рисунка 5 согласно характеристикам  $T_{\text{МОПд}}(Net)$ ,  $T_{\text{МОПз}}(Net)$  и  $T_{\text{МОП}}(t)$  нельзя однозначно установить наличие отказа (проточку баббитового слоя) или исправное (эталонное) состояние МОП КМБ ввиду того, что распределение фактического диагностического параметра  $T_{\text{МОП}}$  в определенные моменты времени совпадает как с дефектологической ИНС ( $t = 0 \div 60$  мин;  $t = 780$  мин), которая прогнозирует значения диагностического параметра  $T_{\text{МОПд}}$ , так и с эталонной ИНС ( $t = 240$  мин;  $t = 480$  мин;  $t = 660 \div 740$  мин), которая прогнозирует значения диагностического параметра  $T_{\text{МОПз}}$ . Однако при определении степени принадлежности к тому или иному состоянию МОП КМБ можно разграничить уровни технического состояния относительно его показателя согласно формуле:

$$HP = \frac{T_{\text{МОПд}}(Net) - T_{\text{МОП}}}{T_{\text{МОПд}}(Net) - T_{\text{МОПз}}(Net)}. \quad (1)$$

На рисунке 5 изображено как возрастание, так и убывание показателя технического состояния, что является неоднозначным фактом при визуализации диагностических данных.

Поэтому при расчете показателей технического состояния  $HP$  необходимо учитывать условие: если очередное значение показателя технического состояния  $HP$  больше минимального значения, то это значение приравнивается к минимальному, рассчитанному на зарегистрированной выборке. Тогда управляющая характеристика относительно изменения технического состояния примет вид, представленный на рисунке 6.

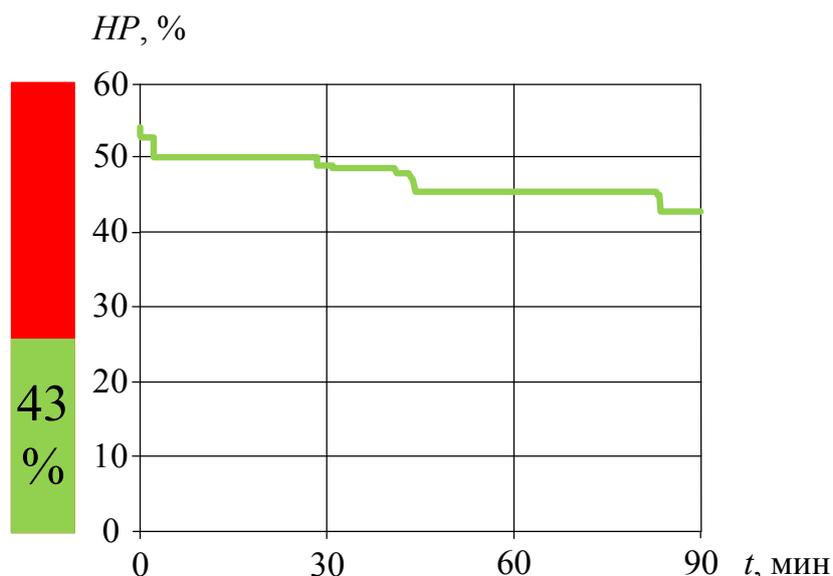


Рисунок 6 – Управляющая характеристика относительно изменения технического состояния МОПа

На основании управляющей характеристики, представленной на рисунке 6, возможна реализация автоматической системы распознавания технического состояния МОП КМБ, при этом  $HP = 0\%$  ( $DP = 100\%$ ) соответствует достижению дефекта с соответствующими характеристиками. Определение допустимых и критических значений показателя  $HP$  ( $DP$ ) может осуществляться на основании экспертных заключений отдела расшифровки памяти микропроцессорных систем управления и диагностики, на основании данных о неплановых ремонтах, отчетах об обслуживании и ремонте рассматриваемого узла.

Таким образом, посредством разработанной математической формализации модели распознавания дефектов МОП КМБ с помощью показателя технического состояния  $HP$  можно осуществить управления техническим состоянием рассматриваемого узла с учетом изменения множества входных и выходных влияющих воздействий, которые характеризуют физическую природу протекающего рабочего процесса (трения-скольжения) рассматриваемого узла.

Представленный подход можно аналогичным образом реализовать на других элементах и узлах технических систем с целью автоматического распознавания отказов или дефектов, а также управления техническим состоянием. Данный подход позволяет сформировать цифровую диагностическую карту узлов локомотивов. Цифровая диагностическая карта позволяет заблаговременно выявлять предотказные состояния с целью упреждения отказов и оптимизации затрат на замену или глубокое восстановление узлов локомотивов [10].

### Список литературы

1. Грищенко, А. В. Повышение эффективности технического обслуживания локомотивов / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, В. А. Кручек, М. А. Шрайбер. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 4. – С. 93 – 97.
2. Головаш, А. Н. Перспективные направления повышения эффективности железнодорожного транспорта / А. Н. Головаш, Н. Б. Куршакова. – Текст : непосредственный // Национальные приоритеты России. – 2016. – № 23 (21). – С. 31 – 39.
3. Грищенко, А. В. Аппарат искусственных нейронных сетей для диагностики современного локомотива / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Ю. В. Бабков, Ю. И. Клименко, [и др.]. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2012. – № 7 (667). – С. 36 – 40.
4. Plyaskin A. K., Kushniruk A. S. Actual artificial-intelligence based system for assessment of the technical state of the rolling stock fleet, *Advances in intelligent systems and computing*, Springer, Cham, 2019, vol. 1115, pp. 427 – 442.
5. Соснин, А. С. Функции активации нейросети: сигмоида, линейная, ступенчатая, *relu*, *tanh* / А. С. Соснин, И. А. Сулова. – Текст : непосредственный // Наука. Информатизация. Технологии. Образование. – 2019. – С. 237 – 246.
6. Сараев, П. В. Анализ эффективности выбора функций активации в нейросетевом прогнозировании / П. В. Сараев, Ю. Е. Сяглова. – Текст : непосредственный // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – № 3-1(49). – С. 165 – 169.
7. Курзаева, Л. В. Регрессионный анализ в электронных таблицах / Л. В. Курзаева. – Текст : непосредственный // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 12-7. – С. 1234 – 1238.
8. Spearman, C. The proof and measurement of association between two things, *The American journal of psychology*, University of Illinois press, Champaign, 1904, vol. 15, № 1, pp. 72 – 101.
9. Гржибовский, А. М. Корреляционный анализ / А. М. Гржибовский. – Текст : непосредственный // Экология человека. – 2008. – № 9. – С. 50 – 60.
10. Лакин, И. К. «Умный локомотив»: диагностирование тяговых электродвигателей тепловозов с использованием методов машинного обучения / И. К. Лакин, В. В. Павлов, В. А. Мельников. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 1 (74). – С. 53 – 56.

### References

1. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Kruchek V. A., Shreiber M. A. Improving the efficiency of maintenance of locomotives [Povysheniye effektivnosti tehnikeskogo obsluzhivaniya lokomotivov]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Bulletin of the Petersburg State University of Railways*, 2012, no. 4, pp. 93 – 97.
2. Golovash A. N., Kurshakova N. B. Prospective directions of increasing the efficiency of railway transport [Perspektivnyye napravleniya povysheniya effektivnosti zheleznodorozhnogo transporta]. *Natsional'nye priority Rossii – Russia's national priorities*, 2016, no. 23 (21), pp. 31 – 39.
3. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Babkov Yu. V., Klimenko Yu. I., Kim S. I., Perfilyev K. S., Fedotov M. V. Apparatus of artificial neural networks for diagnostics of a modern locomotive [Apparat iskusstvennykh nejronnykh setej dlya diagnostiki sovremennogo lokomotiva]. *Lokomotiv – Locomotive*, 2012, no. 7 (667), pp. 36 – 40.

4. Plyaskin A. K., Kushniruk A. S. Actual artificial-intelligence based system for assessment of the technical state of the rolling stock fleet, *Advances in intelligent systems and computing*, Springer, Cham, 2019, vol. 1115, pp. 427 – 442.
5. Sosnin A. S., Suslova I. A. Neural network activation functions: sigmoid, linear, stepwise, relu, tanh [Funkcii aktivacii nejroseti: sigmoida, linejnaya, stupenchataya, relu, tanh]. *Nauka. Informatizaciya. Tehnologii. Obrazovanie – The Science. Informatization. Technology. Education*, 2019, pp. 237 – 246.
6. Saraev P. V., Syaglova Yu. E. Analysis of the effectiveness of the choice of activation functions in neural network forecasting [Analiz e`ffektivnosti vy`bora funkcij aktivacii v nejrosetevom prognozirovanii]. *Sistemy` upravleniya i informacionny`e texnologii – Control systems and information technologies*, 2012, no. 3-1 (49), pp. 165 – 169.
7. Kurzaeva L. V. Regression analysis in electronic tables [Regressionny`j analiz v e`lektronny`h tabliczah]. *Mezhdunarodny`j zhurnal prikladny`h i fundamental`ny`h issledovanij – International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 12-7, pp. 1234 – 1238.
8. Spearman C. The proof and measurement of association between two things, *The American journal of psychology*, University of Illinois press, Champaign, 1904, vol. 15, № 1, pp. 72 – 101.
9. Grzhibovsky A. M. Correlation analysis [Korrelyacionny`j analiz]. *E`kologiya cheloveka – Human Ecology*, 2008, no. 9, pp. 50 – 60.
10. Lakin I. K., Pavlov V. V., Melnikov V. A. «Smart-locomotive»: diagnostics of traction electric motors of diesel locomotives using machine learning methods [«Umny`j lokomotiv»: diagnostirovanie tyagovy`h e`lektrovdigatelej teplovozov s ispol`zovaniem metodov mashinnogo obucheniya]. *Transport Rossijskoj Federacii – Transport of the Russian Federation*, 2018, no. 1 (74), pp. 53 – 56.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Давыдов Юрий Анатольевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Транспорт железных дорог», ректор ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 407-700.

E-mail: puch@festu.khv.ru

### Пляскин Артём Константинович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт железных дорог».

Тел.: +7 (4212) 407-097.

E-mail: loc@festu.khv.ru

### Кушнирук Алексей Сергеевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Аспирант, преподаватель кафедры «Транспорт железных дорог», ДВГУПС.

Тел.: +7 (924) 212-21-38.

E-mail: alexey.kushniruk@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Davydov Yuri Anatolievich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Doctor of technical sciences, professor of the department «Transport of railways», rector of the FESTU.

Phone: +7 (4212) 407-700.

E-mail: puch@festu.khv.ru

### Plyaskin Artyom Konstantinovich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Candidate of technical sciences, associate professor of the department «Transport of railways».

Phone: +7 (4212) 407-097.

E-mail: loc@festu.khv.ru

### Kushniruk Alexey Sergeevich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Postgraduate student, lecturer of the department «Transport of railways».

Phone: +7 (924) 212-21-38.

E-mail: alexey.kushniruk@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Давыдов, Ю. А. Распознавание дефектов моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотива на основе результатов моделирования искусственной нейронной сети прогнозирования выходных диагностических параметров / Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин, А. С. Кушнирук. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 44 – 52.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Davydov Yu. A., Plyaskin A. K., Kushniruk A. S. Defects recognition of axle caps of the rolling stock wheel-motor block based on the results of modeling an artificial neural network for predicting output diagnostic parameters. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 2 (42), pp. 44 – 52 (In Russian).

УДК 621.336.2

**А. И. Слатин**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ СИСТЕМЫ ПОДВИЖНЫХ РАМ ОДНОРЫЧАЖНЫХ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Аннотация.** В статье описаны особенности конструкции токоприемников электроподвижного состава, система подвижных рам которых выполнена в виде двух сочлененных рычагов штангового типа. Однорычажные токоприемники отличаются улучшенными массо-габаритными характеристиками, что позволяет применять их в стесненных условиях крышевого пространства двухсистемных электровозов. При этом необходимость обеспечения высоких механических показателей системы подвижных рам в совокупности с малым трением в шарнирах, требует использования конструкционных материалов повышенной прочности, прецизионных методов обработки и повышенной точности при сборке. Особенно важным становится контроль поперечной и продольной жесткости системы подвижных рам во время исследовательских, периодических и квалификационных испытаний, а также при эксплуатации. В статье описана методика, позволяющая значительно сократить трудоемкость при проведении данного рода исследований, повысить скорость проведения измерений, уменьшить влияние человеческого фактора.

**Ключевые слова:** токоприемник, жесткость, прочностные характеристики, система подвижных рам, схема замещения.

**Anatoly I. Slatin**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## IMPROVEMENT OF THE METHODOQUE'S FOR THE EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF THE SYSTEMS OF MOVING SINGLE-ARMS PANTOGRAPH'S RIGIDITY ELECTRIC LOCOMOTIVES

**Abstract.** The article provides for the design features of pantographs of an electric drive train, a system of movable frames, which are made in the form of two articulated rod-type levers. Single-lever pantographs are distinguished by improved mass-dimensional indicators, which allows them to be used in the cramped conditions of the roof space of two-system electric locomotives. This requires high mechanical characteristics, as well as the need to use structural materials of increased strength, precision processing methods and high precision during assembly. It becomes especially important to control the transverse and advanced cruelty of the moving frame system during research, periodic and qualification tests, as well as during operation. The article describes a methodology that allows conducting research with a high degree of labor intensity, increasing the speed of measurements, and reducing the influence of the human factor.

**Keywords:** pantograph, rigidity, strength characteristics, system of movable frames, equivalent circuit.

Общепромышленные тенденции повышения скоростей движения на железнодорожном транспорте нашли отражение в том числе и в «Стратегии развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 878-р. [1], в соответствии с которой одним из приоритетных направлений развития является повышение показателей эффективности электроподвижного состава. Создание новой техники транспортных систем входит в Перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации (утвержден Указом Президента Рос-

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

сийской Федерации от 07 июля 2011 г. [2]), повышая готовность транспортной отрасли к импортозамещению, снижая зависимость от поставок из-за рубежа, что является актуальным вопросом в текущей геополитической и эпидемиологической обстановке.

В связи с широким распространением однорычажных токоприемников на электроподвижном составе как пассажирского (рисунок 1, б, в, г), так и грузового (рисунок 1, а) движения вопросы совершенствования их конструкции и технологии эксплуатации приобретают особенную актуальность. Важным преимуществом токоприемников такого типа является пониженная металлоёмкость, их габариты позволяют более рационально размещать крышевое оборудование на электровозе, снижение числа рычагов дает определенные преимущества с точки зрения аэродинамики.

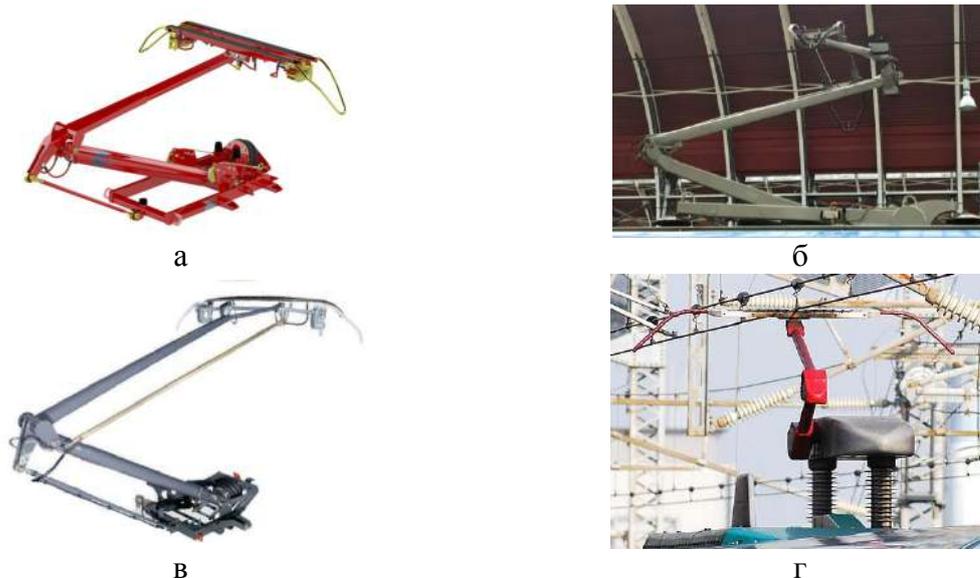


Рисунок 1 – Токоприемники рычажного типа, предназначенные для эксплуатации при различных скоростных диапазонах: а – до 160 км/ч; б – до 200; в – до 300 ; г – свыше 300 км/ч

Отличительной особенностью однорычажных токоприемников является отсутствие развитых кинематических связей, обеспечивающих устойчивость системы подвижных рам под действием поперечных и продольных нагрузок. Данные виды нагрузок приводят к упругим деформациям нижнего и верхнего рычагов. Возникающие при этом силы упругости препятствуют дальнейшему росту перемещений.

При снижении поперечной жесткости токоприемник электроподвижного состава под действием нагрузок со стороны контактной сети деформируется, ползод смещается относительно контактного провода на недопустимое расстояние. В результате схода контактных проводов с рабочей поверхности токоприемника возникают аварийные ситуации, следствием которых являются перерывы в движении поездов на поврежденном участке.

Рабочая высота токоприемников в соответствии с международным стандартом ГОСТ 32204-2013 «Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава» должна изменяться от 400 до 1900 мм относительно контактной поверхности вставок полностью опущенного токоприемника (длина интервала составляет 1500 мм) [3]. Шарнирные сочленения обеспечивают перемещение ползода в вертикальной плоскости и при этом передают нагрузки в поперечной. Поэтому для контроля прочностных характеристик достаточно приложить к верхнему узлу системы подвижных рам нормированную силу и измерить вызванную этой силой деформацию. Поперечная жесткость должна укладываться в нормативные значения во всем диапазоне изменения рабочей высоты (рисунок 2).

Традиционный способ измерения предполагает демонтаж токоприемника с электровоза и размещение его на специализированном стенде [4], что сопряжено со значительными трудозатратами.

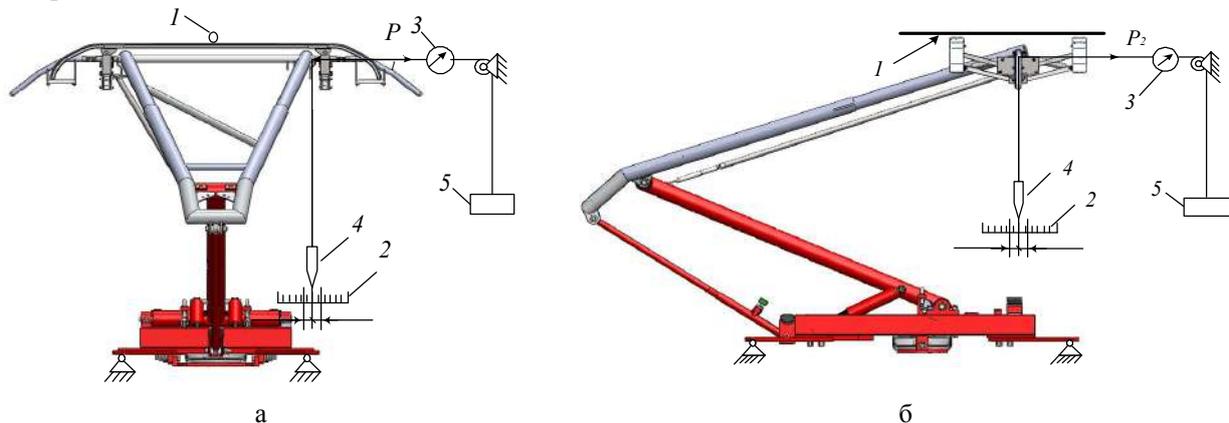


Рисунок 2 – Определение поперечной (а) и продольной (б) жесткостей токоприемника на стенде:  
1 – контактный провод балки ударно-колебательного комплекса; 2 – измерительная линейка;  
3 – динамометр; 4 – отвес; 5 – образцовые грузы  $2 \times 25$  кг

В рамках исследования предлагается усовершенствовать методику определения поперечной жесткости с помощью методов вибрационной диагностики.

В основу данного способа контроля жесткости положены известные закономерности изменения амплитудно-частотных характеристик колебательного процесса (основной или резонансной частоты колебаний, амплитуды и логарифмического декремента колебаний) собственных или вынужденных механических поперечных или продольных колебаний при изменении прочностных показателей образца [5 – 7].

Предлагаемый способ не требует снятия токоприемника с крыши электроподвижного состава, так как масса неподвижно стоящего электровоза или вагона электропоезда весьма значительна по сравнению с массой колеблющихся частей токоприемника.

Затухающие колебания, вызванные одиночным ударным воздействием, приложенным к верхнему узлу системы подвижных рам токоприемника, необходимо зарегистрировать с максимально доступной дискретизацией сигнала, после чего путем аналитической обработки полученных виброграмм и спектрограмм выделить искомые значения характеристик колебательного процесса.

С учетом допущений, что сечения нижнего и верхнего рычагов системы подвижных рам токоприемника не изменяются по длине, масса дополнительных элементов (ось, соединяющая рычаги, токоведущие шунты и крепеж) также равномерно распределена по длине рычагов токоприемника, а вязкое трение и изгибная жесткость учтены приведенными к верхнему узлу сосредоточенными элементами [8]. Дифференциальное уравнение, описывающее затухающие колебания верхнего узла системы подвижных рам после единичного удара, можно записать в следующем виде:

$$J_m \cdot \ddot{\varphi} = M_{mg} + M_{упр} + M_{тр};$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{(g \cdot ((m_1 + m_2) \cdot h_1 + m_0 \cdot (h_1 + h_2)) - k \cdot (h_1 + h_2)^2) \cdot \varphi}{J_m} + \frac{b \cdot (h_1 + h_2) \cdot \dot{\varphi}}{J_m}, \quad (1)$$

где  $J_m$  – момент инерции системы подвижных рам;  $\varphi$  – обобщенная координата (угол отклонения системы подвижных рам от вертикали);  $M_{mg}$  – момент, создаваемый силой тяжести;  $M_{упр}$  – момент, создаваемый силой упругости;  $M_{тр}$  – момент, создаваемый диссипативными силами;  $b$  – приведенный коэффициент вязкого трения;  $h_1$  – длина проекции нижнего рычага  $l_1$  на вертикальную ось;  $h_2$  – длина проекции верхнего рычага  $l_2$  на вертикальную ось;  $k$  – поперечная жесткость системы подвижных рам.

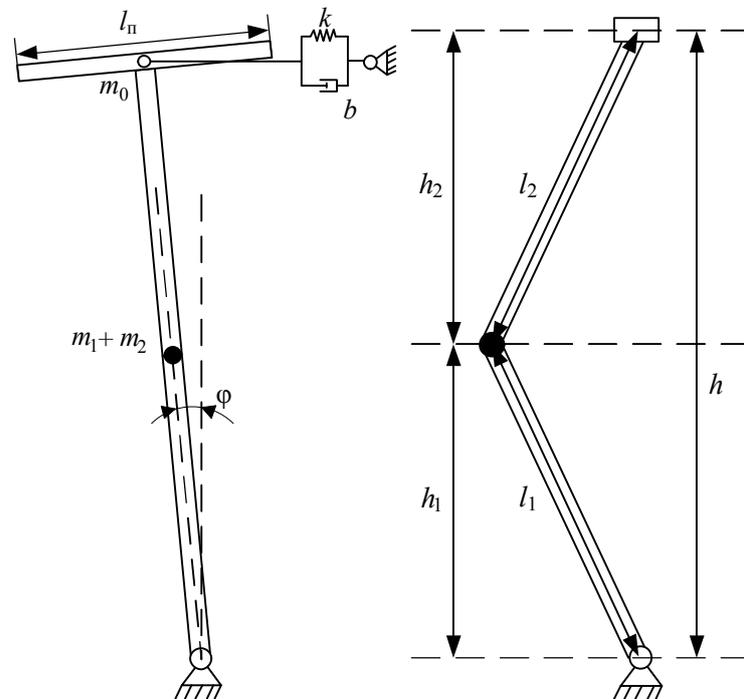
# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для повышения скорости проведения испытаний в условиях депо или пункта технического обслуживания целесообразно определять жесткость системы подвижных рам токоприемника без демонтажа полоза. В этом случае его потребуется неподвижно зафиксировать с помощью хомутов относительно верхнего узла системы подвижных рам.

В рамках решаемой задачи полоз предлагается представить в виде балки прямоугольного сечения с равномерно распределенной массой (рисунок 3).



а



б

Рисунок 3 – Определение показателей поперечных колебаний однорычажного токоприемника:

а – токоприемник, зафиксированный на максимальной рабочей высоте;

б – схема замещения для определения момента инерции токоприемника относительно оси нижнего шарнира

Дифференциальное уравнение (1) записано с учетом допущений о малых углах колебаний, что позволяет без ущерба для точности заменить  $\sin(\varphi)$  на  $\varphi$ , а также считать, что линейные элементы трения и упругости, приведенные к верхнему узлу системы подвижных рам, перемещаются линейно. Моменты, создаваемые силами тяжести, упругости и вязкого трения, зависят от угла поворота  $\varphi$ . С учетом принятых допущений момент инерции токоприемника в поперечной плоскости может быть определен по выражению:

$$J_m = \frac{m_1}{12} \cdot h_1^2 + m_1 \cdot \left( h_1 + \frac{h_2}{2} \right)^2 + \frac{m_2}{3} \cdot h_2^2 + \frac{m_0}{12} \cdot l_n^2 + m_0 \cdot (h_1 + h_2)^2, \quad (2)$$

где  $m_1$  – масса верхнего рычага;  $m_2$  – масса нижнего рычага;  $m_0$  – масса полоза;  $l_n$  – длина полоза.

Решение полученного с помощью подстановок  $\omega_0^2 = \frac{(g \cdot ((m_1 + m_2) \cdot h_1 + m_0 \cdot (h_1 + h_2)) - k \cdot (h_1 + h_2)^2)}{J_m}$  и  $2 \cdot \beta = \frac{b \cdot (h_1 + h_2)}{J_m}$  характеристического уравнения  $\ddot{\varphi} + 2 \cdot \beta \cdot \dot{\varphi} + \omega_0^2 \cdot \varphi = 0$  показало, что колебания будут слабо затухающими, что соответствует допущению о том, что диссипация энергии колебаний происходит за счет вязкого трения о воздух. В этом случае для расчета жесткости предлагается записать выражение для определения циклической частоты затухающих колебаний  $\omega_1$ :

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (3)$$

После подстановки указанных выше выражений для  $\omega_0^2$  и  $2 \cdot \beta$  в уравнение (3) и преобразований данного уравнения к виду

$$k = \frac{\sqrt{-J_m^2 (h_1 + h_2)^4 \cdot \left( \left( \frac{b \cdot (h_1 + h_2)}{2 \cdot J_m} \right)^2 - \left( \frac{2\pi}{T_1} \right)^2 \right)}}{(h_1 + h_2)^4} + \frac{g \cdot (h_1 + h_2)^2 (m_1 + m_2) \cdot h_1 + m_0 \cdot (h_1 + h_2)}{(h_1 + h_2)^4} \quad (4)$$

появляется возможность получать численные значения жесткости, вводя входящие в выражение (4) данные.

Конструктивные параметры, необходимые для расчета ( $l_1 - 1,8$  м;  $l_2 - 1,95$  м;  $m_1 - 12$  кг;  $m_2 - 12$  кг;  $m_0 - 17$  кг;  $l_{\text{п}} - 2,0$  м), приняты в соответствии с данными токоприемника ТА-160-2400. Остальные величины, входящие в расчетные выражения, определяются на основании проведенных экспериментальных исследований [9] либо с помощью прямых измерений (рисунок 4). Экспериментально период затухающих колебаний определяется с помощью выражения

$$T_{10} = \frac{10}{T_{10}}, \quad (5)$$

где  $T_{10}$  – продолжительность десяти колебаний, определенная по регистрограмме (см. рисунок 4).

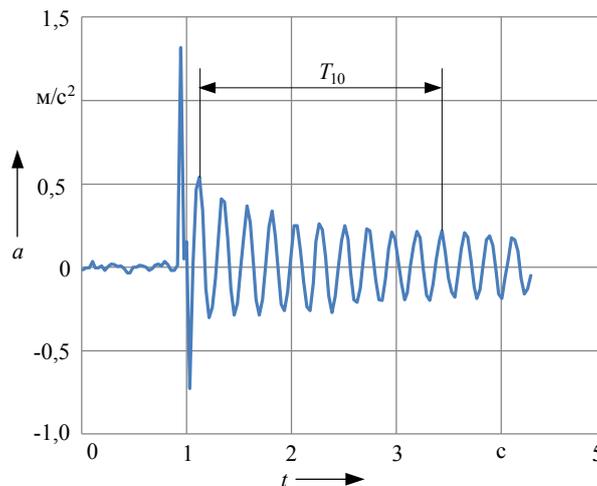


Рисунок 4 – Регистрация поперечных колебаний верхнего шарнира токоприемника под действием одиночного импульса

Измерения, проведенные на токоприемнике с однорычажной конструкцией системы подвижных рам, показали, что круговая частота варьируется в диапазоне от 29 до 42 рад/с в зависимости от высотного положения полоза.

Жесткость, определенная по выражению (4), в этом случае будет находиться в диапазоне от 17 до 24 Н/мм, что соответствует требованиям ГОСТ 32204-2013 [3].

В соответствии с разработанной методикой для определения поперечной жесткости системы подвижных рам токоприемника на крыше электроподвижного состава необходимо закрепить на верхнем узле акселерометр [10]. Высотное положение ограничивается с помощью трубки либо тонкого, условно нерастяжимого шнура, соединяющего верхний узел и основание токоприемника.

После выполнения указанных процедур необходимо запустить программу для определения жесткости [11], после чего с помощью импульсного воздействия, приложенного

к верхнему шарниру, вывести токоприемник из равновесия. Зарегистрировав поперечные колебания, программа выполняет пересчет жесткости, основываясь на параметрах токоприемника, предварительно внесенных в базу данных.

Экспериментальные исследования, проведенные в лабораторных условиях, позволяют сделать вывод о том, что наименьшее значение поперечной жесткости токоприемника соответствует максимальному высотному положению полоза.

Таким образом, для проверки жесткости токоприемника без снятия с крыши электроподвижного состава достаточно получить частоту его поперечных колебаний на максимальной рабочей высоте, после чего по приведенным выражениям определить численное значение. При неудовлетворительном значении жесткости токоприемник необходимо демонтировать и с помощью специального оборудования установить неисправность, после чего устранить причину пониженной жесткости.

Экспериментальные исследования, выполненные в лаборатории «Контактные сети и линии электропередачи» ОмГУПС, позволили сравнить значения жесткости системы подвижных рам физической модели токоприемника, измеренные традиционным способом, со значениями, полученными согласно предложенной методике (рисунок 5).

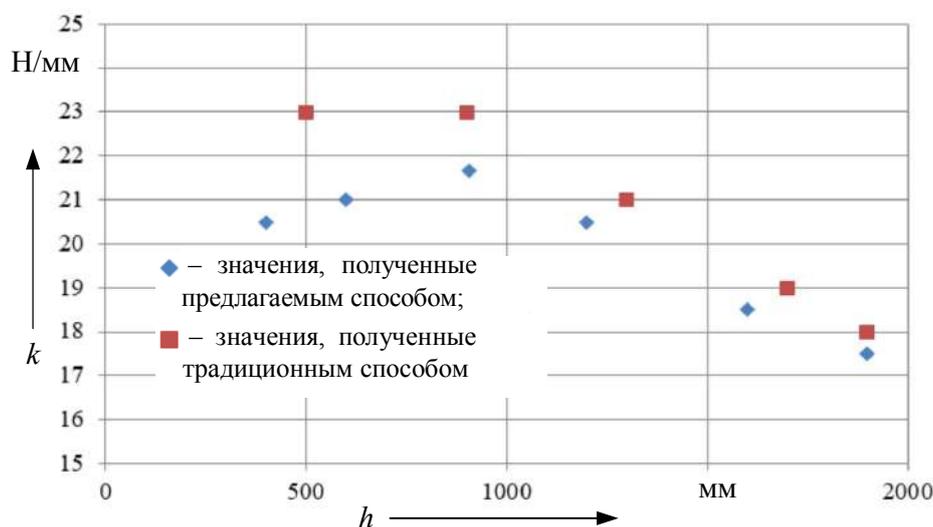


Рисунок 5 – Значения жесткости однорычажного токоприемника, измеренные традиционным способом и с помощью предлагаемой методики

С учетом того, что поперечную жесткость системы принято измерять на наибольшей рабочей высоте, где расчетные и экспериментальные значения практически совпадают, было принято решение ограничить область применения предлагаемого метода наибольшей рабочей высотой в соответствии с п. 7.3.8. ГОСТ 32204-2013. Результаты расчета жесткости токоприемника по предлагаемой методике на максимальной рабочей высоте показывают сходимость, достаточную для прикладного применения данной методики при проверке жесткости токоприемника после проведения технического обслуживания (ТО-2) или ремонта (ТР-1; ТР-2; ТР-3).

Практическая ценность предложенного способа контроля жесткости заключается в сокращении временных затрат на обслуживание токоприемников, а также в снижении трудоемкости измерения поперечной жесткости токоприемников – параметра, который является одним из ключевых при обязательном подтверждении соответствия согласно ГОСТ 32204-2013 «Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава».

В настоящее время модель поперечных колебаний токоприемника в рамках инициативных исследований совершенствуется для обеспечения применимости разработанной методики при эксплуатации токоприемников других конструкций, разработано устройство для регистрации колебаний токоприемника без снятия его с электровоза.

В качестве дальнейшего направления разработки данной темы можно отметить, что изучение спектрального состава колебаний, зарегистрированных в том числе и на неисправных токоприемниках, позволит выделить паттерны, соответствующие различным неисправностям, составить классификатор состояний, прогнозировать по мере накопления данных их работоспособность и тем самым не только повысить производительность и эффективность диагностических процедур, но и в соответствии с утвержденной долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» [12] перейти на «цифровую железную дорогу».

### Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года». – Текст : электронный. – URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-17062008-n-877-r/> (дата обращения : 01.10.2020).
2. Указ Президента РФ от 07.07.2011 № 899 (ред. от 16.12.2015) «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». – Текст : электронный.– URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/33514> (дата обращения: 01.10.2020).
3. ГОСТ 32204-2013 Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 24 с. – Текст : непосредственный.
4. Патент № 178813 Российская Федерация, МПК G01M 17/08; B60L 3/12. Устройство измерения жесткости токоприемника : № 2017125813 : заявлено 18.07.2017 : опубликовано 19.04.2018, Бюл. № 11 / Смердин А. Н., Голубков А. С., Павлов В. М., Чертков И. Е., Рыжков А. В.; патентообладатель ОмГУПС. – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.
5. Калашников, М. О. Диагностика и контроль качества строительных конструкций вибрационными методами : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Калашников Михаил Олегович; Гос. ун-т – учебно-научно-производственный комплекс. – Орел, 2011. – 154 с. – Текст : непосредственный.
6. Коробко, В. И. Экспериментальные исследования стальных ферм с параллельными поясами на статические и динамические воздействия / В. И. Коробко, Р. В. Алдушкин, О. В. Бояркина. – Текст : непосредственный // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 2. – С. 39 – 43.
7. Кулешова, А. Н. Продольно-поперечные колебания составного стержня : специальность 05.23.17 «Строительная механика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кулешова Анастасия Николаевна; Волгоградский гос. архитектурно-строит. ун-т. – Волгоград, 2009. – 157 с. – Текст : непосредственный.
8. Галкин, А. Г. Теория и методы расчетов процессов проектирования и технического обслуживания контактной сети : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Галкин Александр Геннадьевич; Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2002. – 370 с. – Текст : непосредственный.
9. Голубков, А. С. Совершенствование методики испытаний токоприемников современного электроподвижного состава / А. С. Голубков, А. Н. Смердин, В. М. Павлов. – Текст : непосредственный // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта : Тезисы докл. VII междунар. симпозиума «Eltrans-2013». – Санкт-Петербург: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 35 – 36.

10. Сидоров, О. А. Применение акселерометров при испытаниях токоприемников / О. А. Сидоров, В. М. Павлов, А. Н. Смердин, А. С. Голубков. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2015. – № 3 (46). – С. 105 – 108.

11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2017661151 (РФ). Программный комплекс для регистрации продольной и поперечной жесткости токоприемника / Смердин А. Н., Голубков А. С., Рыжков А. В. (РФ). – 2017616306. Заявл. 30.06.2017; Опубл. 04.10.2017. – Текст : непосредственный.

12. Распоряжение Правительства РФ от 19.03.2019 № 466-р «Об утверждении программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года». – Текст : электронный. – URL: <https://rulaws.ru/goverment/Rasporyazhenie-Pravitelstva-RF-ot-19.03.2019-N-466-r/> (дата обращения: 01.10.2020).

### References

1. *Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 17.06.2008 № 877-r «O Strategii razvitiya zhelezodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda»* (Order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 No. 877-r «On the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030»), Available at: <https://legalacts.ru/doc/rasporyazhenie-pravitelstva-rf-ot-17062008-n-877-r/> (accessed 01 October 2020).

2. *Ukaz Prezidenta RF ot 07.07.2011 № 899 (red. ot 16.12.2015) «Ob utverzhdenii prioritnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologiy i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologiy Rossiyskoy Federatsii»* (Decree of the President of the Russian Federation of 07.07.2011 No. 899 (as amended on 16.12.2015) «On the approval of priority directions for the development of science, technology and technology in the Russian Federation and the list of critical technologies of the Russian Federation»), Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/33514> (accessed 01 October 2020).

3. *GOST 32204-2013 Tokopriyemniki zhelezodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Obshchiye tekhnicheskkiye usloviya* (Pantographs of railway electric rolling stock. General technical conditions), Moscow, Standartinform, 2014, 24 p.

4. Smerdin A. N., Golubkov A. S., Pavlov V. M., Chertkov I. E., Ryzhkov A. V. *Patent RU 178813*, 19.04.2018.

5. Kalashnikov M. O. *Diagnostika i kontrol' kachestva stroitel'nykh konstruksiy vibratsionnym metodom* (Diagnostics and quality control of building structures by vibration method). Doctor's thesis, Orel, State University – Educational, research and production complex, 2011, 154 p.

6. Korobko V. I., Aldushkin R. V., Boyarkina O. V. Experimental studies of steel trusses with parallel belts on static and dynamic effects [Eksperimental'nyye issledovaniya stal'nykh ferm s parallel'nymi poyasami na staticheskiye i dinamicheskiye vozdeystviya]. *Izvestiia OrelGTU. Seriya «Fundamental and applied problems of engineering and technology»*, 2009, no. 2, pp. 39 – 43.

7. Kuleshova A. N. *Prodol'no-poperechnyye kolebaniya sostavnogo sterzhnya* (Longitudinal-transverse vibrations of a compound rod). Doctor's thesis, Volgograd, Volgograd state university of architecture and civil engineering, 2009, 157 p.

8. Galkin A. G. *Teoriya i metody raschetov protsessov proyektirovaniya i tekhnicheskogo obsluzhivaniya kontaktnoy seti* (Theory and methods of calculation of design processes and maintenance of a contact network). Thesis of Grand Dr. in Engineering, Yekaterinburg, USURT, 2002, 370 p.

9. Golubkov A. S., Smerdin A. N., Pavlov V. M. Improvement of test methods for current collectors of modern electric rolling stock [Sovershenstvovaniye metodiki ispytaniy tokopriyemnikov sovremennogo elektropodvizhnogo sostava]. *Elektrifikatsiya i razvitie infrastruktury energoobespecheniya tiagi poezdov skorostnogo i vysokoskorostnogo zhelezodorozhnogo transporta : Tezisy dokladov VII mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans-2013»* (Electrification and development of energy infrastructure for traction of high-speed and high-speed railway transport: Abstracts. report VII int. symposium «Eltrans-2013»). – Saint-Petersburg, 2013, pp. 35 – 36.

10. Sidorov O. A., Pavlov V. M., Smerdin A. N., Golubkov A. S. The use of accelerometers when testing pantographs [Primeneniye akselerometrov pri ispytaniyakh tokopriyemnikov]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2015, no. 3 (46), pp. 105 – 108.

11. Smerdin A. N., Golubkov A. S., Ryzhkov A. V. *Certificate on the official registration of the computer program 2017661151 (RF) 04.10.2017.*

12. *Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 19.03.2019 № 466-r «Ob utverzhdenii programmy razvitiya OAO «RZHD» do 2025 goda»* (Order of the Government of the Russian Federation of 19.03.2019 No. 466-r «On approval of the development program of Russian Railways until 2025»), Available at: <https://rulaws.ru/government/Rasporyazhenie-Pravitelstva-RF-ot-19.03.2019-N-466-r/> (accessed 01 October 2020).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Слатин Анатолий Игоревич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОМГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОМГУПС.

Тел.: +7-3812-31-34-46.

E-mail: slatin\_omgups@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Slatin Anatoly Igorevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate of the department « Power supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7-3812-31-34-46.

E-mail: slatin\_omgups@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Слатин, А. И. Совершенствование методики экспериментального определения жесткости системы подвижных рам однорычажных токоприемников электроподвижного состава / А. И. Слатин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 52 – 60.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Slatin A. I. Improvement of the methodique's for the experimental measurement of the systems of moving single-arms pantograph's rigidity electric locomotives. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 52 – 60 (In Russian).

УДК 625.14

**В. И. Жигар**

Республиканское унитарное предприятие «Ремпуть Белорусской железной дороги» – структурное подразделение «Путевая машинная станция Барановичи», г. Барановичи, Республика Беларусь

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗВЕНОСБОРОЧНОЙ ЛИНИИ КБ03

**Аннотация.** Для повышения уровня механизации и автоматизации процессов сборки рельсошпальной решетки на производственных базах путевых машинных станций устанавливаются звеносборочные линии. На Белорусской железной дороге в 2012 г. была внедрена полуавтоматическая звеносборочная линия марки КБ03 для сборки рельсошпальной решетки на железобетонных шпалах с промежуточным скреплением СБ-3. Повышение производительности данной линии – приоритетное направление в исследованиях, поскольку в современных условиях наблюдается повышение объемов просроченных ремонтов железнодорожных путей. В ходе исследования определено, что наиболее рациональным решением по изучению работы звеносборочной линии и поиску путей повышения производительности ее работы является использование средств имитационного моделирования. После изучения технической и иной сопроводительной документации была разработана имитационная модель звеносборочной линии КБ03. Затем выполнена валидация разработанной модели, в ходе чего она была признана заслуживающей доверие и пригодной для проведения экспериментов. На основании анализа результатов проведенных на модели экспериментов были сформированы решения по управлению производственным процессом работы звеносборочной линии КБ03 для получения максимального прироста ее производительности. Проведен расчет экономической целесообразности внедрения на производстве предлагаемых изменений и корректировок технологического процесса работы звеносборочной линии.

**Ключевые слова:** путевая машинная станция, звеносборочная линия, имитационная модель, валидация, эксперименты, повышение производительности, экономическая эффективность.

**Victor I. Zhihar**

Republican unitary enterprise «Remput of the Belarusian Railways» structural unit track machine station Baranovichi, Baranovichi, Republic of Belarus

## IMPROVING THE PRODUCTIVITY OF THE ASSEMBLY LINE KB03

**Abstract.** To increase the level of mechanization and automation of the assembly processes of rail and sleepers, link assembly lines are installed at the production bases of the track machine stations. In 2012, a semi-automatic link assembly line of KB03 brand was introduced on the Belarusian Railways for the assembly of a rail-and-sleep grid on reinforced concrete sleepers with an SB-3 intermediate fastening. Increasing the productivity of this line is a priority area in research, since in modern conditions there is an increase in the volume of overdue railway track repairs. In the course of the study, it was determined that the most rational solution for studying the work of a link assembly line and finding ways to increase the productivity of its work is to use simulation tools. After studying the technical and other accompanying documentation, a simulation model of the KB03 assembly line was developed. Then the developed model was validated, during which it was found trustworthy and suitable for experiments. Based on the analysis of the results of the experiments carried out on the model, solutions were formed to control the production process of the KB03 assembly line to obtain the maximum increase in its productivity. The calculation of the economic feasibility of introducing the proposed changes and adjustments to the technological process of the link assembly line in production was carried out.

**Keywords:** track machine station, assembly line, simulation model, validation, experiments, productivity improvement, economic efficiency.

На железной дороге Республики Беларусь принята звеньевая технология укладки и ремонта пути, при которой работы по разборке, сборке и ремонту звеньев рельсошпальной решетки вынесены с фронтов производства работ на стационарные производственные базы путевых машинных станций. До 2012 г. на Белорусской железной дороге сборка рельсошпальной решетки (далее – РШР) на железобетонных шпалах осуществлялась на производственных базах путевых машинных станций (далее – ПМС) вручную с использованием ручного инструмента и средств малой механизации. В 2012 г. на ПМС Барановичи в целях увеличения производительности сборки РШР и повышения уровня механизации труда на Белорусской железной дороге была введена в эксплуатацию полуавтоматическая звеносборочная точная линия KB03 (рисунок 1), сконструированная на базе звеносборочной линии 1ПЗЛ-100.



Рисунок 1 – Звеносборочная линия KB03

Линия KB03 предназначена для сборки звеньев колеи 1520 мм на рельсах типов Р65/Р50 со скреплением СБ-3 и эпорой 1840/2000 шпал/км. Линия представляет собой систему агрегатов, станков и механизмов, установленных в определенной технологической последова-

тельности и связанных между собой межоперационными транспортирующими устройствами [1].

За последние годы на Белорусской железной дороге существенно выросли грузоперевозки, увеличились объемы работ по ремонту железнодорожных путей. Таким образом, повышение производительности работ по сборке РШР на базах ПМС в общем и повышение производительности звеносборочной линии КБ03 в частности является одним из приоритетных направлений деятельности Белорусской железной дороги.

Наиболее рациональным инструментом для исследования технологических процессов сборки РШР на линии КБ03 [2, 3] с целью их оптимизации для сокращения затрат и повышения производительности является создание цифровой имитационной модели [4] с помощью программной системы имитационного моделирования «Tecnomatix Plant Simulation». В основу создания имитационной модели звеносборочной линии КБ03 в системе «Tecnomatix Plant Simulation» положен принцип имитации функционирования всей системы через имитацию функционирования ее отдельных объектов с соблюдением характера связей между ними и последовательности их взаимодействия [5, 6]. Разработанная по методике [7, 8] имитационная модель звеносборочной линии КБ03 (рисунок 2) дает возможность проведения необходимых исследований реального объекта на компьютере без вмешательства в существующий производственный процесс, а также осуществления сбора необходимых статистических данных в процессе моделирования всей моделируемой системы и ее отдельных объектов.

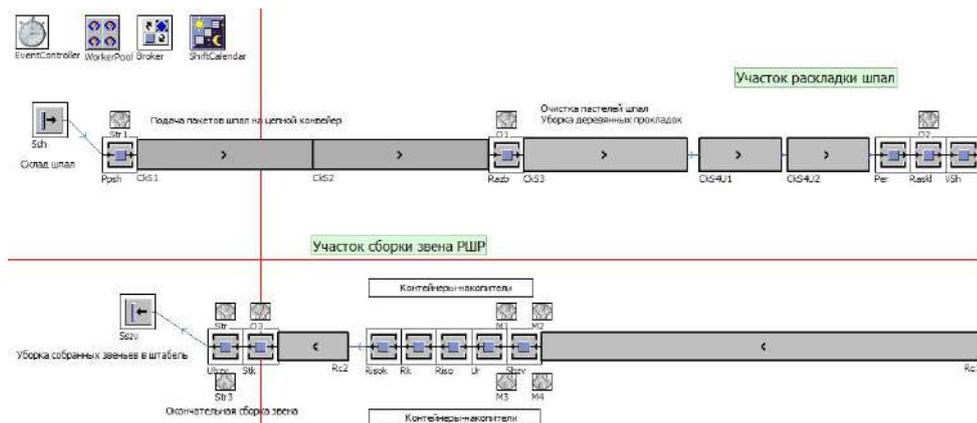


Рисунок 2 – Общий вид имитационной модели звеносборочной линии КБ03

После построения имитационной модели выполнена ее валидация [9] (проверка адекватности имитационной модели) – проверка того, что имитационная модель является допустимым представлением реальной системы, основываясь на ее целевой направленности.

В учебном пособии [10] установлено, что построенная имитационная модель соответствует всем необходимым условиям, которые приведены ниже.

1. Непротиворечивость. Результаты моделирования не противоречат логике, модель построена в строгом соответствии с существующим технологическим процессом сборки РШР на звеносборочной линии КБ03 и установленными нормами времени на выполнение технологических операций, структура модели соответствует структуре звеносборочной линии.

2. Чувствительность. При изменении исходных данных для объектов разработанной имитационной модели значение ее выходных параметров изменяется, логика изменений сохраняется.

3. Точность и реалистичность. Выходные данные модели находятся в пределах допустимых значений и соответствуют фактическим данным. При оценке погрешности моделирования любая имитационная модель является неточной из-за наличия ошибок при аппроксимации реальных процессов и их реализации в имитационной модели. К ошибкам аппроксимации добавляются также ошибки, связанные с розыгрышем случайных значений некоторых

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

параметров имитационной модели [11]. Также существует ряд факторов производственного и непромышленного характера, прямо или косвенно влияющих на выходные данные реальной системы, которые невозможно или нецелесообразно учитывать в имитационной модели (плохие погодные условия, задержка в поставке материалов верхнего строения пути на производственную базу, внезапные отказы технических средств, недостаточное количество работников и т. д.). Поэтому оценивается суммарная погрешность моделирования. Для проверки точности и реалистичности разработанной имитационной модели и оценки погрешности моделирования была выполнена проверка соответствия статистических данных производительности работы звеносборочной линии по результатам имитации (рисунок 3) и фактической (рисунок 4).

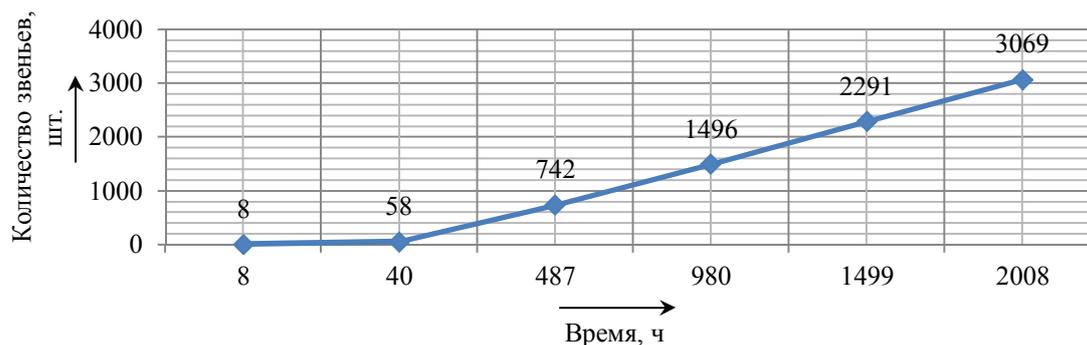


Рисунок 3 – График производительности звеносборочной линии по результатам имитации



Рисунок 4 – График фактической производительности звеносборочной линии

Промежутки времени 8, 40, 487, 980, 1499, 2008 ч соответствуют периодам статистической аналитики и отчетности в работе предприятия и установлены в соответствии с Постановлением [12].

Фактическая среднеарифметическая производительность звеносборочной линии за 204 рабочие смены за период декабрь 2014 г. – октябрь 2019 г. составляет 7,86 звена/смену. Производительность звеносборочной линии за смену по результатам имитации составляет 8 звеньев/смену. Погрешность результатов имитации относительно фактических данных составляет 1,75 %.

4. Работоспособность. Система имитационного моделирования «Tecnomatix Plant Simulation» автоматически накапливает ряд статистических данных по всей модели в целом и по каждому ее объекту в отдельности.

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

В качестве главного выходного параметра звеносборочной линии установлена ее производительность, входных параметров – надежность технических средств, количество и квалификация работников, занятых на линии.

Эксперимент по определению зависимости производительности звеносборочной линии от квалификационного разряда работников состоит из двух этапов: на первом этапе устанавливается четвертый квалификационный разряд работников, на втором этапе – пятый разряд. На рисунке 5 представлена диаграмма, отображающая значения производительности звеносборочной линии по фактическим нормам, при использовании работников четвертого разряда, при использовании работников пятого разряда.

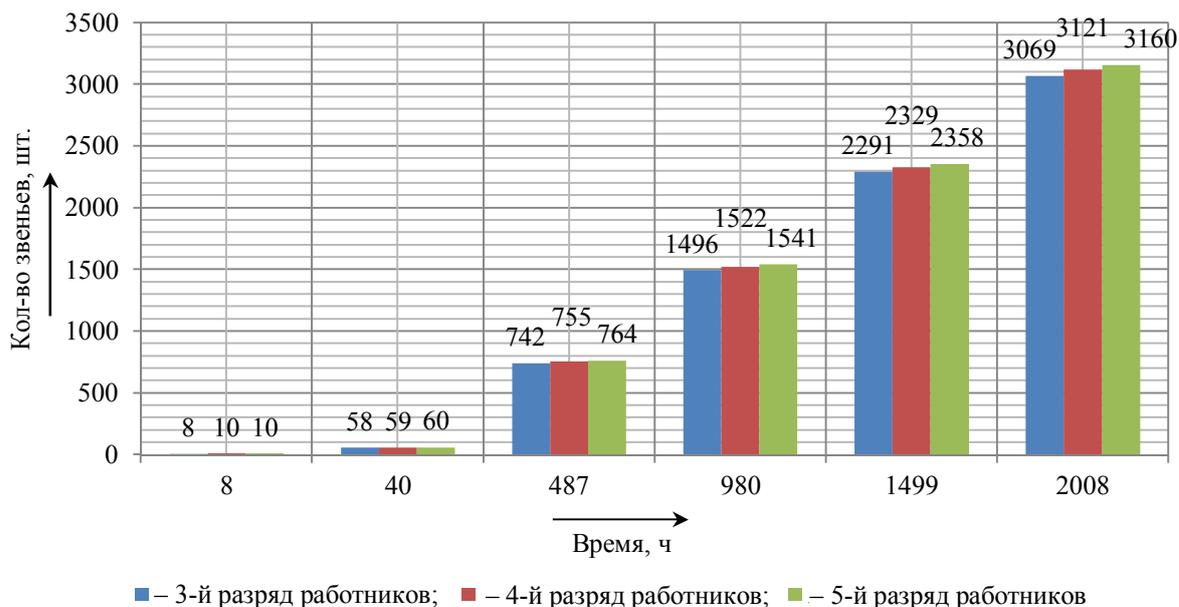


Рисунок 5 – Производительность звеносборочной линии по результатам эксперимента

При сборке РШР на звеносборочной линии четыре монтера пути, занятые на участке сборки путевой решетки, помимо выполнения операций по комплектации шпал материалами верхнего строения пути производят дополнительные работы – обрезают изолирующие втулки для стыковых шпал, пополняют элементами скрепления контейнеры-накопители, укладывают стыковые накладки на собранное звено. Время на выполнение данных видов работ включается в норму времени на сборку звена и называется оперативным [13]. Использование дополнительных монтеров пути из числа работников предприятия на участке сборки звеньев путевой решетки, которые будут выполнять перечисленные выше вспомогательные операции, позволит сократить оперативное время, тем самым уменьшить норму времени на сборку звена РШР. Необходимое и достаточное количество дополнительных монтеров пути – два, так как технологически сборка звена РШР осуществляется с двух сторон от оси звена по торцам шпал, что предусмотрено конструкцией линии. Поскольку работы, включаемые в оперативное время, не требуют высокой квалификации от работников, для них установлен третий, минимально допустимый квалификационный разряд.

На рисунке 6 представлена диаграмма, отображающая значения производительности звеносборочной линии по фактическим нормам и при использовании двух дополнительных работников.

В процессе эксплуатации звеносборочной линии КБ03 под влиянием различных факторов происходит изменение ее свойств, определяющих качество и эффективность функционирования технических средств, некоторые из технических средств выходили из строя. Проведение и анализ результатов экспериментов на имитационной модели, в которой вероятность

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

безотказной работы технических средств звеносборочной линии будет 95 % (данный параметр не достигает максимального значения, поскольку всегда остается вероятность внезапного отказа), позволяет принять решение о целесообразности затрат времени и ресурсов для повышения фактической надежности технических средств звеносборочной линии.

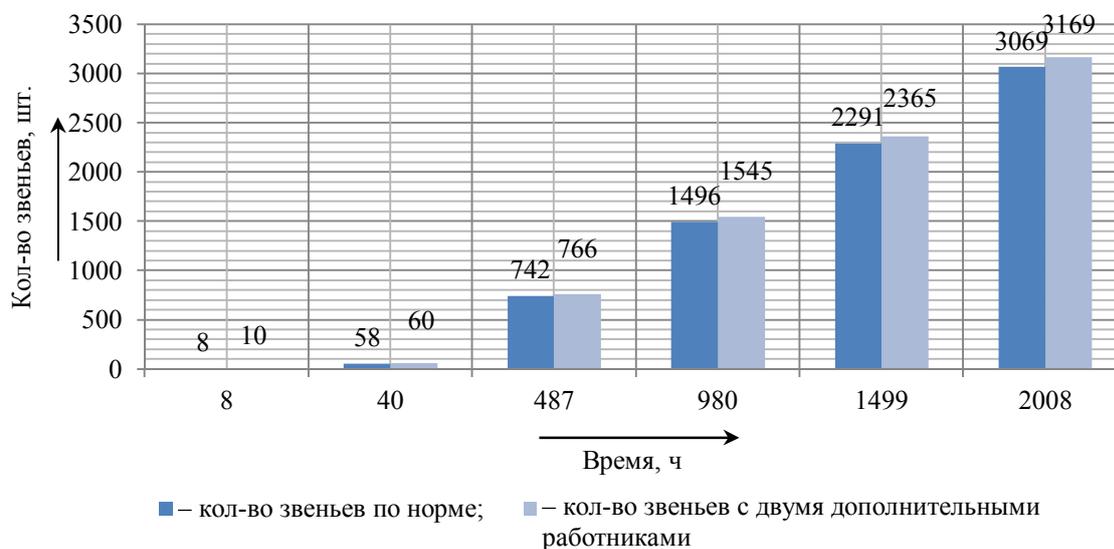


Рисунок 6 – Производительность звеносборочной линии по результатам эксперимента

На рисунке 7 представлена диаграмма, отображающая показатели производительности звеносборочной линии по фактическим нормам и при вероятности безотказной работы технических средств 95 %.

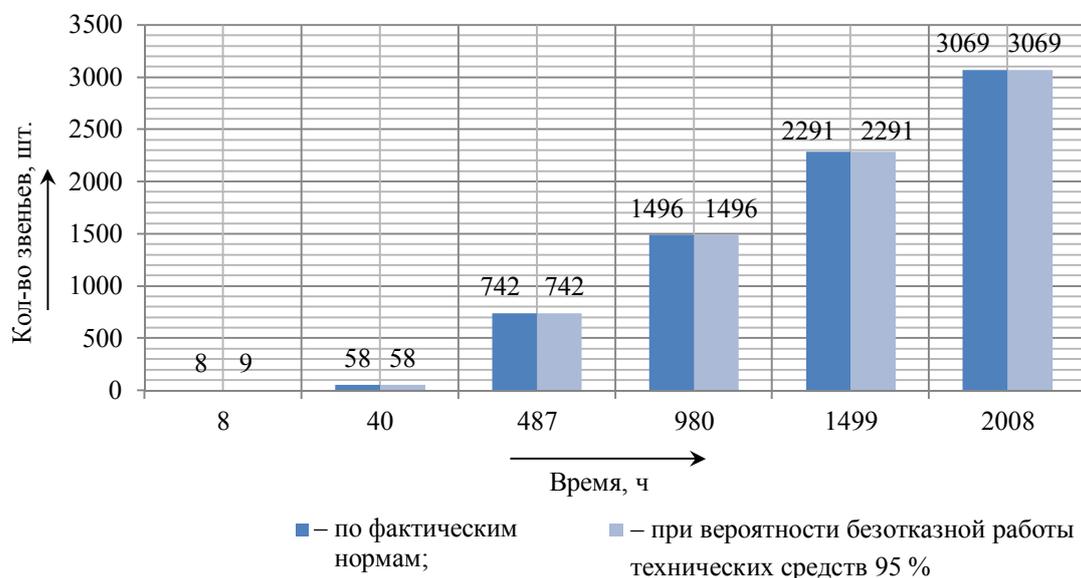


Рисунок 7 – Производительность звеносборочной линии по результатам эксперимента

На рисунке 8 представлена диаграмма, отображающая показатели производительности звеносборочной линии в существующих условиях (по фактическим нормам) и в улучшенных условиях (на линии используются работники (монтеры пути, стропальщики) пятого квалификационного разряда, к работам привлечены два дополнительных работника (монтеры пути третьего квалификационного разряда), вероятность безотказной работы технических средств составляет 95 %).

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

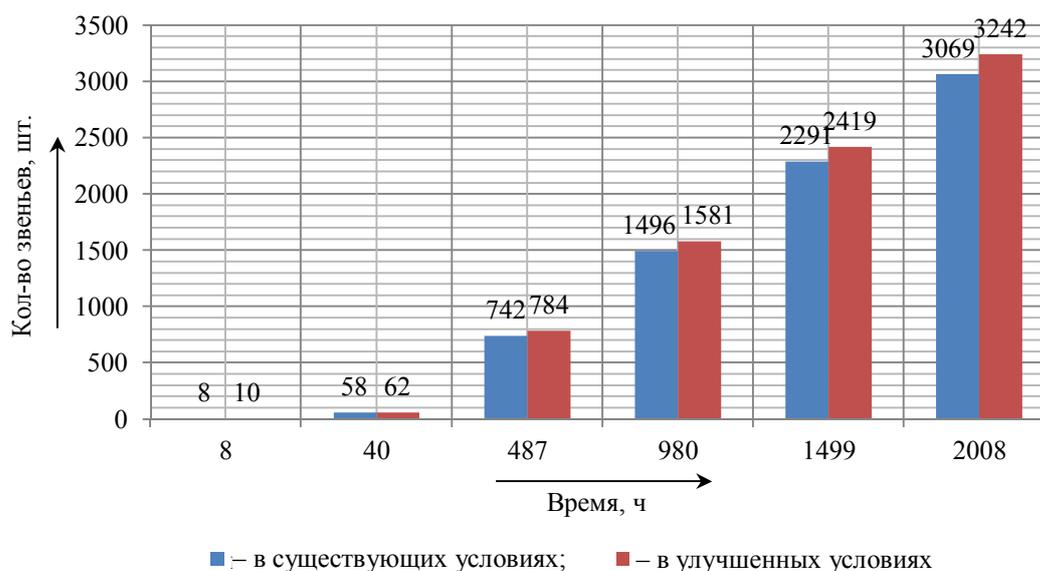


Рисунок 8 – Производительность звеносборочной линии по результатам эксперимента

Значения производительности звеносборочной линии согласно проведенным экспериментам представлены в сводной таблице 1.

Таблица 1 – Производительность звеносборочной линии

Наименование эксперимента	Производительность		Отношение к производительности при фактических условиях	
	звеньев	км	км	%
При фактических условиях	3069	76,725	–	–
При использовании работников 4-го квалификационного разряда	3121	78,025	+ 1,3	+ 1,69
При использовании работников 5-го квалификационного разряда	3160	79	+ 2,275	+ 2,97
При надежности технических средств 95 %	3069	76,725	–	–
При использовании двух дополнительных работников (монтеров пути из числа работников предприятия)	3169	79,225	+ 2,5	+ 3,26
При оптимальных условиях	3242	81,05	+ 4,325	+ 5,64

В ходе экспериментов установлено, что вместе с ростом производительности работы звеносборочной линии КБ03 достигается положительный эффект в плане увеличения загрузки оборудования и снижения загрузки работников, занятых на линии.

Для расчета экономической эффективности результатов экспериментов используется универсальный показатель работы участка сборки путевой решетки – стоимость одного километра собранной РШР на звеносборочной линии, определяемый по формуле:

$$C = \Pi / \Sigma Z.$$

где  $\Pi$  – производительность звеносборочной линии за рассматриваемый период (2008 ч), км;  
 $\Sigma Z$  – суммарные затраты предприятия на сбору РШР за рассматриваемый период (2008 ч), белор. руб.

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Основными статьями расходов предприятия при сборке РШР на звеносборочной линии являются электроэнергия, расходуемая при работе звеносборочной линии; амортизационные отчисления; заработная плата работникам, занятым на звеносборочной линии; материалы, необходимые для сборки РШР.

На рисунке 9 представлен график, отображающий затраты предприятия по основным статьям расходов при сборке РШР на звеносборочной линии согласно проведенным экспериментам.

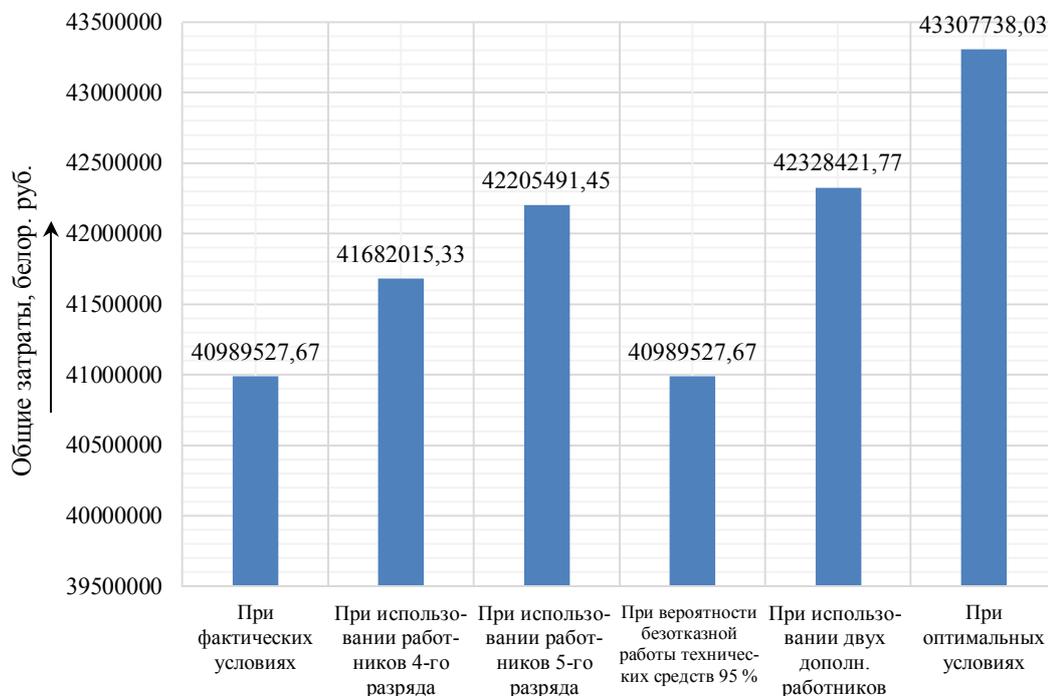


Рисунок 9 – Общие затраты предприятия

Значения стоимости одного километра собираемой РШР на звеносборочной линии КБ03 согласно проведенным экспериментам представлены в сводной таблице 2.

Таблица 2 – Стоимость одного километра РШР

Наименование эксперимента	Стоимость 1 км, бел. руб.	Отношение к стоимости при фактических условиях	
		бел. руб.	%
При фактических условиях	534239,53	–	–
При использовании работников 4-го квалификационного разряда	534213,59	– 25,94	- 0,0049
При использовании работников 5-го квалификационного разряда	534246,73	+ 7,20	+ 0,0013
При надежности технических средств 95 %	534239,5265	0	0
При использовании двух дополнительных работников	534281,12	+ 41,59	+ 0,0078
При оптимальных условиях (на линии используются работники (монтеры пути, стропальщики) 5-го квалификационного разряда, к работам привлечены два дополнительных работника из числа работников предприятия (монтеры пути 3-го квалификационного разряда), вероятность безотказной работы технических средств составляет 95 %)	534333,60	+ 94,07	+ 0,0176

При повышении квалификации работников (монтеров пути, стропальщиков), занятых на звеносборочной линии, производительность сборки РШР увеличивается за годовой период относительно фактической на 1,69 и 2,97 % при использовании работников 4-го и 5-го ква-

лификационных разрядов соответственно. При использовании на звеносборочной линии двух дополнительных работников (монтеров пути 3-го квалификационного разряда из числа работников предприятия) производительность сборки РШР за годовой период относительно фактической увеличивается на 3,26 %. При повышении вероятности безотказной работы технических средств до 95 %, производительность сборки за годовой период изменяется незначительно, что обусловлено этапом нормальной эксплуатации звеносборочной линии. При оптимальных условиях (при использовании работников (монтеров пути, стропальщиков), занятых на звеносборочной линии, пятого квалификационного разряда, при использовании на звеносборочной линии двух дополнительных работников (монтеров пути третьего квалификационного разряда), при повышении вероятности безотказной работы технических средств до 95 %) достигается значительный положительный эффект: увеличивается загрузка оборудования, снижается загрузка рабочего персонала, увеличение производительности работы звеносборочной линии за годовой период относительно фактической составляет 5,64 % (4,325 км пути). В ходе расчетов экономической эффективности результатов экспериментов было установлено, что увеличение затрат предприятия при внесении изменений в технологический процесс сборки РШР на звеносборочной линии на один километр собираемой РШР относительно фактических при каждом из проведенных экспериментов значительно меньше 1 %, следовательно, рост производительности сборки РШР на звеносборочной линии существенно перекрывает рост затрат предприятия на 1 км собираемой РШР.

### Список литературы

1. Технологический комплекс для сборки звеньев железнодорожного пути с железобетонными шпалами: Руководство по эксплуатации. КБ03-00.000 РЭ. – Барановичи : ОАО «Барановичский завод автоматических линий», 2011. – 100 с. – Текст : непосредственный.
2. Имитационное моделирование организации производственных процессов машиностроительных предприятий в инструментальной среде Tecnomatix Plant Simulation : лабораторный практикум / И. Г. Абрамова [и др.]. – Самара: Самарский гос. аэрокосмический ун-т, 2014. – 80 с. – Текст : непосредственный.
3. Агапов, А. С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Агапов. – Москва: Юрайт, 2014. – 389 с. – Текст : непосредственный.
4. Журавлев, С. С. Краткий обзор методов и средств имитационного моделирования производственных систем / С. С. Журавлев. – Текст : электронный // Имитационное моделирование технических систем и технологических процессов. – Новосибирск: Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН. – URL: [simulation.su/uploads/files/default/obzor-2010](http://simulation.su/uploads/files/default/obzor-2010) (дата обращения: 03.08.2020).
5. Официальный сайт Siemens: Siemens ingenuity for life. Tecnomatix.: Plant Simulation. Текст : электронный. – URL: <http://www.plm.automation.siemens.com/ru> (дата обращения: 03.08.2020).
6. Сырецкий, Г. А. Стратегии и методы Plant Simulation как современная основа обучения имитационному моделированию / Г. А. Сырецкий. – Текст : непосредственный // Имитационное моделирование. Теория и практика : сборник докладов четвертой всерос. науч.-практ. конф. «ИММОД-2009». – Санкт-Петербург : ОАО «ЦТСС», 2009. – Т. 2. – С. 254 – 257. – Текст : непосредственный.
7. Law, A. M. How to build valid and credible simulation models, *Proc. of the Winter Simulation Conf.*, Miami (USA), 2008, pp. 39 – 47.
8. Конюх, В. Л. Развитие средств имитационного моделирования / В. Л. Конюх, Я. Б. Игнатьев, В. В. Зиновьев. – Текст : непосредственный // Имитационное моделирование. Теория и практика : сборник докладов второй всерос. науч.-практ. конф. «ИММОД-2005». – Санкт-Петербург : ОАО «ЦТСС», 2005. – Т. 1. – С. 122 – 126.

9. Яцкив, И. В. Проблема валидации имитационной модели и ее возможные решения / И. В. Яцкив. – Текст : непосредственный // Теория имитационного моделирования: ИММОД-2003 : материалы первой всерос. науч.-практ. конф. по вопросам применения имитационного моделирования в промышленности. – Санкт-Петербург : ФГУП ЦНИИ технологии судостроения, 2003. – Т. 1. – С. 211 – 217.

10. Смородинский, С. С. Оптимизация решений на основе методов и моделей математического программирования : учебное пособие / С. С. Смородинский, Н. В. Батин. – Минск : БГУИР, 2003. – 136 с. – Текст : непосредственный.

11. Якимов, А. И. Технология имитационного моделирования систем управления промышленных предприятий : монография / А. И. Якимов. – Могилев : Белорусско-Российский университет, 2010. – 304 с. – Текст : непосредственный.

12. Постановление Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь от 22 октября 2018 г. № 77 «Об установлении расчетной нормы рабочего времени на 2019 год». – URL: [https://kodeksy-by.com/norm\\_akt/source-МинтрудаРБ/type-Постановление/77-22.10.2018.htm](https://kodeksy-by.com/norm_akt/source-МинтрудаРБ/type-Постановление/77-22.10.2018.htm) (дата обращения: 20.01.2020). – Текст : электронный.

13. Приказ начальника Белорусской железной дороги В. Н. Морозова от 13.12.2013 № 397Н «Об утверждении нормы времени на сборку звеньев рельсошпальной решетки на железобетонных шпалах скрепления СБ-3 на полуавтоматической звеносборочной поточной линии». – URL: [https://transtekhnika.by/otraslevaya-baza-dannyh-po-trudu/?PAGEN\\_1=3](https://transtekhnika.by/otraslevaya-baza-dannyh-po-trudu/?PAGEN_1=3) (дата обращения: 20.01.2020). – Текст : электронный.

## References

1. *Tekhnologicheskii kompleks dlia sborki zven'ev zheleznodorozhnogo puti s zhelezobetonnyimi shpalami: Rukovodstvo po ekspluatatsii. KB03-00.000 RE* (Technological complex for the assembly of railway track links with reinforced concrete sleepers. Manual. KB03-00.000 RE). Baranovichi, Open Joint Stock Company «Baranovichi Plant of Automatic Lines», 2011, 100 p.

2. Abramov I. G. [and others]. *Imitatsionnoe modelirovanie organizatsii proizvodstvennykh protsessov mashino-stroitel'nykh predpriatii v instrumental'noi srede Tecnomatix Plant Simulation: labora-torny praktikum* (Simulation modeling of the organization of production processes of machine-building enterprises in the instrumental environment Tecnomatix Plant Simulation: laboratory practice). Samara: Samara state aerospace university, 2014, 80 p.

3. Agapov A. S. *Imitatsionnoe modelirovanie: uchebnik i praktikum dlia akademicheskogo bakalavriata* (Simulation modeling: textbook and workshop for academic bachelor's degree). Moscow: Yurait, 2014, 389 p.

4. Zhuravlev S. S. A brief overview of methods and tools for simulation of production systems [Kratkii obzor metodov i sredstv imitatsionnogo modelirovaniia proizvodstvennykh sistem]. *Imitatsionnoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem i tekhnologicheskikh protsessov – Simulation of technical systems and technological processes*, 2010, Available at: [simulation.su ›uploads / files / default / obzor-2010](http://simulation.su/uploads/files/default/obzor-2010) (accessed 03 August 2019).

5. *Ofitsial'nyi sait: Siemens ingenuity for life. Tecnomatix.: Plant Simulation* (Siemens official website: Siemens ingenuity for life. Tecnomatix.: Plant Simulation), Available at: <http://www.plm.automation.siemens.com/ru> (accessed 03 August 2019).

6. Syretsky G. A. Plant Simulation Strategies and Methods as a Modern Basis for Teaching Simulation Modeling [Strategii i metody Plant Simulation kak sovremennaia osnova obucheniia imitatsionnomu modelirovaniu]. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriia i praktika: sbornik dokladov chetvertoi vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «IMMOD-2009»* (Simulation modeling. Theory and Practice: collection of reports of the fourth all-Russian scientific and practical conference IMMOD-2009). – St. Petersburg, 2009, vol. 2, pp. 254 – 257.

7. Law, A. M. How to build valid and credible simulation models, Proc. of the Winter Simulation Conf., Miami (USA), 2008, pp. 39 – 47.

8. Koniukh V. L., Ignat'ev Ia. B., Zinov'ev V. V. Development of simulation tools [Razvitie sredstv imitatsionnogo modelirovaniia]. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriia i praktika: sbornik dokladov vtoroi vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «IMMOD-2005»* (Simulation modeling. Theory and Practice: collection of reports of the second all-Russian scientific and practical conference IMMOD-2005). – St. Petersburg, 2005, vol. 1, pp. 122 – 126.

9. Yatskiv I. V. The problem of validation of the simulation model and its possible solutions [Problema validatsii imitatsionnoi modeli i ee vozmozhnye resheniia]. *Teoriia imitatsionnogo modelirovaniia: IMMOD-2003: materialy pervoi vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po voprosam primeneniia imitatsionnogo modelirovaniia v promyshlennosti* (Theory of simulation modeling: IMMOD-2003: the first All-Russian scientific-practical conference on the application of simulation in industry). – St. Petersburg, 2003, vol. 1, pp. 211 – 217.

10. Smorodinsky S. S., Batin N. V. *Optimizatsiia reshenii na osnove metodov i modelei matematicheskogo programmirovaniia: uchebnoe posobie* (Optimization of solutions based on methods and models of mathematical programming: textbook manual). Minsk: BSUIR, 2003, 136 p.

11. Yakimov A. I. *Tekhnologiia imitatsionnogo modelirovaniia sistem upravleniia promyshlennykh predpriatii: monografiia* (Technology of simulation modeling of control systems of industrial enterprises: monograph). Mogilev: Belarusian-Russian University, 2010, 304 p.

12. *Postanovlenie Ministerstva truda i sotsial'noi zashchity Respubliki Belarus' ot 22 oktiabria 2018 g. № 77 «Ob ustanovlenii raschetnoi normy rabocheho vremeni na 2019 god»* («On the establishment of the estimated working time for 2019», Resolution of the Ministry of Labor and Social Protection of the Republic of Belarus dated October 22, 2018 No. 77), Available at: [https://kodeksy-by.com/norm\\_akt/source-МинтрудаРБ/type-Постановление/77-22.10.2018.htm](https://kodeksy-by.com/norm_akt/source-МинтрудаРБ/type-Постановление/77-22.10.2018.htm) (accessed 20 January 2020).

13. *Prikaz nachal'nika Belorusskoi zheleznoi dorogi V. N. Morozova ot 13.12.2013 № 397N «Ob utverzhdenii normy vremeni na sborku zven'ev rel'soshpal'noi reshetki na zhelezobetonnykh shpalakh skrepleniia SB-3 na poluavtomaticheskoi zvenosborochnoi potochnoi linii»* («On approval of the Time standard for the assembly of rail and sleepers on the reinforced concrete sleepers, fastening SB-3 on a semi-automatic link assembly line», Order of the Head of the Belarusian Railway V.N. Morozov dated 12/13/2013 No. 397N), Available at: [https://transtekhnika.by/otraslevaya-bazadannyh-po-trudu/?PAGEN\\_1=3](https://transtekhnika.by/otraslevaya-bazadannyh-po-trudu/?PAGEN_1=3) (accessed 20 January 2020).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Жигар Виктор Игоревич

Республиканское унитарное предприятие «Ремпуть Белорусской железной дороги» – структурное подразделение «Путевая машинная станция Барановичи».

Брестская ул., д. 280, г. Барановичи, 225320, Республика Беларусь.

Магистр технических наук, аспирант кафедры «Детали машин, путевые и строительные машины», УО «Белорусский государственный университет транспорта».

Тел.: +375 29 (163) 67-20-70.

E-mail: viktor.zhigar@mail.ru.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Жигар, В. И. Повышение производительности звеносборочной линии КВ03 / В. И. Жигар. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 60 – 70.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Zhihar Victor Igorevich

Republican unitary enterprise «Remput of the Belarusian Railways» structural unit track machine station Baranovichi.

Brestskaya Str., 280, Baranovichi, 225320, Republic of Belarus.

Master of technical sciences, post-graduate student «Machine parts, track and construction machines», Belarusian State University of Transport.

Тел.: +375 29 (163) 67-20-70.

E-mail: viktor.zhigar@mail.ru.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Zhihar V. I. Improving the productivity of the assembly line KB03. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 60 – 70 (In Russian).

**П. Н. Блинов, В. В. Томилов**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

***Аннотация.** В статье рассмотрены организационные особенности выполнения федерального закона Российской Федерации «О транспортной безопасности» в части соблюдения требований по обеспечению транспортной безопасности объектов (зданий, строений, сооружений), не относящихся к объектам транспортной инфраструктуры и расположенных на земельных участках, соседствующих с объектами транспортной инфраструктуры и отнесенных к охраняемым зонам земель транспорта. Систематизированы мероприятия, обязательные для реализации на таких транспортных объектах. В работе использованы методы системного анализа, сравнительный метод, методы теоретического познания (формализация), общелогические методы и приемы исследования (анализ, обобщение, классификация, аналогия).*

***Ключевые слова:** транспорт, железнодорожные предприятия, организация производства, транспортная безопасность, требования по обеспечению транспортной безопасности, субъект транспортной инфраструктуры, объект транспортной инфраструктуры, охраняемые зоны земель транспорта*

**Pavel N. Blinov, Valery V. Tomilov**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **SYSTEM ANALYSIS OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL MEASURES FOR TRANSPORT SECURITY AT RAILWAY ENTERPRISES**

***Abstract.** The article deals with the organizational features of the Federal law of the Russian Federation on "transportation security compliance requirements to ensure transport security objects (buildings, structures), not related to transport infrastructure objects and located on land adjacent to transport infrastructure objects in the security zones of land transport. Systematized the activities required for the implementation of such transport facilities. In the work used techniques of systems analysis, comparative method, methods of theoretical knowledge (formalisation), obshhelogicheskie methods and techniques of research (analysis, synthesis, classification, the analogy).*

***Keywords:** transport, railway enterprises, organization of production, transport security, transportation security requirements, the subject of the transport infrastructure, transport infrastructure object, protected areas land transport*

Транспорт и транспортные системы являются важнейшими участниками во всех сферах деятельности любого государства. От того, насколько эффективна и развита транспортная инфраструктура, зависит и общий уровень развития экономики любой страны. Однако, как и все сложные системы, транспортная система подвержена различным внешним воздействиям, и зачастую такое воздействие приводит к негативным, а порой и к трагическим результатам.

Транспорт ввиду специфики его работы является потенциальным источником опасности, а если в его деятельность вмешиваются незаконными агрессивными действиями, то потенциальная опасность становится реальной опасностью с тяжелейшими последствиями [1].

Именно это и привлекает к транспорту террористов всех мастей. Не случайно печальная статистика последних 10 – 15 лет свидетельствует: от 50 до 70 % совершаемых терактов связано с транспортом, причем преимущественно с общественным. Достаточно вспомнить теракты в токийском, мадридском, московском, лондонском, петербургском метро, аэропорту Домодедово, на железнодорожном вокзале Волгограда. Россия имеет протяженные транспортные коммуникации. На ее территории располагаются сотни тысяч транспортных объектов. Только на железных дорогах их свыше 70 тысяч.

В целях повышения устойчивости функционирования транспорта и транспортных организаций, обеспечения безопасности перевозки пассажиров, стабильности и безопасности перевозок грузов, надежности и качества работы объектов транспортной инфраструктуры

(ОТИ) Правительством Российской Федерации разработан комплекс мер, направленных на обеспечение транспортной безопасности.

Понятие «транспортная безопасность» определено Федеральным законом Российской Федерации от 9 февраля 2007 г. №16-ФЗ «О транспортной безопасности» как состояние защищенности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств (ОТИ и ТС) от актов незаконного вмешательства (АНВ) [2].

Данный федеральный закон предусматривает обеспечение транспортной безопасности субъектами транспортной инфраструктуры и перевозчиками на основе единого подхода к оценке угроз, планированию и реализации мероприятий по обеспечению безопасности ОТИ и ТС.

Среди задач обеспечения безопасности населения на транспорте особое значение имеют разработка и реализация требований и мер по обеспечению транспортной безопасности.

К задачам повышения защищенности пассажиров и персонала на транспорте от АНВ, в том числе террористических актов, относятся формирование и реализация комплекса организационных и технических мероприятий, оснащение ОТИ и ТС инженерно-техническими системами и средствами обеспечения транспортной безопасности.

Федеральным законом 16-ФЗ установлено, что объекты транспортной инфраструктуры железнодорожного транспорта – это технологический комплекс, включающий в себя железнодорожные вокзалы и станции, метрополитены, тоннели, эстакады, мосты, объекты систем связи и управления движением транспортных средств, участки железнодорожных путей, посадочные площадки, а также иные обеспечивающие функционирование транспортного комплекса здания, сооружения, устройства и оборудование, определяемые Правительством РФ. Перечень таких зданий, сооружений, устройств и оборудования установлен Постановлением Правительства РФ от 18.07.2016 № 686 [3].

В данном перечне в настоящее время отсутствуют многие крупные железнодорожные предприятия, в том числе те из них, которые являются собственниками транспортных средств или используют их на ином законном основании. Это такие предприятия, как моторвагонные депо, пассажирские и грузовые вагонные депо, локомотивные депо, дистанции электроснабжения и др.

Таким образом, далеко не все предприятия железнодорожного транспорта относятся к категории объектов транспортной инфраструктуры, но могут находиться на их территории (например, на территории станции) или на земельных участках, граничащих с объектами транспортной инфраструктуры и отнесенных к охранным зонам земель транспорта в соответствии с Земельным кодексом РФ [4].

Пример схемы возможного взаимного расположения железнодорожных объектов на местности приведен на рисунке.

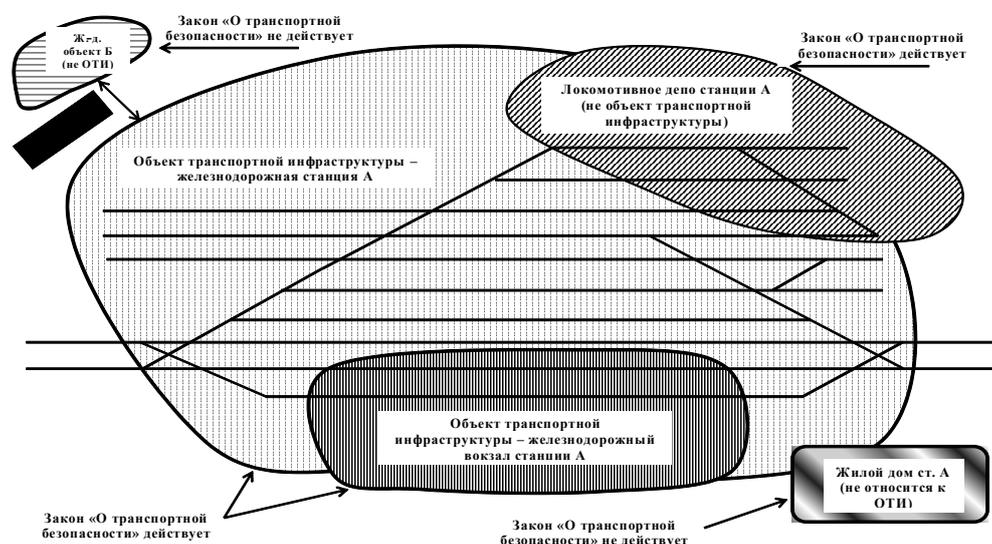


Схема возможного взаимного расположения железнодорожных объектов на местности

На схеме представлен объект транспортной инфраструктуры – железнодорожная станция А, на территории которой располагаются объект транспортной инфраструктуры железнодорожный вокзал станции А, а также к территории станции прилегает локомотивное депо станции А, которое согласно действующей нормативной базе не относится к объектам транспортной инфраструктуры. Кроме того, по соседству, на расстоянии до территории станции более 200 м располагается железнодорожный объект Б, также не относящийся к объектам транспортной инфраструктуры.

Требования, которые необходимо соблюдать для обеспечения транспортной безопасности и антитеррористической защищенности объектов или территорий, устанавливаются в настоящее время Правительством РФ.

Физические лица (персонал предприятия, арендаторы, клиенты, посетители), следующие либо уже находящиеся на ОТИ и ТС, обязаны соблюдать требования, приведенные в Постановлении Правительства РФ от 15 ноября 2014 г. № 1208 [5].

Для ОТИ и ТС железнодорожного транспорта требования установлены Постановлением Правительства РФ от 26.04.2017 № 495 [6].

Принятое 23.01.2016 Постановление Правительства РФ № 29 [7] определяет комплекс организационных и технических мероприятий для зданий, строений и сооружений, которые не относятся к ОТИ, но размещены на земельных участках, непосредственно граничащих с ОТИ. Таким образом, представленное на схеме (см. рисунок) предприятие – локомотивное депо станции А, прилегающее к территории станции, не относящееся к ОТИ, попадает под действие Постановления Правительства РФ № 29.

Если транспортные объекты находятся на расстоянии более 200 м от границы земельного участка, на котором размещен ОТИ, то требования указанного постановления в отношении них не применяются. Не применяются эти требования также в отношении объектов, относящихся к жилым помещениям в соответствии с Жилищным кодексом Российской Федерации [6]. Следовательно, на железнодорожный объект Б и жилой дом станции А, указанные на схеме (см. рисунок), не относящиеся к ОТИ, требования Постановления Правительства РФ № 29 не распространяются.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 29 юридические лица, индивидуальные предприниматели и физические лица обязаны:

1) воспрепятствовать созданию условий, которые способствовали бы совершению АНВ в отношении прилегающего к их территории ОТИ;

2) немедленно сообщать субъекту транспортной инфраструктуры о фактах возможной подготовки к совершению АНВ в отношении прилегающего ОТИ;

3) при выполнении работ, связанных с грузами повышенной опасности или опасными грузами, а также с оружием или боеприпасами, сообщать об этом субъекту транспортной инфраструктуры в письменном виде;

4) при проведении на территории своего объекта культурно-массовых и иных публичных мероприятий сообщать об этом субъекту транспортной инфраструктуры не позднее чем за три дня до дня начала этих мероприятий;

5) обеспечить проведение контроля за перемещением на территорию объекта физических лиц, транспортных средств, грузов и других материальных объектов с целью недопущения перемещения на территорию объекта взрывных устройств или взрывчатых веществ, оружия или боеприпасов;

6) вести учет перемещения на территорию объекта или с его территории физических лиц (с учетом требований Федерального закона от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных» [9]), транспортных средств, грузов и других материальных объектов;

7) организовать видеозапись мероприятий, указанных в п. 5, обеспечить хранение записанных видеоматериалов, а также хранение данных и персональных сведений, предусмотренных п. 6, на бумажных и (или) электронных носителях в течение месяца.

В целях обеспечения транспортной безопасности ОТИ и ТС в соответствии с Постанов-

лением Правительства РФ от 26.04.2017 № 495 субъекты транспортной инфраструктуры и перевозчики обязаны выполнять ряд организационно-технических мер. При этом следует учесть, что Постановлением Правительства РФ № 29 реализация некоторых из этих или аналогичных мер также обязательна для зданий, строений, сооружений, которые не относятся к ОТИ, но размещены на земельных участках, граничащих с ОТИ.

К таким мерам требуется отнести следующие:

1) создание или привлечение на договорной основе для защиты объектов подразделений безопасности, обеспечивающих реагирование на подготовку совершения или совершение АНВ на территории объектов, а также на нарушения пропускного режима;

2) выделение и оборудование отдельных помещений или пунктов для размещения сотрудников подразделений безопасности объекта и для управления техническими средствами обеспечения безопасности;

3) оснащение этих пунктов необходимыми техническими средствами управления и связи с целью взаимодействия сотрудников подразделения безопасности данного объекта с силами обеспечения транспортной безопасности соседних объектов транспортной инфраструктуры (транспортных средств);

4) выделение отдельных помещений или участков помещений на объектах для проведения контроля за входом и выходом физических лиц, въездом и выездом транспортных средств, вносом и выносом, ввозом и вывозом грузов и иных материальных объектов на объект в целях предотвращения возможности размещения или попытки размещения взрывных устройств (взрывчатых веществ), проноса и провоза оружия и боеприпасов;

5) обеспечение видеонаблюдения и видеозаписи с целью документирования проведения мероприятий по контролю на контрольно-пропускных пунктах и постах;

6) установление границ зоны безопасности объекта, на которых будет осуществляться контроль за входом и выходом физических лиц, въездом и выездом транспортных средств, вносом и выносом, ввозом и вывозом грузов и иных материальных объектов на объект и с него;

7) разработка плана размещения и перечня технических систем и средств для контрольно-пропускных пунктов на границах зоны безопасности объекта;

8) организация пропускного режима на объекте, установление видов пропусков для прохода, проезда людей или перемещения любых грузов на объект, обеспечение ведения учета прохода (проезда, перемещения) людей, транспортных средств, грузов на территорию объекта или с его территории;

9) обеспечение требуемого состава сертифицированных технических систем и средств контроля за входом и выходом людей, въездом и выездом транспортных средств, вносом и выносом, ввозом и вывозом грузов на объект или с него;

10) противодействие проникновению людей и транспортных средств на территорию безопасности объекта вне контрольно-пропускных пунктов или постов;

11) противодействие преодолению людьми и транспортными средствами контрольно-пропускных пунктов и постов без выполнения условий допуска на территорию безопасности объекта, в том числе без постоянных и разовых пропусков и иных установленных разрешений;

12) обеспечение защиты технических средств обеспечения безопасности объекта от несанкционированного доступа к узлам управления, обработки и хранения данных, а также поддержание средств связи в постоянной готовности к использованию;

13) обнаружение на контрольно-пропускных пунктах и постах на границах территории безопасности объекта предметы и вещества, которые запрещены для перемещения, недопущение их перевозки, а также перемещения на территорию безопасности объекта;

14) немедленное информирование уполномоченных представителей подразделений органов внутренних дел и Федеральной службы безопасности Российской Федерации об обнаруженном оружии, боеприпасах, патронах к оружию, взрывчатых веществах и взрывных

устройствах, ядовитых или радиоактивных веществах для принятия ими мер реагирования;

15) немедленное информирование уполномоченных представителей подразделений органов внутренних дел и Федеральной службы безопасности Российской Федерации обо всех физических лицах или материальных объектах в случае выявления связи этих лиц и объектов с совершением или подготовкой к совершению АНВ;

16) передача уполномоченным представителям подразделений органов внутренних дел и (или) органов Федеральной службы безопасности Российской Федерации нарушителей, обнаруженного оружия, боеприпасов, взрывчатых веществ и взрывных устройств, ядовитых или радиоактивных веществ.

Для реализации указанных мер на железнодорожных предприятиях, не являющихся объектами транспортной инфраструктуры, как и на ОТИ, в соответствии с постановлением Правительства РФ от 26.09.2016 № 969 [10] должны применяться технические системы и средства сигнализации, контроля доступа, досмотра, видеонаблюдения, видеозаписи, аудио-записи, связи, приема и передачи информации, оповещения, сбора и обработки информации.

Следует учитывать, что полнота и своевременность реализации указанных мер подлежит проверке федеральной службой по надзору в сфере транспорта в соответствии с приказом данной службы от 13.09.2017 № ВБ-880фс [11].

Таким образом, по результатам системно-правового и формально-догматического анализа действующего российского законодательства о безопасности, а также транспортного и земельного законодательства выявлены особенности организации работ по транспортной безопасности на железнодорожных и других транспортных предприятиях, не являющихся объектами транспортной инфраструктуры и расположенных на земельных участках, прилегающих к объектам транспортной инфраструктуры и отнесенных в соответствии с Земельным законодательством Российской Федерации к охраняемым зонам земель транспорта. Сформулированы конкретные меры по обеспечению требований закона «О транспортной безопасности», выработке единых методологических подходов к упорядочиванию системы непрерывной и эффективной деятельности по обеспечению транспортной безопасности.

### *Список литературы*

1. Комплексная безопасность на железнодорожном транспорте и метрополитене : монография : в 2 ч. / Б. В. Бочаров [и др.]; под ред. В. М. Пономарева и В. И. Жукова. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 287 с. – Ч. 1. – Текст : непосредственный.

2. О транспортной безопасности : Федеральный закон от 09 февраля 2007 г. № 16-ФЗ // Собрание законодательства. – 2007. – № 7 (12 февраля). – Ст. 837. – Текст : непосредственный.

3. Об определении участков автомобильных дорог, железнодорожных и внутренних водных путей, вертодромов, посадочных площадок, а также иных обеспечивающих функционирование транспортного комплекса зданий, сооружений, устройств и оборудования, являющихся объектами транспортной инфраструктуры : Постановление Правительства РФ от 18 июля 2016 г. № 686 – Текст : непосредственный // Собрание законодательства. – 2016. – № 30 (25 июля). – Ст. 4924.

4. Земельный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 25 октября 2001 г. № 136-ФЗ – Текст : непосредственный // Собрание законодательства. – 2001. – № 44 (29 октября). – Ст. 4147.

5. Об утверждении требований по соблюдению транспортной безопасности для физических лиц, следующих либо находящихся на объектах транспортной инфраструктуры или транспортных средствах, по видам транспорта: Постановление Правительства РФ от 15 ноября 2014 г. № 1208 – Текст : непосредственный // Собрание законодательства. – 2014. – № 47 (24 ноября). – Ст. 6565.

6. Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе

требований к антитеррористической защищенности объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств железнодорожного транспорта : Постановление Правительства РФ от 26 апреля 2017 г. № 495 – Текст : непосредственный // Собрание законодательства. – 2017. – № 19 (8 мая). – Ст. 2835.

7. Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности объектов транспортной инфраструктуры по видам транспорта на этапе их проектирования и строительства и требований по обеспечению транспортной безопасности объектов (строений, зданий, сооружений), не являющихся объектами транспортной инфраструктуры и расположенных на земельных участках, прилегающих к объектам транспортной инфраструктуры и отнесенных в соответствии с земельным законодательством Российской Федерации к охраняемым зонам земель транспорта и о внесении изменений в Положение о составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию : Постановление Правительства РФ от 23 января 2016 г. № 29 – Текст : непосредственный // Собрание законодательства. – 2016. – № 5 (1 февраля). – Ст. 698.

8. Жилищный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. № 188-ФЗ. – Текст : непосредственный // Собрание законодательства. – 2005. – № 1 (3 января). – Ст. 14.

9. О персональных данных : Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 152-ФЗ. – Текст : непосредственный // Собрание законодательства. – 2006. – № 31 (31 июля). – Ст. 3451.

10. Об утверждении требований к функциональным свойствам технических средств обеспечения транспортной безопасности и Правил обязательной сертификации технических средств обеспечения транспортной безопасности : Постановление Правительства РФ от 26 сентября 2016 г. № 969. – Текст: непосредственный // Собрание законодательства. – 2016. – № 40 (3 октября). – Ст. 5749.

11. Об утверждении форм проверочных листов (списка контрольных вопросов), применяемых при осуществлении федерального государственного транспортного надзора в сфере железнодорожного транспорта : Приказ Федеральной службы по надзору в сфере транспорта от 13 сентября 2017 г. № ВБ-880фс. – Москва : Ространснадзор, 2018. – Текст : непосредственный.

#### References

1. Bocharov B. V. [and others]. *Kompleksnaia bezopasnost' na zheleznodorozhnom transporte i metropolitane: monografiia, v 2 chastiakh; pod redaktsiei V. M. Ponomareva i V. I. Zhukova* (Integrated safety in railway transport and metro: a monograph, in 2 parts; edited by V. M. Ponomarev and V. I. Zhukov). Moscow: Federal state budget institution «Training center on education on railway transport», 2015, part 1, 287 p.

2. *O transportnoi bezopasnosti: Federal'nyi zakon ot 09 fevralia 2007 g. № 16-FZ* (On transport security: Federal law No. 16-FZ of February 09, 2007). Meeting of the legislation, 2007, no. 7 (February 12), art. 837.

3. *Ob opredelenii uchastkov avtomobil'nykh dorog, zheleznodorozhnykh i vnutrennikh vodnykh putei, vertodromov, posadochnykh ploshchadok, a takzhe inykh obespechivaiushchikh funktsionirovanie transportnogo kompleksa zdanii, sooruzhenii, ustroistv i oborudovaniia, iavliaiushchikhsia ob'ektami transportnoi infrastruktury : Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 18 iiulia 2016 g. № 686* (On the definition section of the road, rail and inland waterways, heliports, landing sites, as well as other ensure the functioning of the transport complex of buildings, structures, devices and equipment, which are the transport infrastructure: RF Government Resolution of July 18, 2016 № 686). Meeting of the legislation, 2016, no. 30 (July 25), art. 4924.

4. *Zemel'nyi kodeks Rossiiskoi Federatsii: Federal'nyi zakon ot 25 oktiabria 2001 g. № 136-FZ* (Land Code of the Russian Federation: Federal Law of October 25. 2001 № 136-FZ). Meeting of the legislation, 2001, no. 44 (October 29), art. 4147.

5. *Ob utverzhdenii trebovanii po sobliudeniiu transportnoi bezopasnosti dlia fizicheskikh lits, sleduiushchikh libo nakhodiashchikhsia na ob"ektakh transportnoi infrastruktury ili transportnykh sredstvakh, po vidam transporta: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 15 noiabria 2014 g. № 1208* (On approval of requirements to comply with the Transportation Security for individuals, should either be located at the transport infrastructure or vehicles, by mode of transport: RF Government Resolution of Nov. 15. 2014 № 1208). Meeting of the legislation, 2014, no. 47 (November 24), art. 6565.

6. *Ob utverzhdenii trebovanii po obespecheniiu transportnoi bezopasnosti, v tom chisle trebovanii k antiterroristicheskoi zashchishchennosti ob"ektov (territorii), uchityvaiushchikh urovni bezopasnosti dlia razlichnykh kategorii ob"ektov transportnoi infrastruktury i transportnykh sredstv zheleznodorozhnogo transporta: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 26 apreliia 2017 g. № 495* (On approval of requirements for transport security, including the requirements for anti-terrorism security of objects (territories), taking into account the levels of security for different categories of transport infrastructure and vehicles of railway transport: RF Government Resolution of April 26. 2017 № 495). Meeting of the legislation, 2017, no. 19 (May 8), art. 2835.

7. *Ob utverzhdenii trebovanii po obespecheniiu transportnoi bezopasnosti ob"ektov transportnoi infrastruktury po vidam transporta na etape ikh proektirovaniia i stroitel'stva i trebovanii po obespecheniiu transportnoi bezopasnosti ob"ektov (stroenii, zdanii, sooruzhenii), ne iavliaiushchikhsia ob"ektami transportnoi infrastruktury i raspolozhennykh na zemel'nykh uchastkakh, privilegaiushchikh k ob"ektam transportnoi infrastruktury i otnesennykh v sootvetstvii s zemel'nym zakonodatel'stvom Rossiiskoi Federatsii k okhrannym zonam zemel' transporta i o vnesenii izmenenii v Polozhenie o sostave razdelov proektnoi dokumentatsii i trebovaniakh k ikh soderzhaniuu: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 23 ianvaria 2016 g. № 29* (On approval of requirements to ensure transport safety transport infrastructure by mode of transport facilities at the design stage and construction and requirements for transport security facilities (structures, buildings, structures), non-transport infrastructure and located on land adjacent to transport infrastructure and classified in accordance with the land legislation of the Russian Federation to the guarding zones of transport lands and on amendments to the Regulations on the composition of design documentation and requirements to their content: RF Government Decree of 23 January. 2016 № 29). Meeting of the legislation, 2016, no. 5 (February 1), art. 698.

8. *Zhilishchnyi kodeks Rossiiskoi Federatsii: Federal'nyi zakon ot 29 dekabria 2004 g. № 188-FZ* (Housing Code of Russia: Federal Law of December 29, 2004 № 188-FZ). Meeting of the legislation, 2005, no. 1 (January 3), art. 14.

9. *O personal'nykh dannykh: Federal'nyi zakon ot 27 iulia 2006 g. № 152-FZ* (On personal data: Federal Law of July 27, 2006 № 152-FZ). Meeting of the legislation, 2006, no. 31 (July 31), art. 3451.

10. *Ob utverzhdenii trebovanii k funktsional'nym svoistvam tekhnicheskikh sredstv obespecheniia transportnoi bezopasnosti i Pravil obiazatel'noi sertifikatsii tekhnicheskikh sredstv obespecheniia transportnoi bezopasnosti: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 26 sentiabria 2016 g. № 969* (On approval of requirements to the functional properties of means of transport security and the Rules of compulsory certification of means of transport security: RF Government Decree of September 26. 2016 № 969). Meeting of the legislation, 2016, no. 40 (October, 3), art. 5749.

11. *Ob utverzhdenii form proverochnykh listov (spiska kontrol'nykh voprosov), primeniaemykh pri osushchestvlenii federal'nogo gosudarstvennogo transportnogo nadzora v sfere zheleznodorozhnogo transporta: Prikaz Federal'noi sluzhby po nadzoru v sfere transporta ot 13 sentiabria 2017 g. № VB-880fs* (About the statement of forms of test sheets (list of test questions), applicable to the implementation of the Federal transport oversight in the field of railway transport: order from the Federal service for transport supervision from 13 St. 2017 № WB-880/FS/FT). Moscow, Rostransnadzor, 2018.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Блинов Павел Николаевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, директор Института наземных транспортных систем, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-04-09.

E-mail: blinovpn@omgups.ru

### **Томилов Валерий Викторович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Blinov Pavel Nikolayevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor, Director of the Institute of terrestrial transport systems, OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-04-09.

E-mail: blinovpn@omgups.ru

### **Tomilov Valery Victorovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Railway transport electrosupplying», OSTU.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Блинов, П. Н. Системный анализ организационно-технических мероприятий по транспортной безопасности на железнодорожных предприятиях / П. Н. Блинов, В. В. Томилов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 71 – 78.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Blinov P. N., Tomilov V. V. System analysis of organizational and technical measures for transport security at railway enterprises. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 2 (42), pp. 71 – 78 (In Russian).

УДК 621.181.123

### **Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов**

Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация,

## **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ВАКУУМНОМ КОТЛЕ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ НАРУЖНОГО ОРЕБРЕНИЯ ЖАРОВОЙ ТРУБЫ**

**Аннотация.** В рамках реализации приоритетных задач одобренной Правительством Российской Федерации Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года показаны перспективы использования высокоэффективных котлов в качестве автономного источника для получения тепловой энергии для систем теплоснабжения. Рассмотрены особенности работы и конструкции вакуумного котла, его преимущества и недостатки. Обоснованы необходимость и метод интенсификации процессов теплообмена в вакуумном котле для повышения его эффективности и снижения расхода топлива. Представлены основные положения математической модели для теплового расчета вакуумного котла с использованием  $k$ - $\epsilon$ -модели ANSYS CFX для описания турбулентных течений смеси реагирующих газов с учетом переноса теплоты излучением и конвекцией и модели RPI ANSYS CFX, описывающей процессы кипения жидкости. Представлены результаты расчетных исследований с использованием модели RPI ANSYS CFX при кипении на гладкой и оребренной цилиндрической поверхностях. Показаны результаты расчетных исследований влияния давления в разреженном объеме на теплофизические характеристики и рабочие параметры котла, такие как температура стенки со стороны воды, тепловые потери с уходящими газами при применении теплообменной поверхности различной конструкции. Показано влияние коэффициента оребрения на уменьшение расхода топлива при изменении давления. Предложены апробированные технические решения для формирования конструкции эффективных вакуумных котлоагрегатов с улучшенными массогабаритными параметрами. Обосновано использование конструкции эффективного вакуумного котла с поперечными ребрами на внешней теплообменной поверхности жаровой трубы с рациональными геометрическими характеристиками, представлен рациональный коэффициент оребрения  $\Psi = 1,89$ .

**Ключевые слова:** оребрение, интенсификация, вакуумный котел, кипение, коэффициент полезного действия, коэффициент теплоотдачи.

Ekaterina N. Slobodina, Andrey G. Mikhailov

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

## INTENSIFICATION OF HEAT EXCHANGE IN THE VACUUM BOILER DUE TO THE APPLICATION OF EXTERNAL FINISHING OF THE HEAT PIPE

**Abstract.** Described the prospects for the use of highly efficient boilers as an autonomous source for generating heat for the priority tasks implementation of the strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 approved by the Government of the Russian Federation. The features of operation and design of a vacuum boiler, advantages and disadvantages are considered. The necessity and method of heat exchange processes intensification in a vacuum boiler to increase its efficiency and reduce fuel consumption are substantiated. The main provisions of the mathematical model for thermal calculation of a vacuum boiler using the  $k$ - $\varepsilon$  model ANSYS CFX to describe turbulent flows of a reacting gases mixture, taking into account heattransfer by radiation and convection, and the RPI ANSYS CFX model, describing the liquid boiling processes. The results of computational studies using the RPI ANSYS CFX model for boiling on smooth and finned cylindrical surfaces are presented. The computational studies results of the pressure effect in a rarefied volume on thermophysical characteristics and operating parameters of the boiler, such as wall temperature from the water side, heat losses with exhaust gases on a smooth and ribbed surface are shown. The influence of the ribbing coefficient on fuel economy is shown at various pressures. Reasonable recommendations for creating a design of energy-efficient vacuum boilers with improved weight and size characteristics are presented. The application of the design for an energy-efficient of vacuum boiler with transverse ribbing on the outer flame tube surface with rational geometric characteristics is substantiated; a rational coefficient of ribbing  $\Psi = 1,89$  is presented.

**Keywords:** finning, intensification, vacuum boiler, boiling, efficiency, heat transfer.

Энергоэффективность и энергосбережение – одни из важнейших приоритетов технологического развития России. В 2007 г. разработана и одобрена Правительством Российской Федерации Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, в которой обозначено, что энергетические аспекты российской экономики могут играть существенную роль при реализации стратегической программы развития железнодорожного транспорта России на отдаленную перспективу.

Одни из приоритетных задач заключаются в следующем: значительное снижение удельного расхода топливно-энергетических ресурсов во всех сферах деятельности ОАО «РЖД»; оптимизация энергетических затрат в стационарной энергетике [1].

Для рационализации выработки и использования энергоресурсов необходимо разрабатывать и внедрять новейшие технологии и высокоэффективное оборудование. Используемое оборудование должно покрывать все требования абонентов и должно отвечать всем современным технологическим тенденциям, не нанося при этом экологического вреда окружающей среде.

Системы теплоснабжения необходимы для обеспечения потребителей необходимым количеством теплоты с учетом всех требований нормативных документов. Системы теплоснабжения подразделяются на автономные и централизованные. В настоящей статье особое внимание будет уделено источникам тепла для автономных систем теплоснабжения. Последние обладают следующими преимуществами: отсутствие многокилометровых тепловых сетей, близость источника теплоты (например, вакуумный котел) и потребителя.

Высокоэффективный котел – это агрегат, предназначенный для выработки нагретого теплоносителя высокого качества, работающий без отложений со стороны жидкого теплоносителя, с наименьшими рисками возникновения коррозии на поверхностях нагрева [2].

К современным конструкциям водогрейных котлов можно отнести вакуумные котлы. Они характеризуются длительным сроком службы, отсутствуют риски отложений, коррозии на поверхностях нагрева, риски попадания вредных примесей, так как пароводяная смесь вакуумного котла не контактирует с теплоносителем для нужд систем теплоснабжения.

Вакуумные котлы с кипением водяного теплоносителя применяются во многих сферах промышленного производства в качестве нагревателя жидкостей и газов для технологичес-

ких нужд. Подобные котлоагрегаты успешно функционируют в качестве источников теплоты в системах автономного теплоснабжения. В агрегате парообразование происходит в разреженном объеме, что является предпосылкой для организации энергоэффективных термодинамических циклов.

Вакуумный котел (рисунок 1) является герметичным и теплоизолированным резервуаром 3, который заполняется определенным объемом очищенной котловой воды. Котловая вода в процессе эксплуатации не выводится из агрегата. Топочный объем котла 1 является жаровой трубой, омываемой водой, на внешней поверхности которой происходит кипение жидкости. В теплоносителе преобладает естественная конвекция. Топливо – природный газ. В объеме 3 создается разрежение вакуумным насосом. Кипение водяного теплоносителя осуществляется при температуре менее 100 °С. При этом образуется пар, который в дальнейшем конденсируется на внешней поверхности сетевого теплообменника 4. Последний выполняется из нержавеющей стали. Малая концентрация кислорода исключает коррозию поверхностей теплообмена [3, 4].

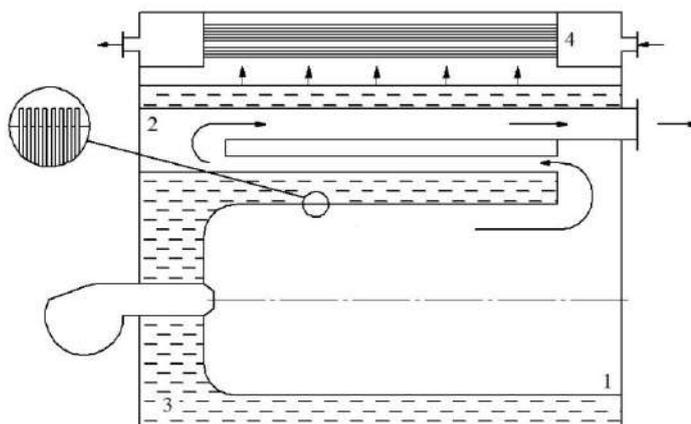


Рисунок 1 – Вакуумный котел с развитыми поверхностями теплообмена: 1 – жаровая труба; 2 – конвективный пучок; 3 – объем с разрежением; 4 – сетевой теплообменник

Применение подобного источника теплоты, в котором процессы парообразования и конденсации осуществляются в разреженной среде, создает предпосылки для экономичной работы теплогенератора для технологических потребителей в промышленности.

При снижении давления в рабочей зоне котла ниже атмосферного происходит уменьшение коэффициентов теплоотдачи, что приводит к понижению эффективности работы котла. Это связано с тем, что происходит снижение эффективности протекания таких процессов, как кипение и парообразование в условиях разрежения. Для интенсификации данных процессов необходимо использовать наиболее рациональный способ – наружное оребрение жаровой трубы вакуумного котла капиллярными щелевыми каналами. Рациональный выбор основных геометрических характеристик ребра, таких как щелевой зазор между ребрами, высота и толщина ребра, позволит без значительного роста площади поверхности теплообмена со стороны кипящего теплоносителя достигнуть значительного увеличения коэффициента теплоотдачи от поверхности ребра [5, 6].

В расчете используется вакуумный котел мощностью 400 кВт. Жаровая труба выполнена в форме цилиндра, расположенного горизонтально. Основные геометрические характеристики: длина – 1,13 м, диаметр – 0,63 м. Общая площадь конвективного пучка – 9,36 м<sup>2</sup>.

В качестве основного вида топлива применяется природный газ с расходом 0,0120 м<sup>3</sup>/с. Диапазон рабочего давления изменялся от 60,80 до 607,95 кПа.

Для расчета теплообмена в котле используются *k-ε*-модели ANSYS CFX с двумя уравнениями для турбулентных течений смеси газов в жаровой трубе 1 и конвективном пучке 2, где *k* – турбулентная кинетическая энергия, *ε* – величина рассеивания кинетической энергии [3, 7 – 12].

Для описания процессов тепломассопереноса при кипении при давлении ниже атмосферного в объеме 3 используется модель RPI ANSYS CFX, которая включает в себя следующие уравнения.

1. Уравнения неразрывности для жидкой и газовой фаз:

$$\frac{\partial a_k}{\partial t} + \nabla \cdot (a_k \vec{U}_k) = \frac{\Gamma_{ki} - \Gamma_{ik}}{\rho_k}, \quad (1)$$

где  $k$  – агрегатное состояние вещества;  $l$  – жидкость,  $g$  – газ;  $i$  – направление фазового перехода;  $a$ ,  $\rho$  и  $U$  – массовая доля, плотность и скорость вещества;  $\Gamma_{gl}$  – скорость испарения единицы объема в связи с процессом парообразования на стенке;  $\Gamma_{lg}$  – скорость конденсации единицы объема.

2. Уравнение для концентраций на границе раздела фаз:

$$a_l = 1 - a_g. \quad (2)$$

3. Уравнения сохранения импульса для жидкой и газовой фаз:

$$\frac{\partial a_k \vec{U}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (a_k \vec{U}_k \vec{U}_k) = -\nabla \cdot (a_k (\bar{R}_k + \bar{R}_k^t)) - \frac{a_k}{\rho_k} \nabla p + a_k \vec{g} + \frac{\vec{M}_k}{\rho_k} + \frac{\Gamma_{ki} \vec{U}_i - \Gamma_{ik} \vec{U}_k}{\rho_k}, \quad (3)$$

где  $\bar{R}_k, \bar{R}_k^t$  – тензоры напряжений, зависящие от свойств и скорости жидкости;  $\vec{M}_k$  – сумма сил, действующих на границе раздела фаз.

4. Уравнение сохранения энергии для жидкой фазы:

$$\frac{\partial((1-a)h_l)}{\partial t} + \nabla \cdot ((1-a)h_l \vec{U}_l) = -\frac{1}{\rho_l} \nabla[(1-a)(q_l + q_l^t)] + \frac{(1-a)}{\rho_l} \frac{Dp}{Dt} + \frac{\Gamma_{lg} h_{g,sat} - \Gamma_{gl} h_l}{\rho_l} + \frac{q_w'' A_w'''}{\rho_l}, \quad (4)$$

где  $q_l, q_l^t$  – молекулярные и турбулентные потоки тепла для жидкости;  $\frac{D}{Dt}$  – полная производная. Третье слагаемое характеризует фазовый переход, а последнее представляет собой плотность теплового потока от стенки –  $q_w''$ ,  $A_w'''$  – площадь поверхности теплообмена, отнесенная к единице объема [7].

5. Уравнения для определения эффективной вязкости для жидкой фазы, рассчитывается как сумма молекулярной и турбулентной вязкости  $\nu_l^t$ . Поскольку процесс кипения при давлении ниже атмосферного в вакуумном котле неразрывно связан с процессом парообразования, то с учетом влияния процесса парообразования на турбулентные явления итоговое уравнение турбулентной вязкости жидкой фазы будет иметь вид:

$$\nu_l^t = C_\mu \frac{k_l^2}{\epsilon_l} + \frac{1}{2} C_{\mu b} D_s \alpha \|\vec{U}_g - \vec{U}_l\|, \quad (5)$$

где  $C_{\mu b}, C_\mu$  – справочные константы;  $D_s$  – диаметр парового пузырька.

Аналогичным образом учитывается эффективная вязкость и для парового объема [3, 7].

Замыкание системы уравнений происходит заданием значений коэффициента теплоотдачи при конденсации на поверхности сетевого теплообменника.

Для определения эффективности работы котла необходимо использовать следующую методику теплового расчета:

- 1) формирование геометрических и конструктивных параметров жаровой трубы, конвективного пучка, объема с разрежением вакуумного котла;
- 2) моделирование виртуальной 3D-модели вакуумного котла с использованием специализированного программного комплекса;
- 3) задание и расчет начальных, граничных условий, в качестве начальных условий используются теплофизические свойства теплоносителя, температура и давление;
- 4) формирование и решение основных уравнений процессов течения реагирующих газов в топке и в конвективном пучке труб;
- 5) формирование начальных и граничных условий с последующим расчетом основных уравнений, моделирующих теплообменные процессы, протекающие при давлении ниже атмосферного – кипение на жаровой трубе и конденсация на сетевом теплообменнике;

В случае применения поверхности, выполненной в виде капиллярных щелевых каналов, для интенсификации процесса кипения и парообразования используется выражение для

определения приведенного коэффициента теплоотдачи при кипении жидкости на оребренной цилиндрической поверхности:

$$\alpha_{np} = \frac{3}{2} \left( \frac{\lambda_{ж}}{k\nu_{ж}} \left( \frac{x\sigma q_p H}{\rho_{ж}\rho_n b^2 r} \right)^{1/3} \right) E \frac{H}{b+\delta}, \quad (6)$$

где  $\lambda_{ж}$  – теплопроводность жидкой фазы;  $\nu_{ж}$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости;  $q_p$  – средняя по высоте ребра плотность теплового потока;  $k$  – постоянный коэффициент;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения кипящей жидкости;  $\rho_{ж}$ ,  $\rho_n$  – плотность жидкости и пара, соответственно;  $b$  – величина щелевого зазора между ребрами;  $E$  – эффективность ребра;  $H$  – высота ребра;  $\delta$  – толщина ребра.

В уравнение введен поправочный коэффициент  $x$ , учитывающий неравномерность распределения теплового потока на оребренной поверхности в области давлений ниже атмосферного.

Особенностью теплообмена на оребренной поверхности нагрева является неравномерное распределение теплового потока по периметру. Это приводит к снижению максимального теплового потока в области давлений ниже атмосферного;

б) определение параметров тепловой эффективности вакуумного жаротрубного котла. Расчет коэффициента полезного действия котла по обратному балансу.

Результаты расчетных исследований, выполненных в программном комплексе ANSYS CFX с применением модели RPI для расчета пузырькового кипения в разреженном объеме вакуумного котла показаны на рисунке 2. Расчетные исследования проведены на гладкой и цилиндрической неоребренных поверхностях. На рисунке 2 представлены результаты при рабочем давлении 60,80 кПа. Результаты показали наличие неравномерного распределения температур по поверхности, максимальные значения температур зафиксированы в пристеночной области.

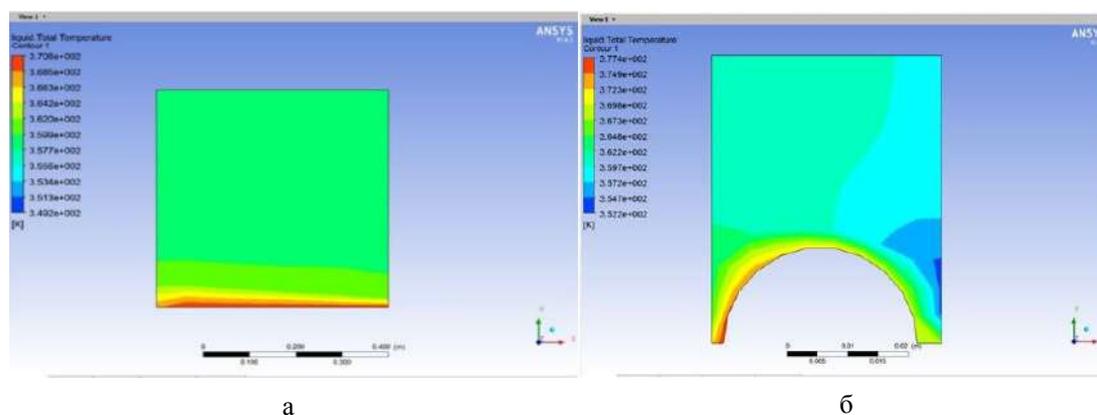


Рисунок 2 – Результаты расчетных исследований в программном комплексе ANSYS CFX с применением модели RPI при кипении на гладкой поверхности: а – плоская поверхность; б – цилиндрическая поверхность

Далее проводились расчетные исследования на цилиндрической поверхности с применением поперечного оребрения (рабочее давление – 60,80 кПа), результаты которых представлены на рисунке 3. Оребрение выполнено из сплава алюминия, нанесенного на наружную поверхность стальной жаровой трубы.

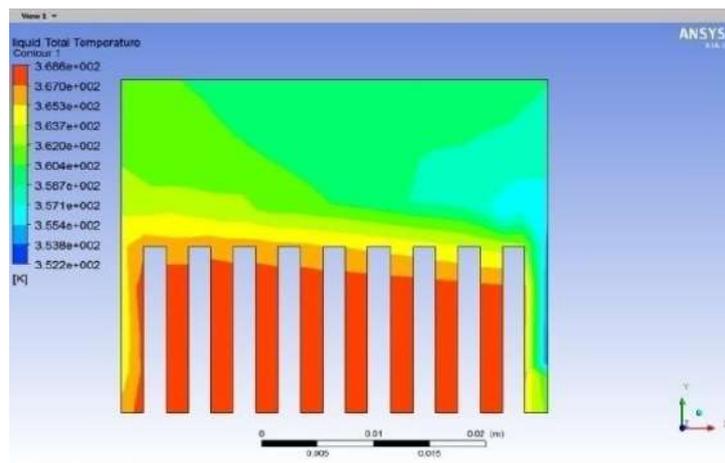


Рисунок 3 – Расчетные исследования в программном комплексе ANSYS CFX с применением модели RPI при кипении на оребренной цилиндрической поверхности с использованием поперечного оребрения

Расчетные исследования осуществлены при различных геометрических параметрах ребра. На рисунке 3 показан один из результатов моделирования. Область высоких температур зафиксирована в межреберном пространстве и носит неравномерный характер.

Температурные флуктуации непосредственно связаны с конвективными явлениями в теплоносителе. На внешней поверхности жаровой трубы образуются пузырьки пара. Размер паровых пузырьков после отрыва от теплообменной поверхности различный по всей области кипения. Если в определенной зоне кипения имеется недогрев жидкости, то в объеме жидкости, окружающей пузырек, имеет место конденсация пара. В случае наличия перегрева окружающей жидкости наблюдается процесс роста пузырька с испарением. При проведении расчетных исследований данные явления учитываются за счет учета изменения концентрации пара в объеме. В данном исследовании использовалось поперечное оребрение.

Для снижения рисков возникновения низкотемпературной коррозии необходимо поддерживать температуру уходящих газов не ниже 110 °С.

Уменьшение температуры уходящих газов с уменьшением давления, в том числе и с использованием оребрения, приводит к снижению тепловых потерь ( $q_2$ ) на 2,64 % (рисунок 4).

Снижение температуры уходящих газов (тепловых потерь) повышает эффективность работы (КПД) вакуумного котла.

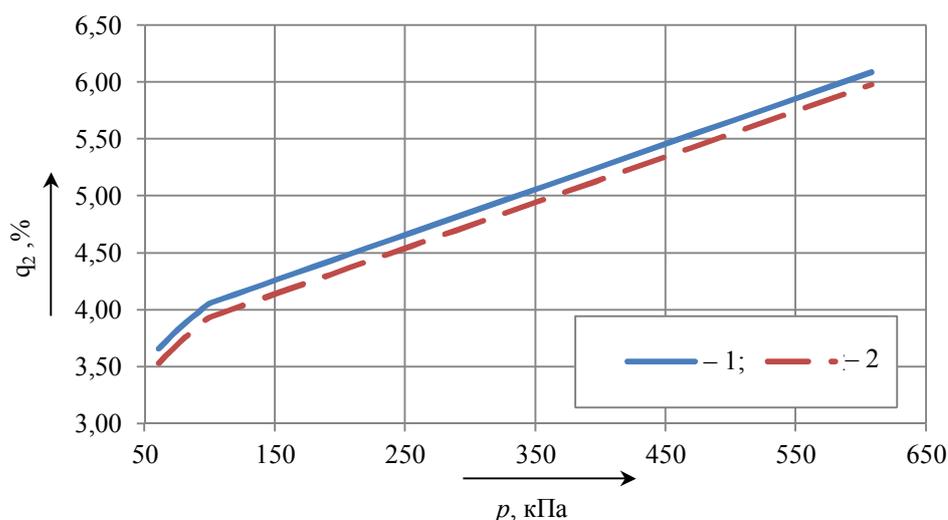


Рисунок 4 – Зависимость тепловых потерь в различном диапазоне рабочего давления (1 – гладкая поверхность; 2 – оребренная поверхность)

В связи со снижением давления ниже атмосферного средняя температура стенки со стороны воды уменьшается (рисунок 5). Изменение данного параметра приводит к снижению температуры газов на выходе из жаровой трубы и средней температуры в жаровой трубе.

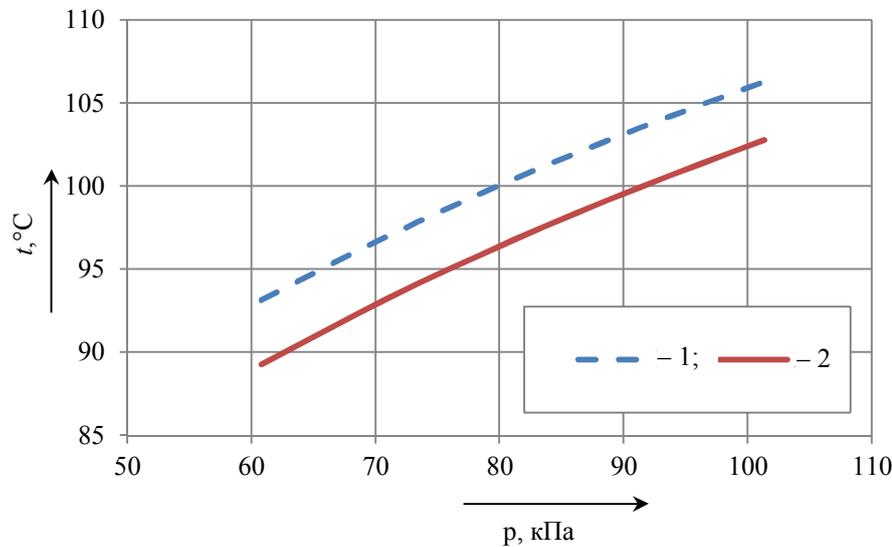


Рисунок 5 – Изменение значений температуры стенки в диапазоне давлений при применении оребрения (1 – гладкая поверхность; 2 – оребренная поверхность)

На экономию топлива влияют температурный напор, площадь поверхности теплообмена, коэффициент теплоотдачи со стороны кипящей жидкости. Результаты расчетного исследования представлены на рисунке 6, где отображено изменение расхода топлива в зависимости от геометрических характеристик оребрения при различных рабочих давлениях. Расход топлива определен с использованием уравнения прямого теплового баланса.

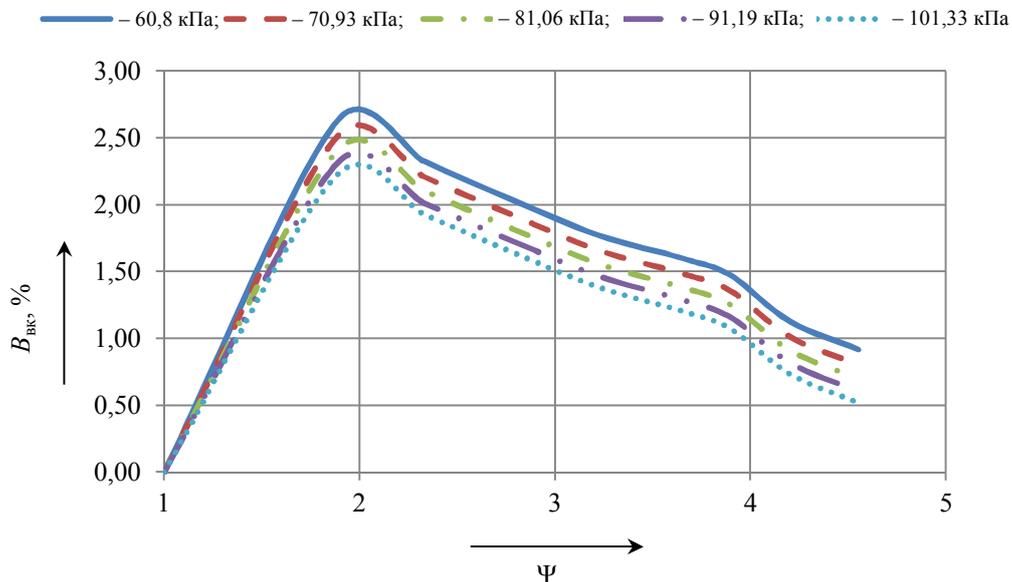


Рисунок 6 – Влияние коэффициента оребрения при различных давлениях и коэффициентах оребрения на экономию топлива

Наибольшая экономия топлива 2,64 % наблюдается при коэффициенте оребрения 1,89 и рабочем давлении 60,80 кПа. Площадь сетевых теплообменников, на которых происходит конденсация, неизменна. Это объясняется интенсивным протеканием процесса парообразования с образованием достаточно большого количества пара, который движется вверх к сетевому теплообменнику. Чем больше коэффициент оребрения, тем интенсивнее движение. По ходу движения поток пара встречается со встречным движением конденсата.

Оптимальное количество пара, полностью сконденсировавшегося на поверхности сетевых теплообменников, соответствует коэффициенту оребрения 1,89.

В рамках проведенного исследования показано, что при снижении рабочего давления ниже атмосферного происходит уменьшение коэффициента теплоотдачи при кипении жидкости на наружной поверхности жаровой трубы, что в комплексе снижает эффективность работы вакуумного котла заданных параметров и производительности. В результате предложено интенсифицировать процесс теплообмена в вакуумном котле за счет применения поперечного оребрения на наружной поверхности жаровой трубы.

С использованием математической модели проведено исследование, направленное на выявление зависимости между геометрическими параметрами ребра (размера щелевого зазора между ребрами и высоты ребер) и интенсивностью процессов, происходящих в разреженном объеме вакуумного котла – кипения на оребренной наружной поверхности жаровой трубы.

Применение наружного оребрения с коэффициентом оребрения  $\Psi = 1,89$  на наружной теплообменной поверхности жаровой трубы и рабочем давлении 60,80 кПа позволяет достичь экономии топлива в пределах 2,64 % при неизменной теплопроизводительности вакуумного котла.

Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности создания высокоэффективного вакуумного котла с улучшенными массогабаритными характеристиками: длина жаровой трубы – 1,13 м; диаметр жаровой трубы – 0,630 м; высота ребра – 0,004 м; щелевой зазор между ребрами – 0,0015 м; толщина ребра – 0,0015 м; длина ребра равна половине длины окружности жаровой трубы при давлении 60,80 кПа.

## Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года : распоряжение № 877-р: принято Правительством РФ 17 июня 2008 г. – Москва, 2008. – Текст : непосредственный.
2. Annaratone D. Steam Generators. Description and Design. Heidelberg: Springer Berlin, 2008. 427 p. ISBN 978-3-540-77715-1; 978-3-540-77714-4.
3. Slobodina E. N., Mikhailov A. G., Razuvaev A. V. Vacuum boiler elements temperature processes interrelation, *AIP Conference Proceedings*, 2018, no. 2007, pp. 1 – 5.
4. Slobodina E. N., Mikhailov A. G. Boiling process modelling peculiarities analysis of the vacuum boiler, *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, no. 883, pp. 1 – 7.
5. Корнеев, С. Д. Влияние теплофизических свойств материала оребренной поверхности на выбор ее оптимальных геометрических характеристик / С. Д. Корнеев [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия МГИУ. – 2006. – № 1 (2). – С. 56 – 61.
6. D. Brian Spalding, J. Taborek, *Heat Exchanger Design Handbook*, HemispherePub. Corp, Washington, 1983, 2300 p.
7. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX Release 11.0, ANSYS, Inc., Southpointe 275 Technology Drive, Canonsburg : PA 15317, 2006, 312 p.
8. Пашков, Л. Т. Основы теории горения / Л. Т. Пашков. – Москва : Московский энергетический институт, 2002. – 136 с. – Текст : непосредственный.
9. Končar B., Krepper E., Egorov Y. CFD Modeling of subcooled flow boiling for nuclear engineering applications, *International Conference Nuclear Energy for New Europe*, 2005, pp. 140 – 154.
10. H. Rusche. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions, Ph.D thesis, Imperial College, London, 2002, 333 p.
11. Y. Sato et al. Momentum and heat transfer in two-phase bubbly flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 1981, no. 7, pp. 167 – 178.
12. Prandtl L. Bemerkungen zur Theorie der freien Turbulenz, *Z. angew. Math. und Mech*, 1942, vol. 22, no. 5, pp. 241 – 243.

## References

1. *Strategiia razvitiia zheleznodorozhnogo transporta v RF do 2030 goda : rasporyazhenie № 877-r: priniato Pravitel'stvom RF 17 iunija 2008 g* (Strategy for the development of railway

transport in the Russian Federation until 2030: Order No. 877-r: adopted by the Government of the Russian Federation on June 17, 2008). Moscow, 2008.

2. Annaratone D. Steam Generators. Description and Design. *Heidelberg: Springer Berlin*, 2008. 427 p. ISBN 978-3-540-77715-1; 978-3-540-77714-4.

3. Slobodina E. N., Mikhailov A. G., Razuvaev A. V. Vacuum boiler elements temperature processes interrelation, *AIP Conference Proceedings*, 2018, no. 2007, pp. 1 – 5.

4. Slobodina E. N., Mikhailov A. G. Boiling process modelling peculiarities analysis of the vacuum boiler, *Journal of Physics: Conference Series*, 201, no. 883, pp. 1 – 7.

5. Korneev S. D. Influence of thermophysical properties of the finned surface material on the choice of its optimal geometric characteristics [Vliianie teplofizicheskikh svoistv materiala orebrennoi poverkhnosti na vybor ee optimal'nykh geometricheskikh kharakteristik]. *Izvestiia MGIU – Proceedings of MPU*, 2006, no. 1 (2), pp. 56 – 61.

6. D. Brian Spalding, J. Taborek, *Heat Exchanger Design Handbook*, HemispherePub. Corp, Washington, 1983, 2300 p.

7. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX Release 11.0, ANSYS, Inc., *Southpointe 275 Technology Drive*, Canonsburg : PA 15317, 2006, 312 p.

8. Pashkov L. T. *Osnovy teorii goreniia* (The Foundations of the Combustion Theory). Moscow: MEI, 2002, 136 p.

9. Končar B., Krepper E., Egorov Y. CFD Modeling of subcooled flow boiling for nuclear engineering applications, *International Conference Nuclear Energy for New Europe*, 2005, pp. 140 – 154.

10. H. Rusche. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions, Ph.D thesis, Imperial College, London, 2002, 333 p.

11. Y. Sato et al. Momentum and heat transfer in two-phase bubbly flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 1981, no. 7, pp. 167 – 178.

12. Prandtl L. Bemerkungen zur Theorie der freien Turbulenz, *Z. angew. Math. und Mech*, 1942, vol. 22, no. 5, pp. 241 – 243.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Слободина Екатерина Николаевна

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГТУ.

Тел.: +7 (913) 647-39-71.

E-mail: slobodina\_e@mail.ru

### Михайлов Андрей Гаррьевич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГТУ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Слободина, Е. Н. Интенсификация теплообмена в вакуумном котле за счет применения наружного оребрения жаровой трубы / Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 78 – 86.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Slobodina Ekaterina Nikolaevna

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira Pr., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department « Heat power engineering», OmSTU.

Phone: +7 (913) 647-39-71.

E-mail: slobodina\_e@mail.ru

### Mikhailov Andrey Garrievich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira Pr., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department « Heat power engineering», OmSTU.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Slobodina E. N., Mikhailov A. G. Intensification of heat exchange in the vacuum boiler due to the application of external finishing of the heat pipe. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 78 – 86 (In Russian).

О. В. Архипова, Д. С. Осипов, А. О. Парамзин

Югорский государственный университет (ЮГУ), г. Ханты-Мансийск, Российская Федерация

## АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОТОКА МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье представлен критерий выбора оптимального типа вейвлет-функции для цифровой обработки значений токов и напряжений при анализе режима электрической сети. Увеличение доли электроприемников, искажающих показатели качества электроэнергии, ставит перед исследователями задачу применять более совершенные математические аппараты для анализа и моделирования таких систем электропитания. Дискретное (пакетное) вейвлет-преобразование позволяет производить гармонический анализ токов и напряжений при нестационарных несинусоидальных режимах. Одной из ключевых задач развития цифровых технологий в электроэнергетике является создание и развитие интеллектуальных электрических сетей с внедрением новых алгоритмов цифровой обработки данных и принятия решений. При этом должны быть разработаны алгоритмы сжатия и удаленного восстановления данных о потреблении и производстве электрической энергии в облачной среде. Вейвлет-преобразование позволяет устранять негативный эффект растекания спектра, характерный преобразованию Фурье, при анализе несинусоидальных нестационарных режимов. На основании равенства Парсеваля вейвлет-преобразование дает возможность определить энергию спектра отдельных частотных диапазонов, определяемых глубиной разложения и частотой дискретизации исследуемого сигнала. Расчет энергии спектра вейвлет-коэффициентов позволяет производить сжатие объема потока мгновенных значений напряжений и токов. В статье представлены результаты непрерывного и дискретного вейвлет-преобразования тока при коммутации батареи статических конденсаторов. Коэффициент сжатия информации превысил 5,3. Вейвлет-преобразование проведено с помощью восьми различных вейвлет-функций. Критерием выбора оптимального материнского вейвлета определено условие максимальной энергии спектра и минимальное среднеквадратическое отклонение при восстановлении исходного сигнала.

**Ключевые слова:** гармонический анализ, вейвлет-преобразование, цифровая обработка мгновенных значений, высшие гармоники.

Olga V. Arkhipova, Dmitriy S. Osipov, Alexander O. Paramzin

Yugra State University (YugraSU), Khanty-Mansiysk, the Russian Federation

## ANALYSIS OF THE MODES OF POWER SUPPLY SYSTEMS BASED ON THE DIGITAL PROCESSING OF THE INSTANT VOLTAGE AND CURRENT VALUES USING THE WAVELET TRANSFORM

**Abstract.** The article presents a criterion for choosing the optimal type of wavelet function for digital processing of current and voltage values in the analysis of the electric network mode. The increase in the share of electric receivers that distort the quality of electricity sets the task for researchers to use more advanced mathematical tools for analyzing and modeling such power supply systems. The discrete wavelet transform allows the harmonic analysis of currents and voltages under non-stationary non-sinusoidal modes. One of the key tasks in the development of digital technologies in the electric power industry is the creation and development of intelligent electric networks with the introduction of new algorithms for digital data processing and decision making. In this case, algorithms for compression and remote recovery of data on the consumption and production of electrical energy in the cloud should be developed. The wavelet transform eliminates the negative spreading effect characteristic of the Fourier transform in the analysis of non-sinusoidal non-stationary modes. Based on the Parseval equality, the wavelet transform makes it possible to determine the spectrum energy of individual frequency ranges determined by the depth of decomposition and the sampling frequency of the signal under study. The calculation of the energy of the spectrum of wavelet coefficients allows the compression of the flow volume of instantaneous values of voltages and currents. The article presents the results of continuous and discrete wavelet current conversion when switching a battery of static capacitors. Information compression ratio exceeded 5.3. The wavelet transform was performed using eight different wavelet functions. The criterion for choosing the optimal mother wavelet determines the condition of the maximum energy of the spectrum and the minimum standard deviation when restoring the original signal.

**Keywords:** harmonic analysis, wavelet transform, digital processing of instantaneous values, higher harmonics.

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р утверждена долгосрочная программа развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года [1]. Одной из задач программы развития определена необходимость перехода на «цифровую железную дорогу» [1, с. 4626]. Перечень создаваемых в рамках долгосрочной программы цифровых технологий и сервисов включает в себя «создание инструментов интеллектуального управления движением, цифрового моделирования и мониторинга транспортных средств и объектов инфраструктуры» [1, прил. 16, с. 4696]. Одним из важнейших объектов инфраструктуры являются системы электроснабжения, включающие в себя электроснабжение тяговых и нетяговых потребителей.

В рамках развития цифрового мониторинга электрических сетей применение математического аппарата вейвлет-преобразования позволяет решать задачи анализа показателей качества электроэнергии, цифровой фильтрации потока мгновенных значений параметров режима (токов, напряжения, мощностей), а также сжатия и восстановления информации при передаче данных по цифровым каналам связи.

Актуальность анализа несинусоидальных режимов систем электроснабжения железных дорог обусловлена внедрением в работу статических тиристорных компенсаторов (СТК). Так, на Западно-Сибирской железной дороге «за последние несколько лет на постах секционирования (ПС) введено в работу пять регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности» [2, с. 55]. В статье [2] авторы производят анализ двух схем СТК и определяют общие потери мощности в устройствах с учетом влияния высших гармоник. Математический аппарат вейвлет-преобразования в последнее время находит все более широкое применение для анализа параметров качества электроэнергии применительно к тяговым подстанциям [3]. Транспортные средства являются причиной возникновения провалов напряжения, перенапряжений и фликера, что «негативно влияет на неподвижные агрегаты тяговых подстанций» [3, с. 228]. В целом в современной электроэнергетике неуклонно растет доля электроприемников, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику (частотные преобразователи, выпрямители, инверторы, устройства на базе силовой электроники и т. д.), что является причиной искажения формы кривой напряжения и тока. Применение подобных устройств в системах электроснабжения, как правило, имеет технологическую необходимость или решает задачи повышения энергоэффективности электрической сети. Как показывают исследования [4], установка выпрямительно-инверторных преобразователей на тяговых подстанциях в границах полигона Московского центрального кольца позволит сократить «величину удельного расхода электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, на 9,7 %» [4, с. 65].

Вейвлет-преобразование использовано в качестве инструмента цифровой фильтрации параметров режима при моделировании систем электроснабжения железных дорог с установками распределенной генерации [5]. Накоплен определенный опыт применения алгоритмов вейвлет-преобразования для диагностирования и выявления дефектов роторных механизмов подвижного состава [6].

Традиционно для гармонического анализа режимов работы электрических сетей применяется преобразование Фурье. При анализе несинусоидальных нестационарных сигналов напряжения (тока) с помощью преобразования Фурье возникает эффект растекания спектра, который может быть минимизирован с помощью введения оконной функции (оконное преобразование Фурье). В действующей нормативно-технической документации [7] для устранения последствий растекания спектра предлагается осуществлять группировку гармоник и интергармоник в соответствии с выражением (1) по схеме, представленной на рисунке 1.

$$Y_{g,h}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(Nh)-N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{N/2-1} Y_{C,(Nh)+k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(Nh)+N/2}^2 \quad (1)$$

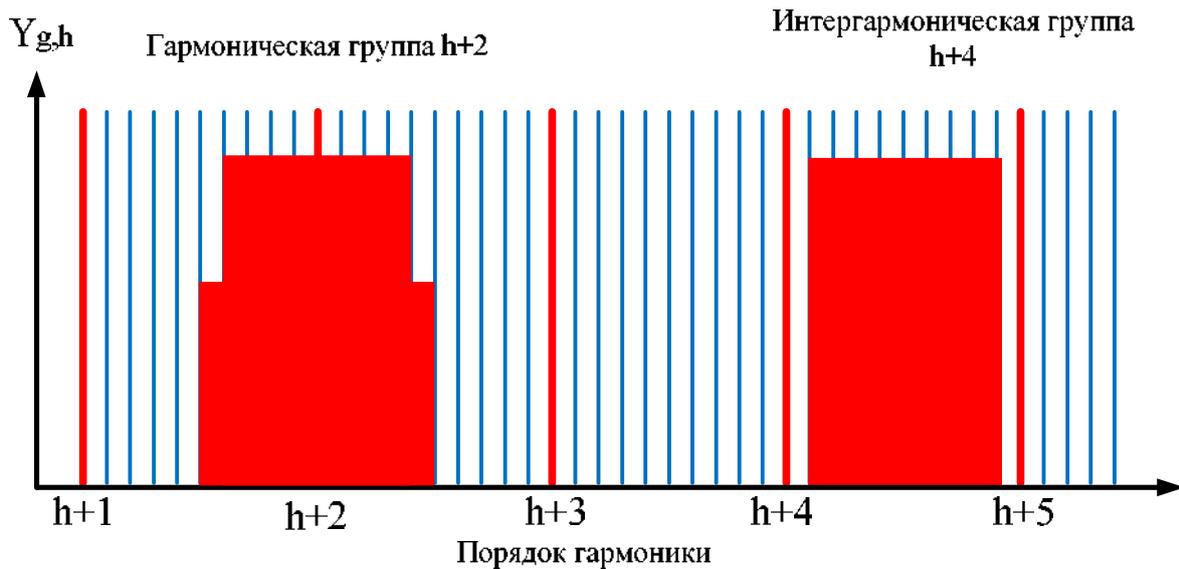


Рисунок 1 – Схема образования гармонических подгрупп и интергармонических групп для систем электроснабжения частотой 50 Гц (привод. по источнику [7, с. 15])

Если исследуемый сигнал напряжения (тока) задан некоторой матрицей мгновенных значений  $u(t) = [u_0 \ u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{n-1} \ u_n]$ , то по известным значениям коэффициентов вейвлет-фильтров нижних  $h_0, h_1$  и верхних частот  $g_0, g_1$  в матричном виде дискретное вейвлет-преобразование может быть реализовано в соответствии с выражением (2). В результате первого уровня преобразования получаем набор аппроксимирующих  $u_{j,0}^A$  и детализирующих  $u_{j,0}^D$  вейвлет-коэффициентов, причем длина каждого набора коэффициентов относительно исходной матрицы сигнала напряжения (тока) сократилась в два раза.

$$\begin{pmatrix} h_0 & h_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & h_0 & h_1 \\ g_0 & g_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & g_0 & g_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ \dots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{j,0}^A \\ u_{j,1}^A \\ \dots \\ u_{j,n/2}^A \\ u_{j,0}^D \\ u_{j,1}^D \\ \dots \\ u_{j,n/2}^D \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Конкретные значения коэффициентов вейвлет-фильтра нижних  $h_0, h_1$  и верхних частот  $g_0, g_1$  определяются исходя из типа вейвлет-функции. В настоящее время разработано достаточно большое количество функций, удовлетворяющих условиям вейвлет-анализа (локализация по времени и частоте, обладание конечной энергией и др.).

Как показали исследования [8], для успешного решения различных задач в электроэнергетике необходимо выбрать оптимальную вейвлет-функцию. В работе [8] для подбора оптимальной вейвлет-функции предложено совмещение гармонических групп по ГОСТ [14] и соответствующих амплитудно-частотных характеристик вейвлет-функции (рисунок 2).

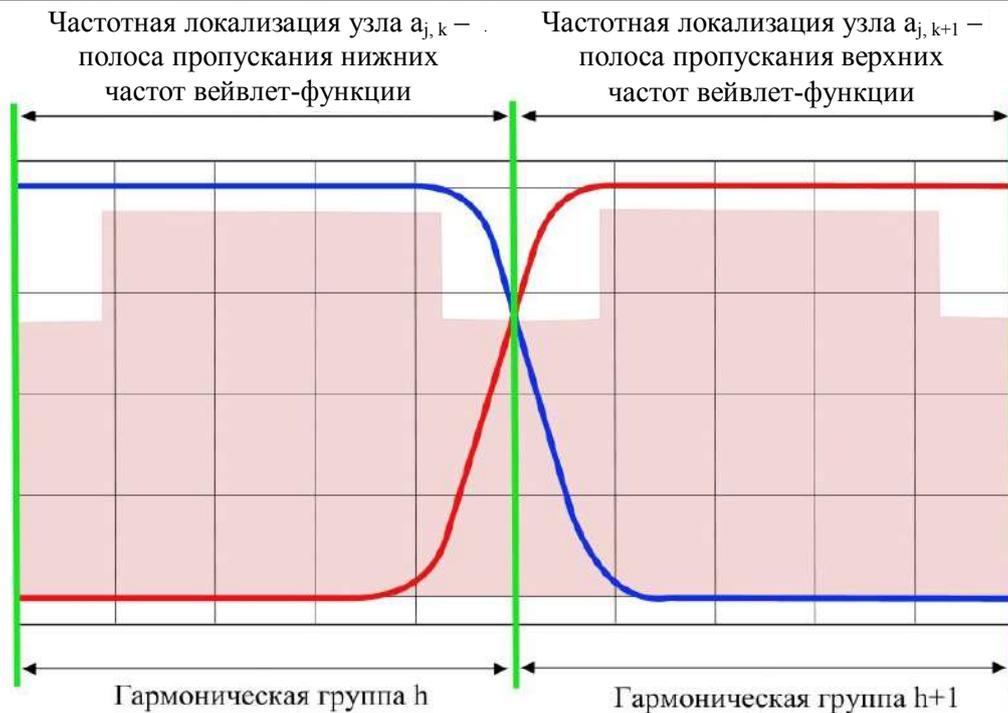


Рисунок 2 – Совмещение частотной локализации вейвлета и гармонических групп по ГОСТ 30804.4.30-2013 [8]

Критерий, предложенный в работе [8], предполагает на основании совмещения частотной локализации вейвлета и гармонических групп (см. рисунок 2) определять энергию спектра соответствующей полосы пропускания. Если энергия спектра (выражение 3) данного частотного коридора будет максимальной при условии минимального среднеквадратического отклонения после восстановления (обратного вейвлет-преобразования) исходной функции напряжения (тока), то эта вейвлет-функция будет оптимальной для решения поставленной задачи.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (u_k - \hat{u}_k)^2}{\sum_{k=1}^n u_k^2}} \rightarrow \min; \\ \Delta_{En} = \frac{E_n}{E_\Sigma} \frac{\sum_{k=n}^{\infty} |u_{j,k}^A|^2 + \sum_{k=n}^{\infty} |u_{j,k}^D|^2}{\sum_{k=-\infty}^{\infty} |u_{j,k}^A|^2 + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |u_{j,k}^D|^2} \rightarrow \max. \end{array} \right. \quad (3)$$

Эффективность применения теории вейвлет-преобразования для сжатия потока цифровых данных о режиме электрической сети проиллюстрируем на рисунке 3 на примере анализа коммутационного перенапряжения при коммутации батареи статических конденсаторов (БСК). Осциллограмма тока построена при частоте дискретизации 3,2 кГц и состоит из  $N = 928$  точек.

Если в отношении исследуемого сигнала тока (см. рисунок 3) провести непрерывное вейвлет-преобразование (рисунок 4), то становится очевидным, что помимо основной частоты  $f = 50$  Гц, которая присутствует на всем исследуемом промежутке времени, кратковременно появляются высокочастотные осциллирующие помехи.

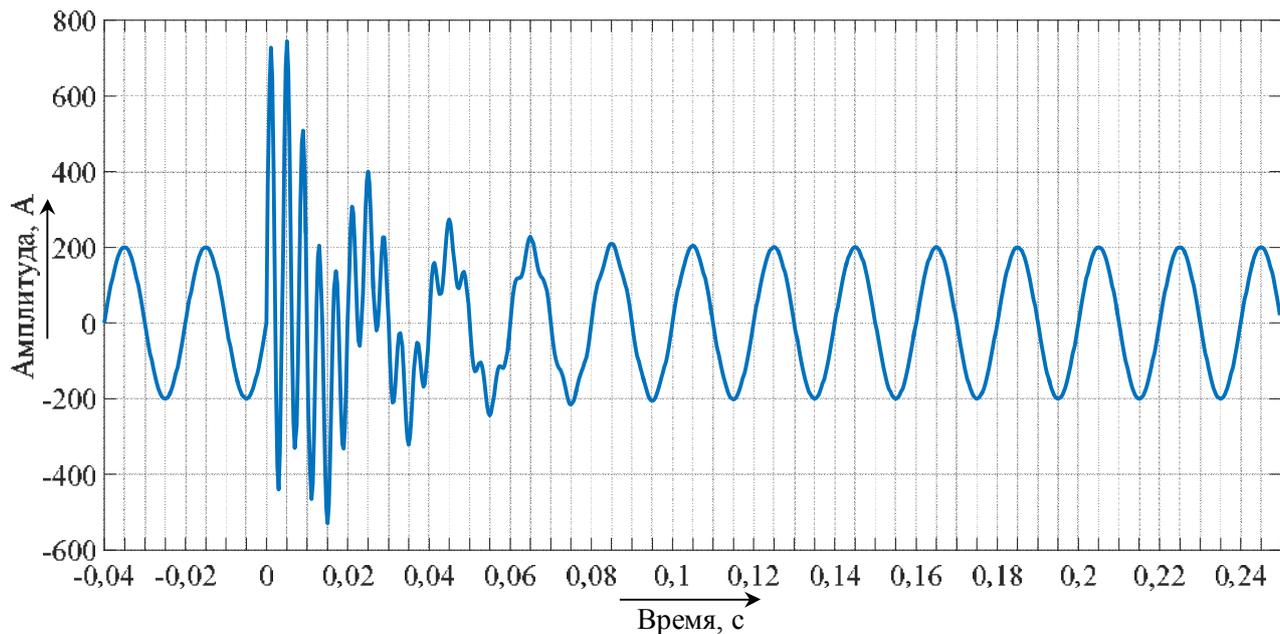


Рисунок 3 – Оциллограмма тока при коммутации БСК

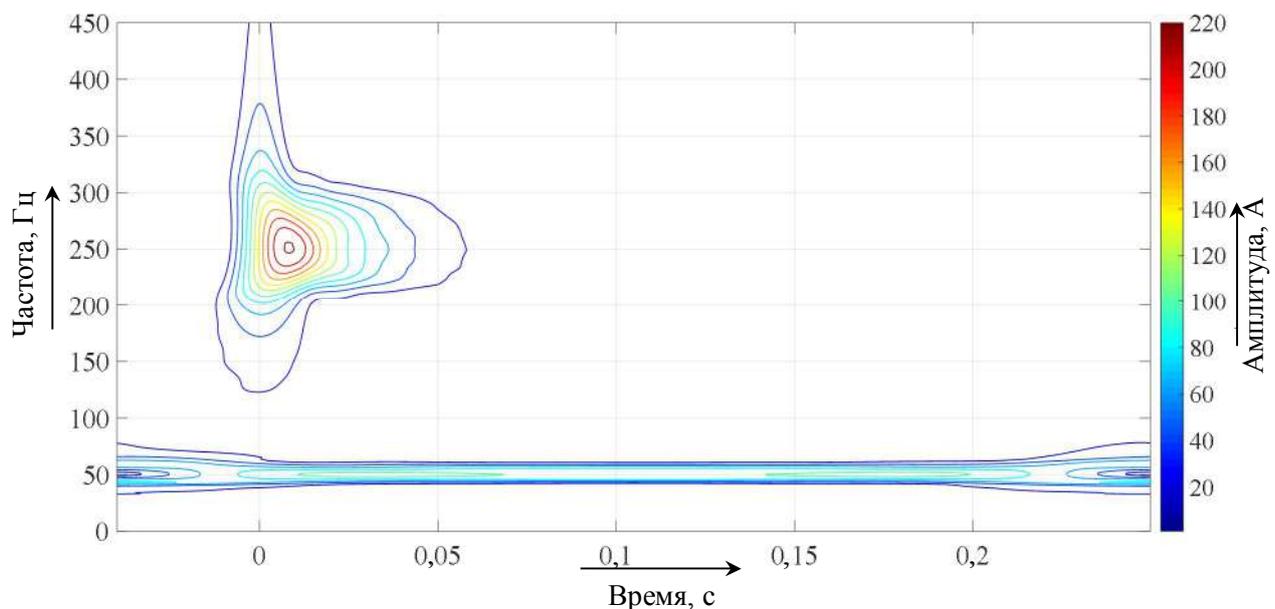


Рисунок 4 – Скалограмма сигнала тока при коммутации БСК

Произведем дискретное вейвлет-преобразование сигнала тока при коммутации БСК в соответствии с выражением (2) до глубины разложения четвертого уровня. Выполнив операцию с помощью восьми различных вейвлет-функций по условию (3), определим энергию спектра каждого частотного диапазона и среднеквадратическое отклонение после процедуры восстановления исходного сигнала (таблица).

Как следует из данных таблицы, основная энергия спектра сосредоточена в аппроксимирующем коэффициенте (A4). Исходный сигнал может быть восстановлен по двум ветвям коэффициентов (A4 и D3), полученных в результате вейвлет-разложения с помощью вейвлета Добеши 10-го порядка (db 10). Аппроксимирующий вейвлет-коэффициент A4 отвечает за частотный диапазон от 0 до 100 Гц, длина коэффициента  $N = 58$  точек. Детализирующий коэффициент D3 представляет частотный диапазон от 200 до 400 Гц и является вектор-строкой из  $N = 116$  точек.

Энергия спектра и среднеквадратичное отклонение при восстановлении сигнала тока при коммутации БСК

Тип вейвлета	Энергия спектра коэффициентов, % от общей					Среднеквадратическое отклонение $\sigma$
	A4	D4	D3	D2	D1	
Хаара (haar)	63,48	10,80	16,55	7,18	1,99	0,4469
Добеши 2 (db2)	69,45	7,24	19,21	3,69	0,41	0,3361
Добеши 10 (db10)	70,66	0,91	27,97	0,42	0,04	0,1148
Добеши 24 (db24)	70,68	3,27	25,84	0,18	0,03	0,1855
Добеши 42 (db42)	70,71	2,28	26,72	0,26	0,03	0,1590
Симлет 4 (sym4)	71,20	5,21	21,87	1,71	0,01	0,2672
Симлет 12 (sym12)	70,67	2,77	26,24	0,28	0,04	0,1747
Симлет 20 (sym20)	70,90	2,11	26,71	0,24	0,04	0,1540

Восстановим сигнал тока по двум ветвям вейвлет-коэффициентов (A4 и D3), обнулив при этом остальные (рисунок 5).

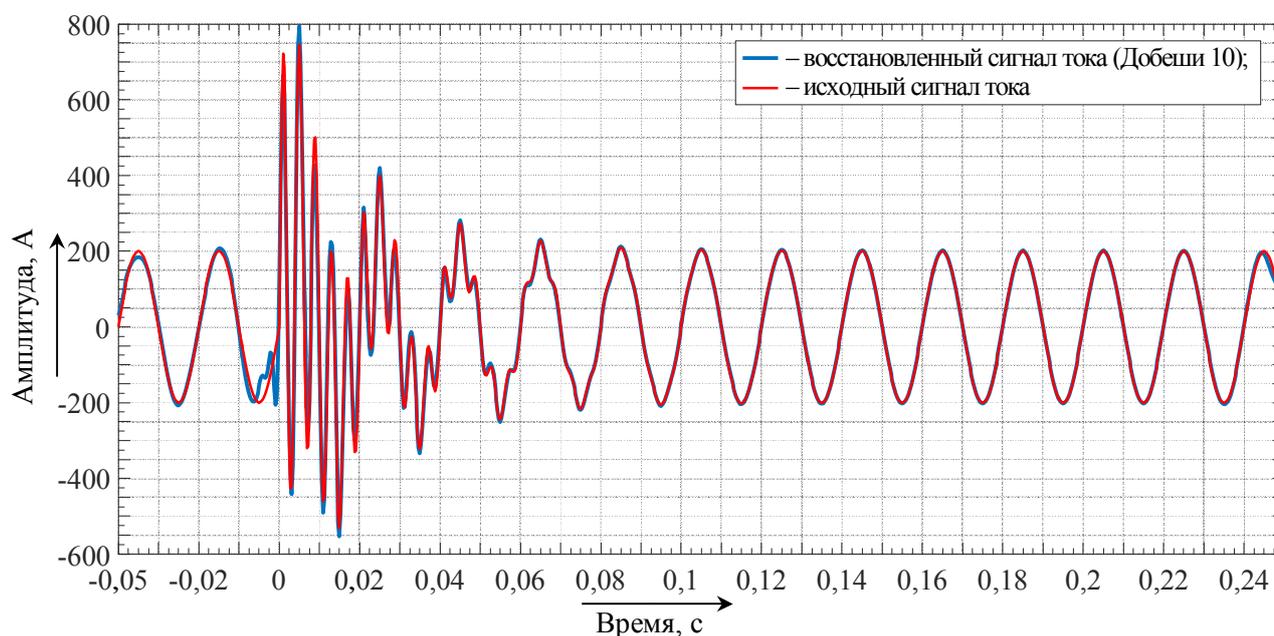


Рисунок 5 – Исходный и восстановленный сигналы тока после вейвлет-преобразования

Абсолютная погрешность процедуры восстановления исходного сигнала тока ( $N = 928$  точек) по двум ветвям вейвлет-коэффициентов (суммарно состоящих из 174 точек) на стадии переходного процесса по отдельным мгновенным значениям не превысила 150 А (рисунок 6). При этом коэффициент сжатия составил  $928/174 = 5,3$  раза. Среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  при этом составило 0,1148.

Задачи обеспечения качества электроэнергии в соответствии с требованиями ГОСТа [9] часто возникают при моделировании и анализе работы систем распределенной генерации [5] и региональных обособленных электротехнических комплексов [10]. При этом изолированные системы электроснабжения характеризуются «отсутствием электрической связи с крупными энергосистемами» [10, с. 173]. В состав таких обособленных электротехнических комплексов могут входить как дизель-генераторные установки, так и фотоэлектрические и ветроэнергетические станции, что повышает внимание к обеспечению показателей качества электроэнергии у потребителя.

В этом отношении применение математического аппарата вейвлет-преобразования позволит не только производить гармонический анализ токов и напряжений [11, 12], сжимая при этом объемы передаваемой информации, но и фиксировать длительность тех или иных возмущающих воздействий для разработки технических мероприятий по повышению энергоэффективности данного электротехнического комплекса.

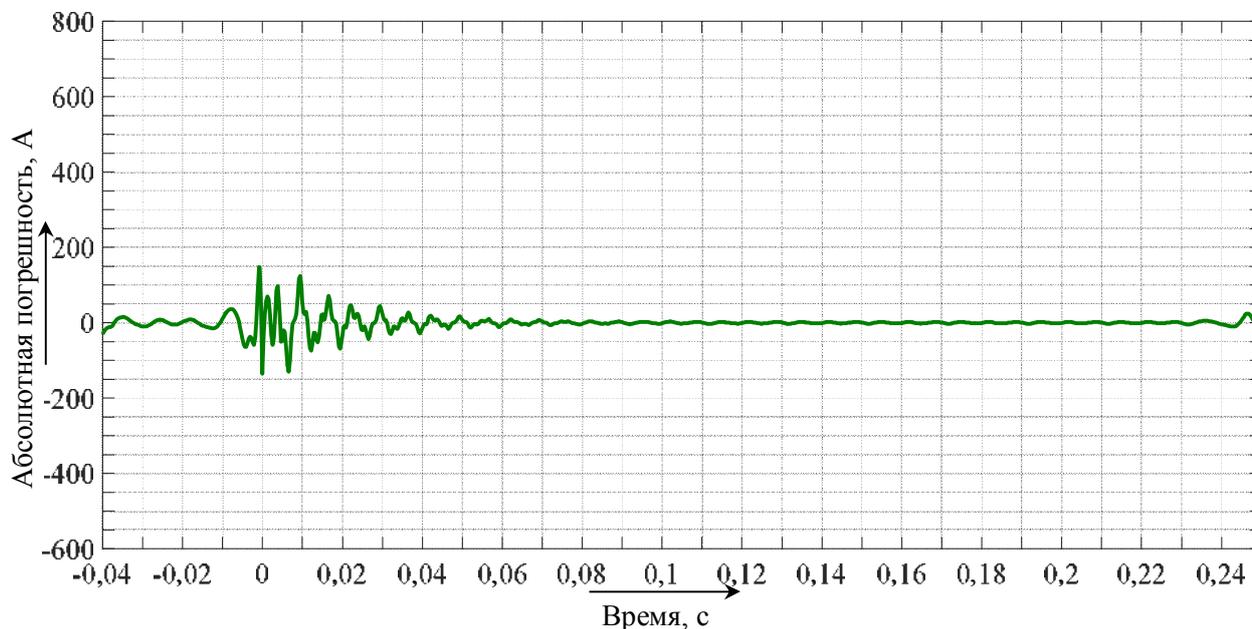


Рисунок 6 – Абсолютная погрешность восстановления сигнала тока при коэффициенте сжатия 5,(3)

Вейвлет-преобразование позволяет определять потери мощности от отдельных гармоник (мощность искажения) с учетом времени присутствия той или иной гармонической составляющей в сигналах напряжения и тока [13, 14].

В настоящей работе представлены новые научные результаты по расчету энергии спектра частотных диапазонов сигнала тока при коммутации БСК. Расчет энергии спектра в работе был произведен по вейвлет-коэффициентам дискретного вейвлет-разложения с помощью восьми типов вейвлет-функций, интегрированных в систему Matlab. Численный эксперимент позволил продемонстрировать, что от выбора вейвлет-функции зависит степень точности восстановления исходного сигнала после процедуры сжатия информации. Приведенный материал демонстрирует эффективность математического аппарата при обработке потока мгновенных значений токов и напряжений несинусоидальных нестационарных режимов электрических сетей. Свойства вейвлет-преобразования, позволяющие анализировать сигнал в трехмерной области (частота – амплитуда – время), позволяют выявлять не только величину гармонических искажений, но и их длительность. Вейвлет-преобразование позволяет сжимать поток мгновенных значений, характеризующих параметры режима электрической сети, а затем с достаточной для инженерных систем точностью производить восстановление исходного сигнала напряжения (тока), что может быть использовано для реализации технологии «цифровая подстанция».

## Список литературы

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р. – Текст : непосредственный // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2019. – № 12. – Ст. 1354. – С. 4624 – 4714.

2. Черемисин, В. Т. Анализ потерь мощности в основном оборудовании статических тиристорных компенсаторов с учетом несинусоидальности напряжения и пути их снижения / В. Т. Черемисин, А. В. Никонов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 1 (37). – С. 54 – 63.
3. Анализ методов оценки амплитуды сигнала при определении параметров качества электроэнергии / А. А. Лаврухин, А. В. Кочетков [и др.]. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 225 – 229. – DOI: 10.25206/1813- 8225-2018-162-225-229.
4. Черемисин, В. Т. Оценка потенциала повышения энергоэффективности Московского центрального кольца за счет применения выпрямительно-инверторных преобразователей / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 3 (39). – С. 57 – 67.
5. Булатов, Ю. Н. Интеллектуальные системы управления установками распределенной генерации / Ю. Н. Булатов. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 10 (129). – С. 78 – 94.
6. Математические модели дефектов роторных механизмов подвижного состава в частотной и временной областях / В. Ю. Тэттэр, А. Ю. Тэттэр [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 3 (39). – С. 39 – 48.
7. ГОСТ 30804.4.7-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерения гармоник и интергармоник для систем электроснабжения. – Введ. 01.01.2014. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 40 с. – Текст : непосредственный.
8. Осипов, Д. С. Разработка критерия выбора оптимального типа материнского вейвлета в задаче расчета активной и реактивной мощности систем электроснабжения / Д. С. Осипов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 71 – 75.
9. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.07.2014. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 20 с. – Текст : непосредственный.
10. Архипова, О. В. Методика моделирования регионально обособленного электротехнического комплекса / О. В. Архипова, В. З. Ковалёв, Р. Н. Хамитов. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 173 – 180.
11. Nicolae I.-D., Nicolae P. M., Marinescu R. F. Evaluating the Non-sinusoidal and Non-symmetric Regimes from a Railway Supplying Substation, *Proceeding of 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, 2018, pp. 1822 – 1827, DOI:10.23919/ ipec.2018.8507949.
12. Czarnecki L. S., Haley P. M. Power properties of four-wire systems at nonsinusoidal supply voltage, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, vol. 31, issue 2, pp. 513 – 521, DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2463253.
13. Применение пакетного вейвлет-преобразования для определения составляющих мощности при несинусоидальных режимах / Л. А. Файфер [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 8 (115). – С. 136 – 145.
14. Чижма, С. Н. Совершенствование методов и средств контроля качества электроэнергии и составляющих мощности в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Чижма Сергей Николаевич. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – 367 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. *Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo akcionernogo obshchestva «Rossijskie zheleznye dorogi» do 2025 goda* (Long-term development program of the open joint-stock company «Russian Railways» until 2025). Meeting of the legislation, 2019, no. 12, art. 1354, pp. 4624 – 4714.
2. Cheremisin V. T., Nikonov A. V. Analysis of power losses in the main equipment static var compensators taking into account the non-sinusoidal voltages and ways of its reduction [Analiz poter' moshchnosti v osnovnom oborudovanii staticheskikh tiristornykh kompensatorov s uchetom nesinusoidal'nosti napryazheniya i puti ih snizheniya]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 1(37), pp. 54 – 63.
3. Lavruhin A. A., Kochetkov A. V. et al. Analysis of methods for assessing the amplitude of a signal when determining power quality parameters [Analiz metodov ocenki amplitudy signala pri opredelenii parametrov kachestva elektroenergii]. *Omskij nauchnyj vestnik – The Journal Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 6 (162), pp. 225 – 229.
4. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Assessment of the Moscow Central Ring energy efficiency potential through the use of rectifier-inverter converters [Ocenka potenciala povysheniya energoeffektivnosti Moskovskogo central'nogo kol'ca za schet primeneniya vypryamitel'noinvertornykh preobrazovatelej]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 3 (39), pp. 57 – 67.
5. Bulatov Yu. N. Intelligent control systems for distributed generation plants [Intellektual'nye sistemy upravleniya ustanovkami raspredelennoj generacii]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21 no. 10 (129), pp. 78 – 94.
6. Tetter V. Yu., Tetter A. Yu., Korneichuk I. L., Borodin A. V. Mathematical models of defects of rotor mechanisms of rolling stock in the frequency and time domains [Matematicheskie modeli defektov rotornykh mekhanizmov podvizhnogo sostava v chastotnoj i vremennoj oblasti]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 3 (39), pp. 39 – 48.
7. *GOST 30804.4.7–2013. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Obshchee rukovodstvo po sredstvam izmereniya garmonik i intergarmonik dlya sistem elektrosnabzheniya* (Electromagnetic compatibility. General guidance on harmonics and interharmonics measuring instruments for power supply systems, State Standard 30804.4.7-2013). Moscow, Standartinform, 2014, 40 p.
8. Osipov D. S. Development of a criterion for choosing the optimal type of mother wavelet in the problem of calculating the active and reactive power of power supply systems [Razrabotka kriteriya vybora optimal'nogo tipa materinskogo vejvleta v zadache rascheta aktivnoj i reaktivnoj moshchnosti sistem elektrosnabzheniya]. *Omskij nauchnyj vestnik – The Journal Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 6 (162), pp. 71–75.
9. *GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* (Electric Energy. Electromagnetic compatibility. Quality standards for electric energy in general power supply systems, State Standard 32144–2013). Moscow, Standartinform, 2014, 20 p.
10. Arhipova O. V., Kovalev V. Z., Khamitov R. N. Methodology for modeling a regionally isolated electrical complex [Metodika modelirovaniya regional'no obosoblennogo elektrotekhnicheskogo kompleksa]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 173 – 180.
11. Nicolae I.-D., Nicolae P. M., Marinescu R. F. Evaluating the Non-sinusoidal and Non-symmetric Regimes from a Railway Supplying Substation, *Proceeding of 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, 2018, pp. 1822 – 1827, DOI:10.23919/ipeec.2018.8507949.

12. Czarnecki L. S., Haley P. M. Power properties of four-wire systems at nonsinusoidal supply voltage, IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, vol. 31, issue 2, pp. 513 – 521, DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2463253.

13. Faifer L.A. et al. Implementation of wavelet packet transform for power components determination in non-sinusoidal situations [Primenenie paketnogo vejvlet-preobrazovaniya dlya opredeleniya sostavlyayushchih moshchnosti pri nesinusoidal'nyh rezhimakh]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2016, no. 8 (115), pp. 136 – 145.

14. Chizhma S. N. Improving methods and means of controlling the quality of electricity and power components in power systems with traction load [Sovershenstvovanie metodov i sredstv kontrolya kachestva elektroenergii i sostavlyayushchih moshchnosti v elektroenergeticheskikh sistemah s tyagovoj nagruzkoy]. Thesis of Grand Dr. in Engineering. Omsk: Omsk State Transport University, 2014, 367 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Архипова Ольга Владимировна

Югорский государственный университет (ЮГУ).  
Чехова ул., д. 16, г. Ханты-Мансийск, 628011,  
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент института  
нефти и газа, ЮГУ.

Тел.: +7 (3467) 37-70-00 (доб. 305).

E-mail: arkh82@mail.ru

### Осипов Дмитрий Сергеевич

Югорский государственный университет (ЮГУ).  
Чехова ул., д. 16, г. Ханты-Мансийск, 628011,  
Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент института  
нефти и газа, ЮГУ.

Тел.: +7 (3467) 37-70-00 (доб. 305).

E-mail: ossipovdmitriy@list.ru

### Парамзин Александр Олегович

Югорский государственный университет (ЮГУ).  
Чехова ул., д. 16, г. Ханты-Мансийск, 628011,  
Российская Федерация.

Младший научный сотрудник института нефти и  
газа, ЮГУ.

Тел.: +7 (3467) 37-70-00 (доб. 305).

E-mail: prado1404@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Архипова, О. В. Анализ режимов систем электро-снабжения на основе цифровой обработки потока мгновенных значений напряжений и токов с помощью вейвлет-преобразования / О. В. Архипова, Д. С. Осипов, А. О. Парамзин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 87 – 96.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Arkhipova Olga Vladimirovna

Yugra State University (YugraSU).  
16, Chekhov st., Khanty-Mansiysk, 628011, the  
Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the de-  
partment «Institute of oil and gas», YugraSU.

Phone: +7 (3467) 37-70-00 (add. 305).

E-mail: arkh82@mail.ru

### Osipov Dmitry Sergeevich

Yugra State University (YugraSU).  
16, Chekhov st., Khanty-Mansiysk, 628011, the  
Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of  
the department «Institute of oil and gas», YugraSU.

Phone: +7 (3467) 37-70-00 (add. 305).

E-mail: ossipovdmitriy@list.ru

### Paramzin Alexander Olegovich

Yugra State University (YugraSU).  
16, Chekhov st., Khanty-Mansiysk, 628011, the  
Russian Federation.

Junior researcher of the department «Institute of oil  
and gas», YugraSU.

Phone: +7 (3467) 37-70-00 (add. 305).

E-mail: prado1404@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Arkhipova O. V, Osipov D. S., Paramzin A. O. Ana-lysis of the modes of power supply systems based on the digital processing of the instant voltage and current values using the wavelet transform. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 87 – 96 (In Russian).

**М. С. Якубов, К. Х. Турдибеков, А. Х. Суллиев**

Ташкентский государственный транспортный университет (Ташкент, Республика Узбекистан)

## **ДИАГНОСТИКА ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО ИНФОРМАЦИОННОЙ ОЦЕНКЕ КОСВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

***Аннотация.** Приведена математическая модель диагностики состояния твердой изоляции высоковольтных трансформаторов по информационной оценке косвенных показателей, т. е. энтропии, например, по содержанию примесей различных газов, растворенных в трансформаторном масле, позволяющей определять техническое состояние без снятия рабочей нагрузки. Произведены расчеты величин средней информации об исправном и неисправном состоянии изоляции по различным видам газовых примесей.*

***Ключевые слова:** диагностика, твердая изоляция трансформаторов, информационная оценка, энтропия, газы, растворенные в масле.*

**Mirzhalil S. Yakubov, Kamalbek Kh. Turdibekov, Absaid Kh. Sulliev**

Tashkent state transport university (Tashkent, Uzbekistan)

## **DIAGNOSTICS OF SOLID INSULATION OF TRANSFORMERS BY INFORMATION ASSESSMENT OF INDIRECT INDICATORS**

***Abstract.** A mathematical model for diagnosing the state of solid insulation of high-voltage transformers based on an informational assessment of indirect indicators, i.e. entropy, for example, by the content of impurities of various gases dissolved in transformer oil, which allows to determine the technical condition without removing the workload. The values of the average information on the working and faulty state of insulation for various types of gas impurities are calculated.*

***Keywords:** diagnostics, solid insulation of transformers, information evaluation, entropy, dissolved gases in oil.*

Одним из приоритетных направлений в деятельности электроэнергетического хозяйства, в частности, системы электроснабжения крупных предприятий и электрифицированной железной дороги, является переход на качественно новый уровень экономической эффективности, основанный на техническом обслуживании и ремонте устройств по результатам функциональной диагностики их состояния.

В программах диагностики наиболее ответственных и дорогостоящих устройств системы электроснабжения наибольшее внимание уделено совершенствованию функциональной диагностики, особенно высоковольтных трансформаторов (ВТ) и выключателей на основе внедрения инновационных технологий. Имеется ряд методов и средств диагностики твердой изоляции ВТ с помощью косвенных наблюдений и оценок, определяемых по наличию примесей в масле его бака [1 – 3]. При старении, действии перегрузок и авариях твердая изоляция ВТ выделяет в трансформаторное масло низкомолекулярные углеводороды:  $C_2H_4$ ,  $CH_2$ ,  $CH_4$ , а также окись углерода  $CO$  и двуокись  $CO_2$  [2, 3]. Исследования эксплуатации высоковольтных тяговых трансформаторов, проведенные нами по данным Управления энергоцентра «АО «Uzbekiston temir yoʻllari», показывает, что скорость увеличения концентрации диагностических газов, растворенных в трансформаторном масле, может превышать 10 – 12 % в месяц, что требует совершенствования технического обслуживания в части своевременной рекуперации или замены масла.

С учетом указанного выше состояния актуальным является средняя информационно-диагностическая оценка состояния твердой изоляции высоковольтных силовых трансформаторов по косвенным показателям газовых примесей, растворенных в масле, которая производится персоналом специальной службы электроснабжения.

Известно, что методологической основой диагностирования объектов энергетики является теория информации, одним из ее основных понятий является энтропия [4 – 6]. Для оценки твердой изоляции ВТ энтропия может быть найдена по формуле:

$$H(E)_{BT} = - \sum_{i=1}^n P(e_i) \log_2 P(e_i), \quad (1)$$

где  $P_i$  – случайное состояние твердой изоляции с вероятностями  $P(e_1), P(e_2), \dots, P(e_n)$ . Укажем здесь, что энтропия твердой изоляции ВТ – это количество информации, которое может быть получено при снятии неопределенности, т. е. при увеличении количества диагностической информации уменьшается количество энтропии.

Среднюю величину состояния твердой изоляции обмотки ВТ  $J_A(B)$ , определяемую по наличию газовых и твердых примесей в трансформаторном масле, можно рассчитать так [7, 8]:

$$J_A(B) = H(A) - H(A/B), \quad (2)$$

где  $H(A)$  – начальная энтропия твердой изоляции  $A$ ;  $H(A/B)$  – условная энтропия твердой изоляции  $A$  относительно состояния  $B$ , т. е. после того, как стало известно состояние газовых и твердых примесей в масле.

Так как состояние твердой изоляции ( $A$ ) и состояние газовых и твердых примесей ( $B$ ) имеют взаимную зависимость, то можем записать энтропию для системы «твердая изоляция – примеси»:

$$H(AB) = H(A) + H(B/A), \quad (3)$$

где  $H(A)$  – энтропия твердой изоляции. По уравнению (3) можем выразить условную энтропию  $H(A/B)$

$$H(A/B) = H(AB) - H(B). \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в (2), получим:

$$J_A(B) = H(A) + H(B) - H(AB). \quad (5)$$

Известно, что структура выражений для энтропии совпадает со структурой формул для определения вероятности совместных появлений событий, поэтому можем записать [9, 10]:

$$H(AB) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i - B_j) \log_2 P(A_i B_j), \quad (6)$$

где  $n$  – число состояний твердой изоляции;  $m$  – число состояний газовых примесей.

С учетом выражения (6) уравнение (5), т. е. средняя величина состояния изоляции, запишется в виде:

$$J_A(B) = - \sum_{i=1}^n P(A_i) \log_2 P(A_i) - \sum_{j=1}^m P(B_j) \log_2 P(B_j) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i B_j) \log_2 P(A_i B_j). \quad (7)$$

Учитывая свойство взаимности энтропии, окончательно имеем:

$$J_A(B) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i B_j) \log_2 \frac{P(A_i B_j)}{P(A_i)P(B_j)}. \quad (8)$$

По полученным выше уравнениям (5) – (8) можем найти  $J_A(B)$  – среднее ожидаемое количество информации, соответствующее величине газовых и твердых примесей в масле  $B_i$ . Рассмотрим информацию, содержащуюся в примесях масла  $B_i$ , соответствующее каждому  $i$ -му состоянию изоляции ВТ:

$$J_A(B) = -\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot J_{A_i}(B). \quad (9)$$

Сопоставляя уравнения (8) и (9), получим:

$$J_{A_i}(B) = \sum_{j=1}^n P\left(\frac{B_j}{A_i}\right) = \log_2 \frac{P(A_i B_j)}{P(A_i) \cdot P(B_j)}. \quad (10)$$

Выражение (10) можем переписать и виде:

$$J_{A_i}(B) = \sum_{j=1}^n P\left(\frac{B_j}{A_i}\right) = \log_2 \frac{P\left(\frac{A_i}{B_j}\right)}{P(B_j)}. \quad (11)$$

На основании уравнений (9) – (11) можно рассчитать информацию состояния изоляции ВТ, т. е. вычислить  $A_i$  по состоянию каждой примеси  $B_j$ :

$$J_{A_i}(B_j) = \log_2 \frac{P\left(\frac{A_i}{B_j}\right)}{P(B_j)} = \log_2 \frac{P(A_i B_j)}{P(A_i) \cdot P(B_j)}. \quad (12)$$

Из физических соображений считаем целесообразным привести для сопоставления идентификацию составов низкомолекулярных газовых углеводородов, выделяемых в герметичных ВТ при наиболее частых их повреждениях, по материалам работ [9, 10].

Таблица 1 – Состав газа, выделившегося в герметичных трансформаторах при характерных повреждениях твердой изоляции [9, 10]

Вид повреждения	Относительная концентрация газа, %								
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Местные перегревы	89	–	2	100	2	100	12	13	–
Тепловое или электрическое разрушение: фенольных смол	–	–	–	–	–	–	–	–	–
пропитанного маслом картона	33	83	100	77	2	4	9	2	–
картона из целлюлозы	19	54	100	22	4	4	9	6	20
изоляции проводов (целлюлоза)	11	48	100	17	4	4	13	7	22
	45	64	100	19	1	–	8	4	3

Приведем пример диагностики изоляции обмоток ВТ по наличию этилена C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, метана CH<sub>4</sub> и двуокиси углерода CO<sub>2</sub> в трансформаторном масле бака. Нами проведено исследование на 50 трансформаторах, среди которых 32 имели исправное состояния изоляции ( $A_1$ ) и 18 – неисправное  $A_2$ .

Таблица 2 – Разновидности газов в масле (см. работы [9, 10])

Исправное состояние $A_1$ , шт.	Неисправное состояние $A_2$ , шт.	Состояние в масле
20	9	Этилена C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> – B <sub>1</sub>
8	7	Метилена CH <sub>2</sub> – B <sub>2</sub>
2	1	Метана CH <sub>4</sub> – B <sub>3</sub>
2	1	Двуокиси углерода CO <sub>2</sub> – B <sub>4</sub>

Рассчитаем среднюю информацию о состоянии изоляции по исследованию всех возможных газовых примесей в масле:

$$J_A(B) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i B_j) \log_2 \frac{P(A_i B_j)}{P(A_i)P(B_j)} =$$

$$= \frac{1}{\lg 2} \left( 0,40 \lg \frac{0,40}{0,32 \cdot 0,40} + 0,08 \lg \frac{0,08}{0,32 \cdot 0,15} + 0,02 \lg \frac{0,02}{0,32 \cdot 0,03} + 0,02 \lg \frac{0,02}{0,32 \cdot 0,02} + \right.$$

$$\left. + 0,09 \lg \frac{0,09}{0,08 \cdot 0,4} + 0,07 \lg \frac{0,07}{0,08 \cdot 0,15} + 0,01 \lg \frac{0,01}{0,08 \cdot 0,03} + 0,01 \lg \frac{0,06}{0,08 \cdot 0,03} \right) = 0,34. \quad (13)$$

Расчет величины информации об исправном состоянии изоляции:

$$J_{A_1}(B) = - \sum_{i=1}^n P\left(\frac{B_i}{A_1}\right) \log_2 \frac{P(A_1 B_j)}{P(B_j)P(A_1)} =$$

$$= \frac{1}{\lg 2} \left( \frac{0,90}{0,32} \lg \frac{0,20}{0,32 \cdot 0,2} + \frac{0,08}{0,32} \cdot \lg \frac{0,08}{0,32 \cdot 0,15} + \frac{0,02}{0,32} \lg \frac{0,02}{0,32 \cdot 0,03} \right) = 0,12. \quad (14)$$

Расчет величины информации о неисправном состоянии твердой изоляции:

$$J_{A_2}(B) = - \sum_{i=1}^n P\left(\frac{B_i}{A_2}\right) \log_2 \frac{P(A_2 B_j)}{P(B_j)P(A_2)} = \frac{1}{\lg 2} \left( \frac{0,04}{0,03} \cdot \lg \frac{0,09}{0,08 \cdot 0,20} + \right.$$

$$\left. + \frac{0,07}{0,08} \cdot \lg \frac{0,07}{0,08 \cdot 0,15} + \frac{0,01}{0,08} \cdot \lg \frac{0,01}{0,08 \cdot 0,03} + \frac{0,01}{0,08} \lg \frac{0,01}{0,03 \cdot 0,08} \right) = 0,99. \quad (15)$$

Расчет информации о состоянии твердой изоляции по этилену:

$$I_A(B_1) = \sum_{j=1}^2 P(A_1 B_1) \log_2 \frac{P(A_1 B_1)}{P(B_1)P(A_1)} = \frac{1}{\log 2} \left( \frac{5,20}{0,20} \log \frac{0,20}{0,32 \cdot 0,20} \right) + \left( \frac{0,09}{0,20} \lg \frac{0,09}{0,08 \cdot 0,20} \right) = 2,77. \quad (16)$$

Аналогичные результаты информации о состоянии твердой изоляции соответственно по метилену, метану и двуокиси углерода, которые рассчитаны по исходным данным таблицы 2 и по формулам (9) – (12), приведены в таблице 3:  $I_A(B_2) = 1,28$ ;  $I_A(B_3) = 0,02$ ;  $I_A(B_4) = 0,002$ .

Таблица 3 – Результаты расчета информации  $I_{A_i}(B_j)$

$A_i$	$B_j$			
	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
$A_1$	2,77	1,28	0,02	0,002
$A_2$	3,02	1,34	0,73	0,73

Анализ результатов расчета показывает возможность оценки информационной ценности каждого состояния, например,  $B_1$ ,  $B_2$  являются наиболее преобладающими, что свидетельствует о превышении температуры обмотки, о наличии в трансформаторе частичных разрядов и необходимости применения системы технического обслуживания по уменьшению тепловых воздействий. Наличие двуокиси углерода говорит о естественном постепенном старении твердой изоляции высоковольтного трансформатора.

Преимуществом предлагаемого информационного подхода по сравнению с регистрируемыми изменениями концентрации является повышение чувствительности по сравнению с изменением концентрации растворенного газа, а также независимость количества энтропии от математического ожидания определяемого параметра, т. е. оно не зависит от параметров предыдущего состояния твердой изоляции для каждого уровня квантования состояния масла.

## Список литературы

1. Amirov S., Yakubov M., Turdibekov K., Sulliev A. Resource-saving maintenance and repair of the traction transformer based on its diagnostics, *International Journal of Advanced Science and Technolog*, 2020, vol. 29, no. 5, pp. 1500 – 1504.
2. Fayzullaev Z. S., Zhurayeva K. K. Study of magnetic circuits of sensors for diagnosing the electric mobile composition equipment, *Chemical Technology, Control and Management*, 2019, no. 1 (85), pp. 34 – 40.
3. Амиров, С. Ф. Анализ динамических характеристик авторезонансных преобразователей неэлектрических величин / С. Ф. Амиров, М. С. Якубов, А. Х. Суллиев. – Текст : непосредственный // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – 2017. – № 1/2. – С. 78 – 84.
4. Диагностика технического состояния электрооборудования систем электроснабжения: В 2 ч. Методы диагностики технического состояния электрооборудования / В. А. Шабанов, М. Г. Баширов, П. А. Хлюпин [и др.]. – Москва: МЭИ, 2018. – 313 с. – Текст : непосредственный.
5. Якубов, М. С. Диагностирование эксплуатационного режима тягового асинхронного электродвигателя / М. С. Якубов, Ж. С. Файзуллаев. – Текст : непосредственный // Известия АНРУз «Проблемы информатики и энергетики». – 2018. – № 4. – С. 33 – 41.
6. Якубов, М. С. Оптимизация периодичности технической диагностики обслуживания и ремонта тягового электрооборудования электровозов / М. С. Якубов, Ж. С. Файзуллаев. – Текст : непосредственный // Энерго- и ресурсосбережение. – 2018. – № 6. – С. 24 – 32.
7. Патент № IAP 05432 (UZ). Магнитоупругий датчик усилий : № IAP 20150228 : заявлено 11.06.2015 : опубликовано 09.06.2017, Бюл. № 3 / Амиров С. Ф., Жураева К. К., Турдибеков К. Х., Болтаев О. Т., Файзуллаев Ж. С. – Текст: непосредственный.
8. Yakubov M. S., Mukhamedova S. G. Continuous diagnostics of the state of asynchronous electric motor on the basis of spectral analysis of its current, *Proceedings of X International scientific conference «Transport Problems»*, Silesian University of Technology, Poland, Katowice, 2018, pp.764 – 770.
9. Yakubov M. S, Mukhamedova S. G. Analysis of optimal periodicity of preventive maintenance of rail service car taking into account operational technology, *European science review*, 2018, no. 1-2, pp. 167 – 170.
10. Якубов, М. С. Методологические аспекты непрерывного контроля диагностики тягового электрооборудования применением методов спектрального анализа / М. С. Якубов, З. Г. Мухамедова, У. Ш. Исроилов, Ж. С. Файзуллаев. – Текст : непосредственный // Химическая технология, контроль и управление. – 2018. – № 3. – С. 67 – 73.

## References

1. Amirov S., Yakubov M., Turdibekov K., Sulliev A. Resource-saving maintenance and repair of the traction transformer based on its diagnostics, *International Journal of Advanced Science and Technolog*, 2020, vol. 29, no. 5, pp. 1500 – 1504.
2. Fayzullaev Z. S., Zhurayeva K. K. Study of magnetic circuits of sensors for diagnosing the electric mobile composition equipment, *Chemical Technology, Control and Management*, 2019, no. 1 (85), pp. 34 – 40.
3. Amirov S. F., Yakubov M. S., Sulliev A. Kh. Analysis of the dynamic characteristics of autotresonant converters of non-electric quantities [Analiz dinamicheskikh kharakteristik avtorezonansnykh preobrazovatelei neelektricheskikh velichin]. *Problemy energo- i resursosberezheniia – Problems of Energy and Resource Saving*, 2017, no. 1/2, pp. 78 – 84.
4. Shabanov V. A., Bashirov M. G., Khlyupin P. A. [and others]. *Diagnostika tekhnicheskogo sostoianiia elektrooborudovaniia sistem elektrosnabzheniia: V 2 ch. Metody diagnostiki tekhnicheskogo sostoianiia elektrooborudovaniia* (Diagnostics of the technical condition of electrical equipment of power supply systems: 2 parts. Methods for diagnosing the technical condition of electrical equipmen). Moscow: MEI Publishing House, 2018, 313 p.

5. Yakubov M. S., Fayzullaev Zh. S. Diagnostics of the operating mode of a traction asynchronous electric motor [Diagnostirovanie ekspluatatsionnogo rezhima tiagovogo asinkhronnogo elektrodvigatelia]. *Izvestiia ANRUz «Problemy informatiki i energetiki» – Bulletin of ANRUz «Problems of Informatics and Energy»*, 2018, no. 4, pp. 33 – 41.

6. Yakubov M. S., Fayzullaev Zh. S. Optimization of the frequency of technical diagnostics of maintenance and repair of traction electrical equipment of electric locomotives [Optimizatsiia periodichnosti tekhnicheskoi diagnostiki obsluzhivaniia i remonta tiagovogo elektrooborudovaniia elektrovozov]. *Energo- i resursosberezhenie – Energy and Resource Saving*, 2018, no. 6, pp. 24 – 32.

7. Amirov S. F., Zhuraeva K. K., Turdibekov K. Kh., Boltaev O. T., Fayzullaev Zh. S. *Patent UZ IAP 05432*, 09.06.2017.

8. Yakubov M. S., Mukhamedova S. G. Continuous diagnostics of the state of asynchronous electric motor on the basis of spectral analysis of its current, *Proceedings of X International scientific conference «Transport Problems»*, Silesian University of Technology, Poland, Katowice, 2018, pp.764 – 770.

9. Yakubov M. S., Mukhamedova S. G. Analysis of optimal periodicity of preventive maintenance of rail service car taking into account operational technology, *European science review*, 2018, no. 1-2, pp. 167 – 170.

10. Yakubov M. S., Mukhamedova Z. G., Isroilov U. S., Fayzullaev Zh. S. Methodological aspects of continuous monitoring of traction electrical equipment diagnostics using spectral analysis methods [Metodologicheskie aspekty nepreryvnogo kontrolya diagnostiki tiagovogo elektrooborudovaniia primeneniem metodov spektral'nogo analiza]. *Khimicheskaiia tekhnologiia, kontrol' i upravlenie – Chemical Technology, Control and Management*, 2018, no. 3, pp. 67 – 73.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Якубов Миржалил Сагатович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Кандидант технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железных дорог», ТГТУ.

Тел.: +99899-819-12-61.

E-mail: etkmyakubov @yandex.ru

### Турдибеков Камалбек Хамидович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Кандидант технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железных дорог», ТГТУ.

Тел.: +99890-168-51-45.

E-mail: etkmturdibekov@yandex.ru

### Суллиев Абсаид Хуррамович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Кандидант технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железных дорог», ТГТУ.

Тел.: +99897-155-16-88.

E-mail: absaid.sulliev@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Якубов, М. С. Диагностика твердой изоляции трансформаторов по информационной оценке косвенных показателей / М. С. Якубов, К. Х. Турдибеков, А. Х. Суллиев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 97 – 102.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Yakubov Mirzhilil Sagatovich

Tashkent state transport university (TSTU).

Candidate of technical sciences, professor of the department "Power supply of railways", TSTU.

Phone: +99899-819-12-61.

E-mail: etkmyakubov @yandex.ru

### Turdibekov Kamalbek Hamidovich

Tashkent state transport university (TSTU).

Candidate of technical sciences, associate professor of the department "Power supply of railways", TSTU.

Phone: + 99890-168-51-45.

E-mail: etkmturdibekov@yandex.ru

### Sulliev Absaid Khurramovich

Tashkent state transport university (TSTU).

Candidate of technical sciences, associate professor of the department "Power supply of railways", TSTU.

Phone: + 99897-155-16-88.

E-mail: absaid.sulliev@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Yakubov M.S., Turdibekov K. Kh., Sulliev A. Kh. Diagnostics of solid insulation of transformers by information assessment of indirect indicators. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 97 – 102 (In Russian).

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И МЕТОДА РАСЧЕТА РЕЖИМА РАЗОМКНУТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-35 кВ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

**Аннотация.** В настоящей статье представлены алгоритм и метод расчета режима разомкнутой электрической сети напряжением 6-35 кВ с учетом температурной зависимости активных сопротивлений. Расчет электрического и теплового режима электрической сети проводится при совместном решении уравнений. Определение напряжений в узлах производится с помощью обратной матрицы узловых и собственных проводимостей. Определение обратной матрицы узловых и собственных проводимостей осуществляется на основе известного прямого метода Жордана – Гаусса. Уравнение теплового баланса провода, используемое для расчета фактической температуры, решается численным методом. Конвективный теплообмен записывается только для вынужденной конвекции, так как провода воздушных линий электропередачи напряжением 6 кВ и выше расположены на различных типах опор, на высоте как минимум 10 м. Этот факт позволяет отказаться от использования формул для естественной конвекции и применять выражения только для вынужденной. Учет солнечной радиации в представленном алгоритме возможен на основе двух способов: упрощенном и рассмотренном в стандарте ПАО «ФСК ЕЭС», который позволяет учитывать фактическое расположение провода относительно севера. На примере тестовой схемы произведен расчет установившегося режима с учетом температурной зависимости активных сопротивлений. Приведены результаты численного эксперимента, подтверждающие работоспособность разработанного алгоритма. Уточнение при определении потерь активной мощности с учетом и без учета фактора нагрева для рассмотренной схемы составляет около 13%. Проверка алгоритма, реализующего метод расчета установившегося режима (УР) разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения с учетом температурной зависимости активных сопротивлений, показала, что в технически допустимых режимах разработанный алгоритм обладает достаточно хорошей точностью в сравнении с программным комплексом RastrWin3.

**Ключевые слова:** метод расчета установившегося режима, уравнение теплового баланса, воздушные линии электропередачи, температура провода, потери активной мощности.

Alexander O. Shepelev

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

## DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM AND METHOD FOR CALCULATING THE OPEN-OPERATED ELECTRIC NETWORK WITH A VOLTAGE OF 6-35 kV TAKING INTO ACCOUNT THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF ACTIVE RESISTANCE

**Abstract.** This article presents an algorithm and a method for calculating power flow of an open electric network with a voltage of 6-35 kV, taking into account the temperature dependence of active resistances. Calculation of the electric and thermal conditions of the electric network is carried out with a joint solution of the equations. The determination of stresses in the nodes is carried out using the inverse matrix of the nodal and intrinsic conductivities. The inverse matrix of nodal and intrinsic conductivities is determined based on the well-known direct Jordan-Gauss method. The equation of the heat balance of the wire used to calculate the actual temperature is solved numerically. Convective heat transfer is recorded only for forced convection, because wires of overhead power lines with a voltage of 6 kV and higher are located on various types of poles, at a height of at least 10 m. This fact allows us to abandon the use of formulas for natural convection and use expressions only for forced convection. Accounting for solar radiation in the presented algorithm is possible on the basis of two methods: simplified and considered in the standard of PJSC FGC UES, which allows you to take into account the actual location of the wire relative to the north. Using the test circuit as an example, the steady-state mode was calculated taking into account the temperature dependence of the active resistances. The results of a numerical experiment are presented, confirming the operability of the developed algorithm. The refinement in determining active power losses with and without taking into account the heating factor for the considered circuit is about 13%. Verification of the algorithm that implements the method of calculating the steady state (SS) of an open electrical network of a medium voltage class taking into account the temperature dependence of active resistances showed that in technically acceptable modes the developed algorithm has good accuracy in comparison with the RastrWin3 software package.

**Keywords:** method of power flow, heat balance equation, overhead power lines, wire temperature, active power losses.

В настоящее время в Российской Федерации реализуются задачи повышения эффективности работы электросетевого комплекса. Основными нормативными документами, на основе которых реализуются задачи модернизации, являются Распоряжение Правительства РФ от 3 апреля 2013 г. № 511-р «Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации»; «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года»; Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 № 321 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики». В указанных документах ставятся задачи повышения пропускной способности существующих и вновь проектируемых электрических сетей и снижения потерь мощности и электрической энергии. Значительное внимание уделяется учету температуры проводов для расчета потерь активной мощности [1 – 3] и предельных токовых нагрузок [4, 5].

Обычно при расчете установившегося режима электрической сети (ЭС) напряжением 6-35 кВ учетом фактической температуры провода воздушной линии электропередачи пренебрегают. Температура провода определяется на основе решения уравнения теплового баланса и может быть рассчитана, например, по следующему выражению [6]:

$$P_{\text{конв}} + P_{\text{изл}} = P_{\text{солн}} + I^2 R(t_{\text{пр}}), \quad (1)$$

где  $P_{\text{конв}}$  и  $P_{\text{изл}}$  – мощности, отдаваемые элементом сети в окружающую среду соответственно конвекцией и излучением;  $P_{\text{солн}}$  – поток солнечной радиации, поглощаемый элементом сети;  $I$  – ток нагрузки;  $R(t_{\text{пр}})$  – активное сопротивление элемента, приведенное к фактической температуре  $\Theta$ .

В большинстве случаев (особенно при пасмурной и дождливой погоде) учетом солнечной радиации пренебрегают. Однако при определенных условиях фактором влияния солнечной радиации на фактическую температуру провода пренебрегать нельзя [7, 8].

Электрические сети напряжением 6-35 кВ по своей конфигурации в большинстве случаев являются разомкнутыми. В некоторых случаях данные сети выполняются замкнутыми, но с обязательным размыканием замкнутого контура в какой-либо точке сети. В литературе обычно такие сети называют петлевыми. Данный факт позволяет улучшить сходимость трудоемкого метода Ньютона для расчета установившегося режима на основе применения более простых топологических методов расчета. Ожидается, что метод Ньютона и его модификации могут в некоторых случаях долго сходиться к искомому решению или разойтись. Поэтому необходимо выбрать метод и форму записи уравнений, которые позволят с наименьшей потерей в быстродействии определять параметры режима.

В общем случае уравнение теплового баланса для воздушной линии электропередачи можно записать в форме (подробное описание составляющих, входящих в уравнение, представлено в [9]):

$$\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{ж}}) = d_{\text{пр}} \left[ \pi \alpha_{\text{вын}} (\Theta_{\text{внеш}} - \Theta_{\text{окр}}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s q_{\text{солн}} \right]. \quad (2)$$

Выражение (2) записано для неизолированного провода воздушной линии электропередачи, т. е.  $\Theta_{\text{внеш}} = \Theta_{\text{ж}}$ . В связи с широким распространением самонесущих изолированных проводов (например, СИП 3), выражение (2) необходимо дополнить формулой связи температур жилы и внешней поверхности провода [10]:

$$\Theta_{\text{пров}} = \frac{\Theta_{\text{внеш}} + \Delta p_0 \cdot S_{\text{из}}}{1 - \alpha \cdot \Delta p'_0 \cdot S_{\text{из}}}. \quad (3)$$

В выражении (2) учет конвективного теплообмена записан для вынужденной конвекции. В действительности можно было бы записать это выражение и для естественной конвекции,

однако провода воздушных линий электропередачи напряжением 6 кВ и выше расположены на различных типах опор на высоте как минимум 10 м. Этот факт позволяет отказаться от использования формул для естественной конвекции и применять выражения только для вынужденной. Коэффициент вынужденной конвекции определяется по выражению [11]:

$$\alpha_k = 0,044 \frac{k_v \cdot (P \cdot v)^{0,6}}{(T_b \cdot d)^{0,4}}, \quad (4)$$

где  $k_v$  – коэффициент угла атаки ветра;  $P$  – атмосферное давление окружающего воздуха, Па;  $v$  – скорость ветра, м/с;  $T_b$  – температура воздуха, К;  $d$  – диаметр провода, м.

Коэффициент угла атаки ветра можно определить на основе данных, представленных в работе [12].

При расчете уровня солнечной радиации можно воспользоваться двумя способами учета – упрощенным и методом, рассмотренным в Методике расчета [12].

Упрощенный метод расчета солнечной радиации основан на том факте, что провод поглощает часть солнечной радиации непосредственно после прохождения лучами атмосферы, а другая поглощаемая часть образуется путем отражения солнечных лучей от поверхности Земли и других объектов. Тогда плотность потока солнечной радиации на поверхности провода будет определяться по выражению [7]:

$$q_{\text{солн}} = k_{\text{зт}} q_{s\text{пр}} \sin \varphi_s + \pi q_{s\text{расс}}, \quad (5)$$

где  $k_{\text{зт}}$  – коэффициент учитывающий затененность участков линии;  $q_{s\text{пр}}$  – плотность потока прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам;  $\varphi_s$  – угол между осью провода и направлением солнечных лучей;  $q_{s\text{расс}}$  – плотность потока рассеянной солнечной радиации.

Данный способ не учитывает достаточно большое количество факторов, влияющих на солнечное излучение, однако он позволяет хотя бы приближенно оценить уровень солнечной радиации, воздействующей на провод.

Перед тем как рассчитывать фактическую температуру провода, необходимо определить примерный уровень токов, протекающих по элементам сети. Для этого необходимо определить граф электрической сети. Построение графа электрической сети осуществляется на основе известных выражений. Конфигурация сети в матричном виде представляется на основе первой матрицы инциденций. Предварительный уровень токов, протекающих по элементам, определим по выражению:

$$I_{\text{лин пред}} = M^{-1} \times J_{\text{зад}}, \quad (6)$$

где  $M$  – первая матрица инциденций;  $J_{\text{зад}}$  – задающий ток в узле электрической сети.

После определения примерного уровня токов, протекающих по элементам сети, необходимо преобразовать выражение (2) с учетом (3) к следующему виду для расчета температуры внешней поверхности изоляции:

$$\Theta_{\text{внеш}} = \Theta_{\text{окр}} + \left[ \frac{1}{\pi \cdot \alpha_{\text{вын}}} \cdot \left( \frac{\Delta p'_0}{d_{\text{пр}}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Theta_{\text{внеш}}) - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot c_0 \cdot (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) + A_s \cdot q_{\text{солн}} \right) \right]. \quad (7)$$

Используемый при решении уравнений режима метод узловых напряжений предполагает определение значений проводимостей ветвей электрической сети. Определение проводимостей элементов сети производится обычно с помощью матрицы узловых проводимостей:

$$Y = M \cdot \text{diag}(Z^{-1}) \cdot M^T, \quad (8)$$

где  $\text{diag}(Z^{-1})$  – матрица проводимостей продольных ветвей (матрица является квадратной и неособенной), причем индуктивные проводимости считаются положительными.

Определение напряжений в узлах производится с помощью выражения (8). Тогда напряжения в узлах сети рассчитываются по выражению:

$$U = Y^{-1} \cdot I_{\text{узел}}, \quad (9)$$

где  $Y$  – матрица узловых проводимостей;  $I_{\text{узел}}$  – вектор-столбец задающих токов с учетом базисного балансирующего узла.

Определение обратной матрицы узловых и собственных проводимостей можно произвести на основе известных прямых методов: Жордана – Гаусса или LU/LUP-разложения. В данной работе обратную матрицу будем определять на основе метода Жордана – Гаусса.

Для определения токов  $I_{\text{лин}}$ , протекающих по элементам, необходимо произвести расчет падений напряжений  $\Delta U$ . Выражения для определения этих параметров представлены ниже.

$$\Delta U = M^T \times U; \quad (10)$$

$$I_{\text{лин}} = \text{diag}(Z^{-1}) \times \Delta U, \quad (11)$$

где  $M^T$  – транспонированная первая матрица инцидентий;  $U$  – напряжения в узлах (без учета базисного узла);  $\Delta U$  – падение напряжений;  $Z^{-1}$  – обратная матрица сопротивлений.

Тепловые уравнения могут быть записаны различными способами, однако все они в целом отражают основную суть, представленную в выражении (1): количество полученной теплоты равно количеству отданной, включают в себя те или иные допущения и поэтому могут быть записаны разными способами.

После окончания итерационного процесса необходимо произвести расчет фактического уровня потерь активной мощности с учетом температуры провода по формуле:

$$\Delta P_{\Theta} = I_{\text{лин}\Theta}^2 \cdot R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Theta_{\text{пров}}). \quad (12)$$

Алгоритм расчета установившегося режима электрической сети напряжением 6-35 кВ представлен на рисунках 1 и 2. Представленная работа является логическим продолжением ранее опубликованной [13] и подытоживает исследования в разрезе проблемы расчета установившихся электрического и теплового режимов разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения.

При расчете установившегося режима ЭС с учетом температурной зависимости сопротивлений необходимо первоначально определить напряжения в узлах, затем протекающие токи и только после расчета параметров электрического режима перейти к определению тепловых параметров. Похожий подход используют авторы в работе [14] для распределительной сети с распределенной генерацией. Далее необходимо произвести корректировку существующих значений активных сопротивлений, которые обычно принимаются по паспортным данным и приводятся к температуре 20 °С.

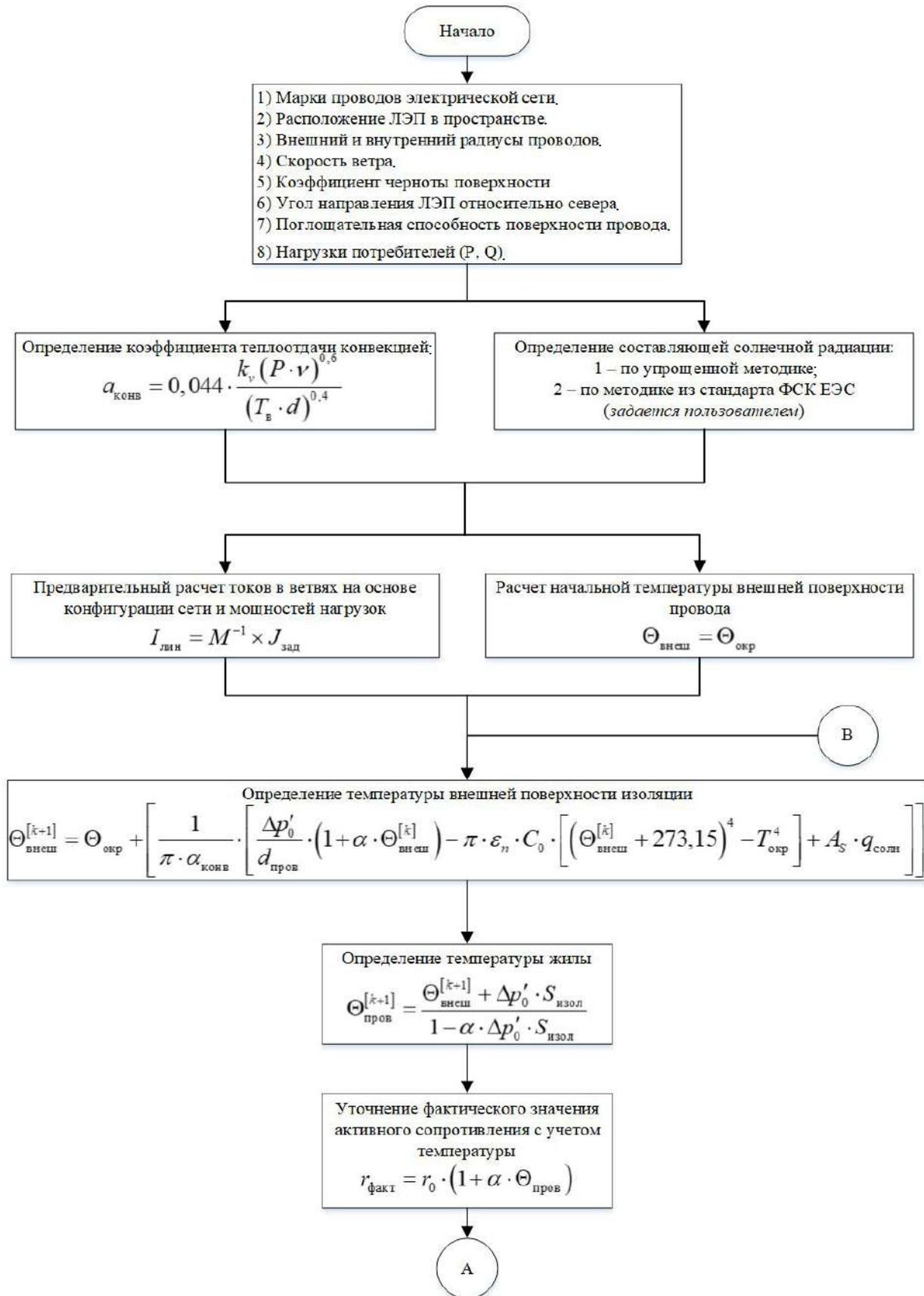


Рисунок 1 – Алгоритм расчета УР ЭС напряжением 6-35 кВ

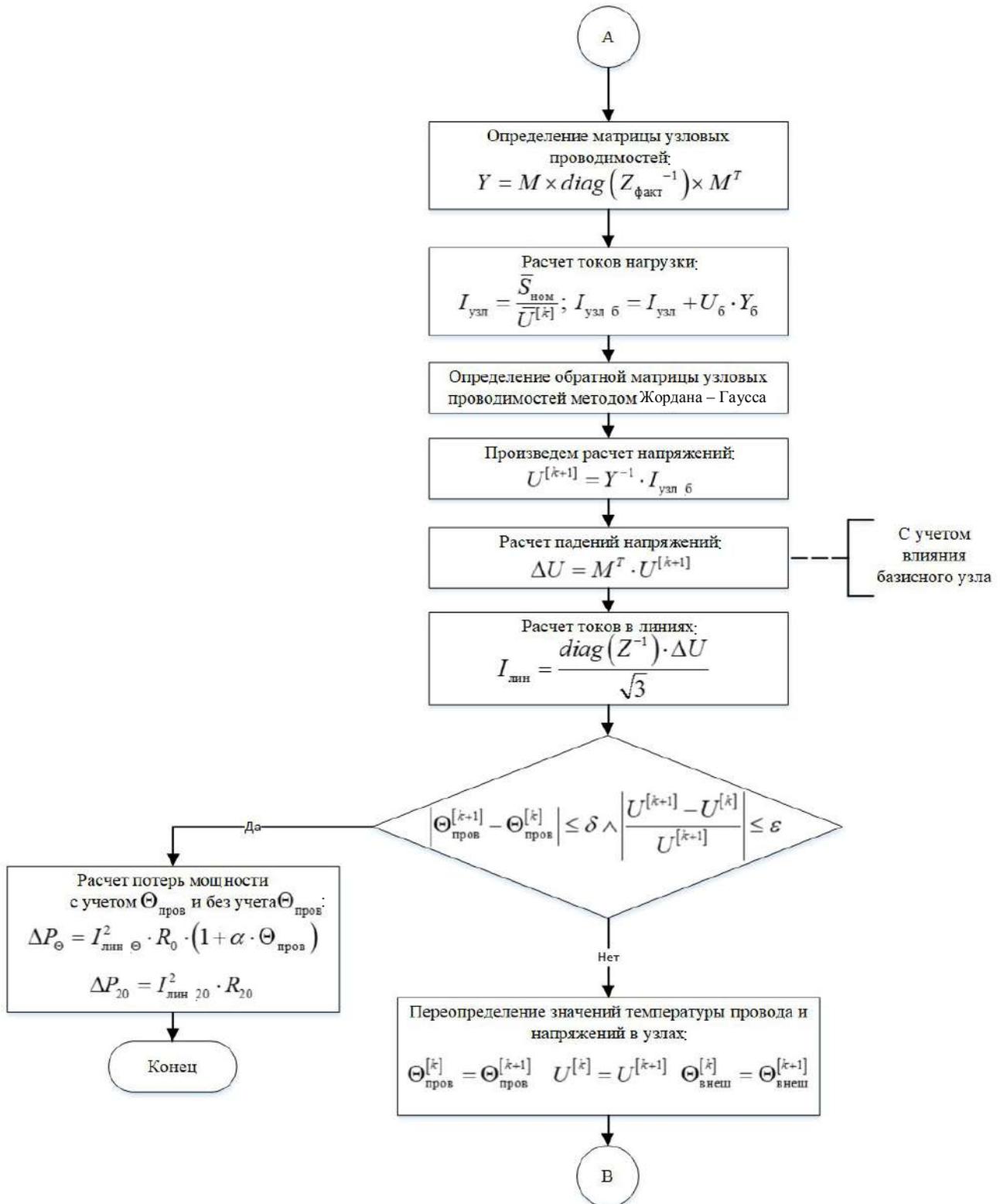


Рисунок 1, лист 2

Расчет установившегося режима с учетом температурной зависимости для разомкнутой распределительной сети напряжением 6-35 кВ произведен с помощью представленного выше алгоритма. Для расчета взаимного влияния электрического и теплового режимов рассмотрим распределительную сеть, представленную на рисунке 2. Параметры сети и нагрузки в узлах представлены в таблицах 1 и 2 соответственно. В данной схеме за балансирующий (базисный) узел принимается шина низкого напряжения понижающей подстанции 110/10 или

35/10 кВ. Температура окружающего воздуха  $\Theta_{\text{окр}}$  принимается равной 25 °С. Скорость ветра варьировалась от 0,6 до 1,2 м/с. Солнечная радиация принималась в соответствии с солнечным днем, чистой атмосферой в день летнего «солнцестояния».

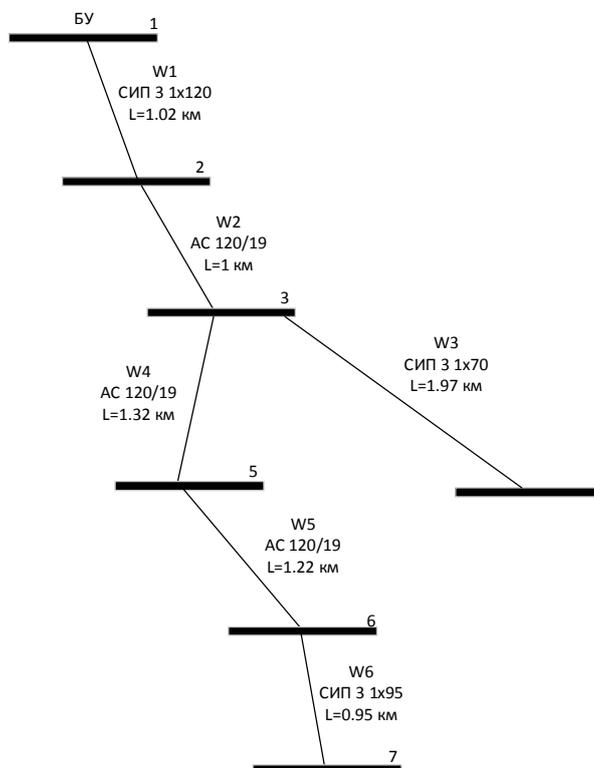


Рисунок 2 – Схема рассматриваемой распределительной сети 10 кВ

Таблица 1 – Параметры ветвей в электрической сети 10 кВ

Марка провода	L, км	$\Gamma_0$ , Ом/км	$D_{\text{ср}}$ , м	$\Gamma_{\text{внутр}}$ , м	$\Gamma_{\text{внеш}}$ , м	v, м/с	$\epsilon$ , о. е.	$\lambda_{\text{изол}}$ , Вт/(м·К)	$\beta_{\text{лин}}$ , град	$A_s$ , о. е.	$X_{\text{нач}}$	$X_{\text{кон}}$
СИПЗ 120	1,02	0,288	0,65	0,0067	0,009	0,6	0,8	0,4	160	0,9	1	2
АС120/19	1	0,244	1	0,0076	0,0076	1,2	0,6	0,024	150	0,6	2	3
СИПЗ 70	1,97	0,493	0,65	0,0052	0,0075	0,9	0,8	0,4	125	0,9	3	4
АС120/19	1,32	0,244	1	0,0076	0,0076	1	0,6	0,024	10	0,6	3	5
АС120/19	1,22	0,244	1	0,0076	0,0076	0,6	0,6	0,024	140	0,6	5	6
СИПЗ 95	0,95	0,363	0,65	0,0057	0,008	0,6	0,8	0,4	170	0,9	6	7

Таблица 2 – Параметры нагрузки в электрической сети 10 кВ

Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, квар
900	450
820	500
710	350
680	420
620	390
580	280

В результате проведенного математического моделирования (расчета электрического режима) были получены следующие результаты (таблица 3):

- 1) напряжения в узлах сети;
- 2) токи в линиях с учетом тепловых процессов;
- 3) токи в линиях без учета тепловых процессов;
- 4) сопротивления линий с учетом и без учета климатических факторов;
- 5) фактическая температура проводника.

Таблица 3 – Результаты расчета УР ЭС 10 кВ с учетом температурной зависимости активных сопротивлений

$U_{\Theta}$ , В	$U_{20}$ , В	$I_{\Theta}$ , А	$I_{20}$ , А	$R_{\Theta}$ , Ом	$R_{20}$ , Ом	$\Delta P_{\Theta}$ , кВт	$\Delta P_{20}$ , кВт	$\Theta_{\text{лин}}$ , °С
10274,4	10301,2	282,7	284,5	0,355	0,294	85,14	69,909	76,02
10121	10156,1	226,2	226,5	0,267	0,244	40,97	37,171	45,082
10026,5	10065,8	45,6	45,7	1,026	0,971	6,395	6,006	35,114
10009,4	10049,2	126	125,5	0,345	0,322	16,431	15,208	39,163
9944,7	9987,1	79,9	79,4	0,315	0,298	6,037	5,653	35,779
9914,6	9958,6	37,5	37,2	0,373	0,345	1,572	1,442	41,608

Далее произведем расчет активной мощности в линиях электропередачи без учета и с учетом температуры, а также определим разницу потерь с учетом и без учета температуры:

с учетом температуры –

$$\Delta P_{\text{темп}} = \sum I_{\Theta}^2 \cdot R_{\Theta} = 156,546 \text{ кВт};$$

без учета температуры –

$$\Delta P = \sum I_{20}^2 \cdot R_{20} = 135,39 \text{ кВт};$$

разница потерь с учетом и без учета температуры –

$$\Delta P_{\text{о.е.}} = \frac{\Delta P_{\text{темп}} - \Delta P}{\Delta P_{\text{темп}}} \cdot 100 = 13,514 \%$$

Произведем сравнение результатов, полученных с помощью разработанного алгоритма, и данных, полученных с помощью расчета установившегося режима по программе RastrWin3 (только электрического режима уже с учетом изменения активного сопротивления). Воспользуемся данными по узлам и ветвям, представленными в таблицах 1 и 2, приняв в расчете активное сопротивление, полученное по результатам работы алгоритма с учетом температурной зависимости активного сопротивления (столбец 5 в таблице 3). Результаты расчета установившегося режима с помощью программного комплекса RastrWin3 представлены на рисунках 3 и 4.

№	О	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N_сн	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	V_ш	V	Delta	Территория
1	<input type="checkbox"/>		База	1		10 500		1			4 466,3	2 545,6					10 500,0		
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2		10 000		1	900,0	450,0							10 274,4	-0,25	
3	<input type="checkbox"/>		Нагр	3		10 000		1	820,0	500,0							10 120,9	-0,57	
4	<input type="checkbox"/>		Нагр	4		10 000		1	710,0	350,0							10 026,4	-0,62	
5	<input type="checkbox"/>		Нагр	5		10 000		1	680,0	420,0							10 009,2	-0,81	
6	<input type="checkbox"/>		Нагр	6		10 000		1	620,0	390,0							9 944,8	-0,96	
7	<input type="checkbox"/>		Нагр	7		10 000		1	580,0	280,0							9 914,6	-1,00	

Рисунок 3 – Результаты расчета установившегося режима из программы RastrWin3 (таблица узлов)

№	О	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	ID Группы	Название	R	X	V	Кт/г	N_анц	БД_анц	P_нач	Q_нач	Na	I max	dP	I зарп.
1	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	1	2			-	0,355	0,308					-4 466	-2 546		282,671	85,129	
2	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	2	3			-	0,267	0,321					-3 482	-2 023		226,285	40,988	
3	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	3	4			-	1,026	0,626					-716	-354		45,565	6,390	
4	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	3	5			-	0,345	0,424					-1 904	-1 118		125,948	16,423	
5	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	5	6			-	0,315	0,391					-1 208	-679		79,905	6,037	
6	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	6	7			-	0,373	0,296					-582	-281		37,504	1,572	

Рисунок 4 – Результаты расчета установившегося режима из программы RastrWin3 (таблица ветвей)

Результаты, полученные с применением предложенного алгоритма и программы RastrWin3, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты сравнения расчета установившегося режима с применением предложенного алгоритма и программы RastrWin3 для разомкнутой сети

$U_{\text{узл}}, \text{В}$			$I_{\text{лин}}, \text{А}$			$\Delta P, \text{кВт}$		
СН*	RastrWin3	$\Delta U, \%$	СН	RastrWin3	$\Delta I, \%$	СН	RastrWin3	$\Delta P, \%$
10274,4	10274,4	0	282,69	282,67	0,007	85,14	85,129	0,013
10121	10120,9	0,001	226,235	226,29	0,024	40,97	40,988	0,044
10026,5	10026,4	0,001	45,581	45,57	0,024	6,395	6,39	0,078
10009,3	10009,2	0,001	125,981	125,95	0,025	16,431	16,423	0,049
9944,8	9944,8	0	79,905	79,905	0	6,037	6,037	0
9914,6	9914,6	0	37,504	37,504	0	1,572	1,572	0

\* – сокращение от названия метода расчета установившегося режима.

Как видно из данных таблицы 4, погрешность определения режимных параметров не превышает долей процента относительно программного комплекса RastrWin3.

Разработанный метод и алгоритм расчета установившегося режима разомкнутой ЭС позволяет рассчитывать установившийся режим разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения с учетом температурной зависимости активных сопротивлений. По результатам работы алгоритма были уточнены значения токов, напряжений и потерь активной мощности. Уточнение потерь активной мощности для представленной схемы с учетом фактической температуры относительно неучета составляет 13,514 %. Наибольшее уточнение наблюдается в сильно загруженных линиях (свыше 70 % от номинального значения), так как активное сопротивление также подвергается значительному уточнению относительно расчета режима без учета температурной зависимости активных сопротивлений. Представленный метод расчета установившегося режима разомкнутой электрической сети с учетом температурной зависимости активных сопротивлений можно рекомендовать для практического применения в электросетевых организациях.

### Список литературы

1. Воротницкий, В. Э. Оценка погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучета метеоусловий / В. Э. Воротницкий, О. В. Туркина. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – 2008. – № 10. – С. 42 – 49.
2. Герасименко, А. А. Учет схемно-структурных и режимно-атмосферных факторов при расчете потерь электроэнергии по данным головного учета / А. А. Герасименко, Г. С. Тимофеев, И. В. Шульгин. – Текст : непосредственный // Вестник КрасГАУ. – 2008. – № 3. – С. 287 – 293.
3. Шведов, Г. В. Оценка влияния метеоусловий на годовые нагрузочные потери электроэнергии в проводах воздушных линий / Г. В. Шведов, А. Н. Азаров. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2016. – № 2. – С. 11 – 18.
4. Вихарев, А. П. Расчет допустимых токов для защищенных проводов ВЛ напряжением 110 кВ / А. П. Вихарев. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – 2017. – № 3. – С. 31 – 34.
5. Никифоров, Е. П. Предельно допустимые токовые нагрузки на провода действующих ВЛ с учетом нагрева проводов солнечной радиацией / Е. П. Никифоров. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – 2006. – № 7. – С. 56 – 59.
6. IEEE Std. 738-2012. (Revision of IEEE Std 738-2006 – Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013). Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, NY, The USA: IEEE, 2012, 72 p.
7. Петрова, Е. В. Оценка влияния солнечной радиации на нагрузочные потери активной мощности в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах линий электро-

передачи / Е. В. Петрова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 3 (39). – С. 134 – 145.

8. Никифоров, Е. П. Учет мощности нагрева солнечной радиацией проводов ВЛ электропередачи / Е. П. Никифоров. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – 2008. – № 2. – С. 49 – 51.

9. Гиршин, С. С. Разработка усовершенствованных методов расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем с учетом температурной зависимости активных сопротивлений ВЛ / С. С. Гиршин, А. О. Шепелев. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – 2019. – № 11. – С. 44 – 54.

10. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры / С. С. Гиршин [и др.]. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2009. – № 3 (83). – С. 176 – 179.

11. Бубенчиков, А. А. Расчет температуры и потерь электрической энергии в самонесущих изолированных проводах воздушных линий электропередачи электроэнергетических систем : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бубенчиков Антон Анатольевич; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2012. – 154 с. – Текст : непосредственный.

12. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий : СТО 56947007-29.240.55.143–2013. – Москва: ПАО «ФСК ЕЭС», 2013. – 67 с. – Текст : непосредственный.

13. Разработка алгоритма расчета потерь мощности в воздушных линиях электропередачи распределительных сетей с учетом режимных и климатических факторов / А. О. Шепелев [и др.]. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2017. – № 3 (153). – С. 78 – 81.

14. Picanco A. F., A.C.Z. de Souza. Temperature-dependent Radial Power Flow with Distributed Generation, *IEEE Milan PowerTech: 23-27 June 2019, Italy*, Milan, 2019. – P. PTC.2019.8810992-1–PTC.2019.8810992-6. DOI: 10.1109/PTC.2019.8810992.

## References

1. Vorotnickij V. E., Turkina O. V. Evaluation of errors in calculating variable electricity losses in overhead lines due to neglect of weather conditions [Ocenka pogreshnostej raschyota peremennyh poter' elektroenergii v vl iz-za neuchyota meteouslovij]. *Elektricheskie stancii – Power Technology and Engineering*, 2008, no. 10, pp. 42 – 49.

2. Gerasimenko A. A., Timofeev G. S., Shul'gin I. V. Consideration of structural, structural and atmospheric factors in the calculation of electricity losses according to the head accounting [Uchet skhemno-strukturnyh i rezhimno-atmosferynyh faktorov pri raschete poter' elektroenergii po dannym golovnoego ucheta]. *Vestnik KrasGAU – Bulletin KrasGAU*, 2008, no. 3, pp. 287 – 293.

3. Shvedov G. V., Azarov A. N. Estimating the need to consider the actual meteorological conditions in calculating annual load losses of electric energy in the wires of overhead power lines [Ocenka vliyaniya meteouslovij na godovye nagruzochnye poteri elektroenergii v provodah vozdushnyh linij]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2016, no. 2, pp. 11 – 18.

4. Viharev A. P. Calculation of permissible currents for protected wires of 110 kV overhead lines [Raschyot dopustimyh tokov dlya zashchishchyonnyh provodov VL napryazheniem 110 kV]. *Elektricheskie stancii – Power Technology and Engineering*, 2017, no. 3, pp. 31 – 34.

5. Nikiforov E. P. Maximum permissible current loads on the wires of existing overhead lines, taking into account the heating of the solar radiation wire [Predel'no-dopustimye tokovye nagruzki na provoda dejstvuyushchih VL s uchetom nagreva provoda solnechnoj radiacii]. *Elektricheskie stancii – Power Technology and Engineering*, 2006, no. 7, pp. 56 – 59.

6. IEEE Std. 738-2012. (Revision of IEEE Std 738-2006 – Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013). Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, NY, The USA: IEEE, 2012, 72 p.

7. Petrova E. V. Assessment of solar radiation effect on real-power losses under load in high-temperature and self-supporting insulated wires of power lines [Ocenka vliyaniya solnechnoj radiacii na nagruzochnye poteri aktivnoj moshchnosti v vysokotemperaturnyh i samonesushchih izolirovannyh provodah linij elektroperedachi]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 3 (39), pp. 134 – 145.

8. Nikiforov E. P. Accounting for the heating power of solar radiation from the wires of overhead transmission lines [Uchet moshchnosti nagreva solnechnoj radiaciej provodov VL elektroperedachi]. *Elektricheskie stancii – Power Technology and Engineering*, 2008, no. 2, pp. 49 – 51.

9. Girshin S. S., Shepelev A. O. Development of improved methods for calculating steady-state modes of power systems taking into account the temperature dependence of the active resistances of overhead transmission lines [Razrabotka usovershenstvovannyh metodov raschyota ustanovivshisya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem s uchyotom temperaturnoj zavisimosti aktivnyh soprotivlenij VL]. *Elektricheskie stancii. – Power Technology and Engineering*, 2019, no. 11, pp. 44 – 54.

10. Girshin S. S., Bubenichikov A. A., Goryunov V. N., Petrova E. V. A mathematical model for calculating power losses in insulated wires with temperature [Matematicheskaya model' raschyota poter' moshchnosti v izolirovannyh provodah s uchyotom temperatury]. *Omskij nauchnyj vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2009, no. 3, pp. 176 – 179.

11. Bubenichikov A. A. *Raschet temperatury i poter' elektricheskoy energii v samonesushchih izolirovannyh provodah vozdukhnyh linij elektroperedachi elektroenergeticheskikh sistem* (Calculation of temperature and electric energy losses in self-supporting insulated wires of overhead power transmission lines of electric power systems). Doctor's thesis, Omsk, Omsk State Technical University, 2012, 154 p.

12. *Metodika raschyota predel'nyh tokovyh nagruzok po usloviyam sohraneniya mekhanicheskoy prochnosti provodov i dopustimyh gabaritov vozdukhnyh linij* (Methods for calculating the limiting current loads according to the conditions of maintaining the mechanical strength of the wires and the permissible dimensions of overhead lines). Moscow, OAO «FSK EES», 2013, 67 p.

13. Shepelev A. O., Girshin S. S., Goryunov V. N., Kuznetsov E. A., Petrova E. V., Kropotin V. O. Development of an algorithm for calculating power losses in overhead power transmission lines of distribution networks, taking into account operating and climatic factors [Razrabotka algoritma rascheta poter' moshchnosti v vozdukhnyh liniyah elektroperedachi raspredelitel'nyh setej s uchyotom rezhimnyh i klimaticheskikh faktorov]. *Omskij nauchnyj vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2017, no. 3, pp. 78 – 81.

14. Picanco A. F., A. C. Z. de Souza. Temperature-dependent Radial Power Flow with Distributed Generation, *IEEE Milan PowerTech: 23-27 June 2019, Italy, Milan*, 2019. – P. PTC.2019.8810992-1–PTC.2019.8810992-6. DOI: 10.1109/PTC.2019.8810992.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Шепелев Александр Олегович

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ОмГТУ.

Тел.: +7 (983) 624-20-08.

E-mail: alexshepelev93@gmail.com

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Shepelev Alexander Olegovich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira st., Omsk, 644050, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Industrial enterprises power supply», OmSTU.

Phone: +7 (983) 624-20-08.

E-mail: alexshepelev93@gmail.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шепелев, А. О. Разработка алгоритма и метода расчета режима разомкнутой электрической сети напряжением 6-35 кВ с учетом температурной зависимости активных сопротивлений / А. О. Шепелев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 103 – 114.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shepelev, A. O. Development of an algorithm and method for calculating the open-operated electric network with a voltage of 6-35 kV taking into account the temperature dependence of active resistance. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 2 (42), pp. 103 – 114 (In Russian).

УДК 621.311

**И. М. Богачков**

ООО «Газпром проектирование», Тюменский филиал, г. Тюмень, Российская Федерация

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПУТЕМ ВЫБОРА ПРОГРЕССИВНОГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ВСЕГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ГАЗОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**Аннотация.** В работе на примере действующих газовых месторождений Западной Сибири обозначена проблема правильного выбора класса напряжения с учетом всех периодов жизненного цикла газовых месторождений. Неверно выбранный класс напряжения приводит к тормозу развития газового месторождения. Произведена оценка динамики электрической нагрузки. Выполнен анализ существующих способов выбора класса напряжения и выявлены их недостатки. Разработаны математические модели расчета оптимального класса напряжения и расчета дисконтируемых затрат путем использования теории планирования эксперимента. Разработан алгоритм выбора оптимального напряжения и исследованы распределительные и питающие сети системы внешнего электроснабжения существующих газовых месторождений Западной Сибири. Предложен прогрессивный класс напряжения для питающей и распределительной сетей.

**Ключевые слова:** класс напряжения, система внешнего электроснабжения, мобильная компрессорная станция, расчетная электрическая нагрузка, компримирование, теория планирования эксперимента, расчетная нагрузка, коэффициент прироста нагрузки, коэффициент распределения по линии, жизненный цикл месторождения.

**Ivan M. Bogachkov**

Tyumen branch of LLC «Gazprom engineering», Tyumen, the Russian Federation

## EXTERNAL POWER SUPPLY SYSTEM OPTIMIZATION BY CHOOSING A PROGRESSIVE VOLTAGE CLASS CONSIDERING THE TOTAL LIFE CYCLE OF A GAS FIELD

**Abstract.** Using the example of operating gas fields in the Western Siberia, the issue of the correct choice of voltage class, considering all the periods of gas fields life cycle, appears. Wrong choice of the voltage class leads to braking development of a gas field. Gas field technological scheme during the each period of the life cycle is considered, the dynamics of the electrical load is estimated. The analysis of existing methods of choosing the voltage class is carried out and their flaws are revealed. Mathematical models of the optimal voltage class calculation and discounted costs calculation are developed using the theory of experiment planning. An algorithm of choosing the optimal voltage is developed and the distribution and supply networks of the external power supply system of the existing gas fields in Western Siberia are investigated. Progressive voltage class for power supply and distribution network is proposed. Conclusions are made.

**Keywords:** voltage class, external power supply system, mobile compressor station, calculated electrical load, compression, theory of experiment planning, calculated load, load growth factor, distribution factor along the line, field life cycle.

Все газовые месторождения проходят четыре периода жизненного цикла [1, 2]: нарастающая добыча, постоянная добыча, падающая добыча, ликвидация месторождения.

С первого по третий период происходит снижение во времени объемов добычи газа, среднего пластового давления и забойных давлений скважин.

Для сохранения объемов добычи газа на месторождениях вводятся: во втором периоде – дожимная компрессорная станция (ДКС), в третьем периоде – наращивание мощности ДКС и современные технологии с установкой на устье кустов газовых скважин мобильных компрессорных установок (МКУ) [3, 4].

В третьем периоде значительно возросшая электрическая нагрузка кустов скважин принципиально изменяет характер электрических нагрузок газовых месторождений, технические решения по источникам электроснабжения и по построению распределительной электрической сети месторождения.

Однако в настоящее время разработка проектной документации в части электроснабжения выполняется в основном с учетом электрической нагрузки только первого, и лишь иногда второго (зависит от компетенции проектировщика) периода и совсем не учитывает электрическую нагрузку третьего периода жизненного цикла газового промысла. Такое положение приводит в последующем к необходимости серьезной реконструкции системы электроснабжения и, как следствие, к большим капитальным затратам.

В настоящее время большинство крупных месторождений газа Западной Сибири находится на завершающей стадии разработки Сенюманской залежи, а следовательно, на промыслах будут устанавливаться МКУ, что потребует реконструкции всей системы электроснабжения Крайнего Севера.

Таким образом, правильно выбранный класс напряжения с учетом всего жизненного цикла газового месторождения является актуальным вопросом.

Например, из-за роста нагрузок в третьем периоде жизни на Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении (НГКМ) необходимо построить дополнительно воздушные линии электропередачи (ВЛ) классом напряжения 10 кВ протяженностью 410 км и ВЛ 35 кВ – 124 км, а на Вынгапуровском газовом месторождении построить ВЛ 6 кВ протяженностью 22 км.

В процессе всего жизненного цикла на газовом месторождении происходит изменение его технологической схемы.

В первом периоде для добычи газа используется энергия пласта, в последующих периодах энергия пласта снижается, что приводит к необходимости ввода внешних источников энергии.

Продолжительность периода разработки действующих газовых месторождений Западной Сибири: период «нарастающая добыча» – от 2 до 8 лет; период «постоянная добыча» – от 8 лет до 21 года; период «падающая добыча» – от 25 до 73 лет. Продление третьего периода жизненного цикла месторождения осуществляется путем распределенного компримирования газа с установкой электроприводных МКУ.

В настоящее время большинство крупных месторождений газа Западной Сибири находится на завершающей стадии разработки Сенюманской залежи – в третьем периоде жизненного цикла «падающая добыча» [5].

На Ямбургском НГКМ [6 – 8] для реализации технологии распределенного компримирования газа на месторождении вводятся 52 МКУ единичной мощностью 1 МВ·А. Для этого требуется выполнить реконструкцию всей существующей системы электроснабжения на Ямбургском НГКМ в следующем объеме:

- строительство ВЛ 10 кВ протяженностью 410 км;
- строительство ВЛ 35 кВ протяженностью 124...169,2 км;
- строительство подстанции (ПС) 10/35 кВ – 2 шт.;
- строительство подстанции ПС 35/10 кВ – 4...5 шт.;
- реконструкция существующих ПС 110 кВ установки комплексной подготовки газа № 2 (УКПГ2), УКПГ4, УКПГ6 – строительство ЗРУ 35 кВ.

Таким образом, одной из основных задач электроэнергетики газовой промышленности является создание оптимальной системы электроснабжения на стадии проектирования с учетом перспективного роста электрических нагрузок.

Класс напряжения является главным параметром системы электроснабжения, и его выбор необходимо изначально выполнять с учетом всех периодов жизненного цикла месторождения.

Правильно выбранный класс напряжения с учетом всего жизненного цикла месторождения позволит раньше ввести МКУ, тем самым сохранить фонд газовых скважин, исключив их обводнение, и снизить затраты на реконструкцию всей системы электроснабжения.

Цель проведенного автором исследования заключается в разработке критериев и алгоритма выбора оптимального класса напряжения системы внешнего электроснабжения газовых месторождений с учетом всего их жизненного цикла.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи.

1. Выполнить анализ фактической расчетной электрической мощности нагрузки каждого периода жизненного цикла газовых месторождений Западной Сибири с целью установки прогнозируемого роста нагрузки для использования его при проектировании системы электроснабжения новых месторождений газа;

2. Провести анализ литературных источников в области существующих методов определения класса напряжения для промышленных объектов;

3. Предложить новые критерии выбора оптимального класса напряжения с учетом всего жизненного цикла газовых месторождений Западной Сибири;

4. Разработать виды целевой функции для расчета класса напряжения;

5. Разработать методику выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газовых месторождений, учитывающая ряд изменяющихся параметров в процессе их жизненного цикла;

6. Разработать обобщенный программный алгоритм выбора оптимального класса напряжения.

Газовые месторождения отличаются от промышленных предприятий протяженными линиями электропередачи с небольшими электрическими нагрузками (низкой плотностью электрических нагрузок), которые многократно растут в конце жизненного цикла месторождения.

По электрической мощности газовые месторождения можно разделить на малые (одно УКПГ мощностью до 7 МВт), средние (до десяти УКПГ общей мощностью от 7 до 75 МВт) и большие (более десяти УКПГ общей мощностью свыше 75 МВт) [9, 10].

На примере действующих газовых месторождений Западной Сибири выполнен анализ динамики электрической нагрузки с учетом всего их жизненного цикла.

Установлено, что в процессе жизненного цикла газового месторождения при уменьшении во времени дебита скважин и среднего пластового давления увеличивается расчетная среднегодовая электрическая нагрузка.

Определен коэффициент прироста расчетной среднегодовой электрической мощности нагрузки для питающей сети: во втором периоде жизни – от 1,37 до 2,63 о. е. (за счет ввода ДКС); в третьем периоде – от 3,03 до 3,74 о. е. (за счет ввода ДКС и МКУ). Определен коэффициент прироста среднегодовой расчетной электрической мощности для распределительной сети на кусты газовых скважин в третьем периоде – от 3,98 до 8,03 о. е. (за счет ввода МКУ).

На рисунке 1 показан рост электрической нагрузки при снижении пластового давления в процессе жизненного цикла газового месторождения.

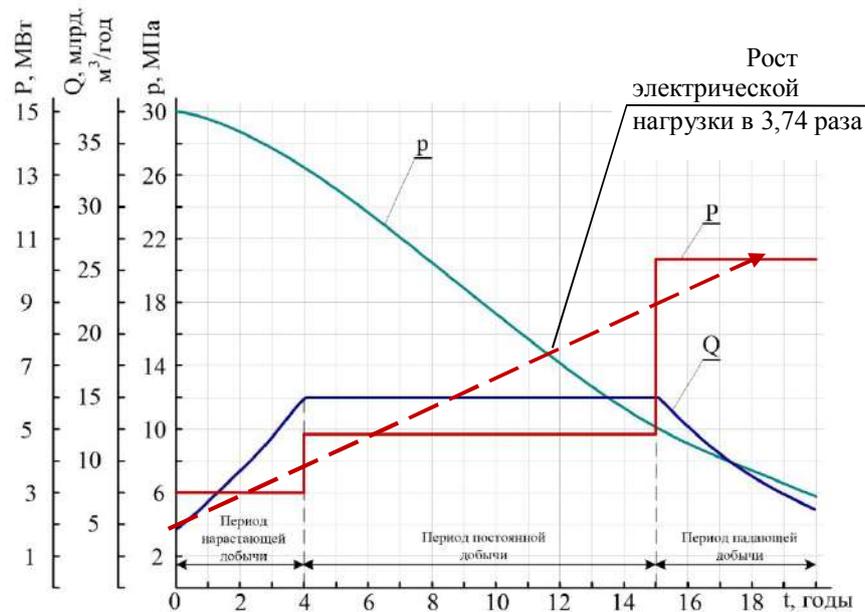


Рисунок 1 – Показатели разработки месторождения с расчетной электрической мощностью: Q – годовая добыча газа; p – пластовое давление; P – среднегодовая расчетная электрическая мощность нагрузки

Анализ существующих методов выбора класса напряжения показал, что выбор напряжения осуществляется по трем направлениям: эмпирический, аналитический и подход с применением теории планирования эксперимента. Существующие методы расчета класса напряжения учитывают два фактора – мощность нагрузки и длину линии электропередачи.

Наиболее близкое направление для разработки методики выбора класса напряжения для системы электроснабжения газовых месторождений с учетом всего их жизненного цикла является метод с применением теории планирования эксперимента.

Методом выбора оптимального класса напряжения с применением теории планирования эксперимента занимались следующие ученые – проф., д.т.н. Федоров А. А. [15], проф., д.т.н. Мельников Н. А. [16], проф., д.т.н. Черепанов В. В. [17] и др.

Однако ранее разработанные целевые функции (математические модели) определения класса напряжения системы внешнего электроснабжения не учитывают изменения таких влияющих факторов, как распределение трансформации по линии электропередачи, прирост электрической нагрузки, линии электропередачи более 15 км и минимальные дисконтируемые затраты.

В настоящее время для выполнения технико-экономических расчетов используют дисконтируемые затраты, которые позволяют учитывать капитальные вложения и изменение стоимости электроэнергии по годам с учетом инфляции.

В системе электроснабжения газового месторождения найти оптимальный класс напряжения означает найти тот класс напряжения, при котором система будет иметь минимальные дисконтируемые затраты с учетом всего жизненного цикла месторождения.

В общем случае для выбора оптимального класса напряжения предварительно определяется нестандартное напряжение при минимальных дисконтируемых затратах.

Предлагаемый новый метод базируется на математическом аппарате планирования эксперимента.

Метод определения оптимального класса напряжения для систем внешнего электроснабжения газовых месторождений с использованием теории планирования эксперимента состоит в получении математических моделей, связывающих значение класса напряжения с факторами, оказывающими наибольшее влияние на напряжение.

Основной задачей исследований автора статьи было получение математической модели – функции отклика (уравнения регрессии) для выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газового месторождения.

Существует совокупность варьируемых факторов, при которых выбранное уравнение регрессии принимает экстремальное минимальное значение:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j}^n b_{i,j} x_i x_j + \dots +, \quad (1)$$

где  $b_0, b_i, b_{i,j}$  – коэффициенты полинома.

Идея предлагаемого метода определения оптимального напряжения состоит в планировании полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа  $2^k$ , где  $k$  – число рассматриваемых факторов.

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется полным факторным экспериментом [11].

Проведенные исследования показали, что при создании математических моделей выбора оптимального класса напряжения питающей сети системы внешнего электроснабжения газовых месторождений необходимо учитывать все влияющие факторы, а в качестве варьируемых выбирать существенные факторы, такие как мощность УКПГ, количество УКПГ, количество кустов газовых скважин, расстояние от источника питания до потребителя электроэнергии, коэффициент прироста электрической нагрузки, коэффициент распределения нагрузки по ВЛ.

На рисунке 2 показан объект исследования, на него воздействует  $n$  изменяемых контролируемых факторов, которые представлены буквой  $x$ , результатом воздействия является параметр оптимизации, который обозначается буквой  $y$ .

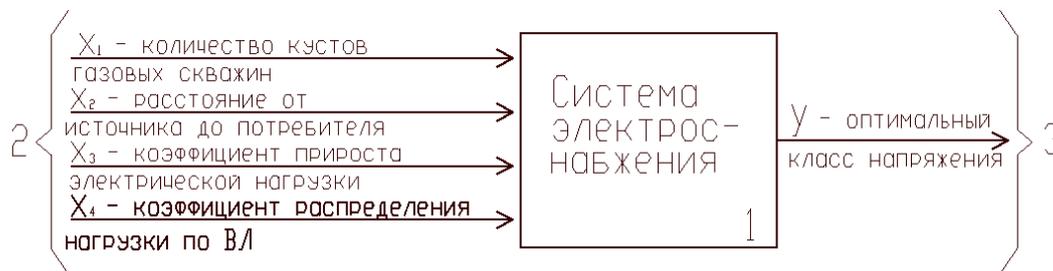


Рисунок 2 – Схема объекта исследования: 1 – объект исследования; 2 – изменяемые контролируемые факторы; 3 – параметр оптимизации

Выбранные уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Наименование фактора	Основной нулевой уровень $x_{i0}$	Интервал варьирования $\Delta x$	Верхний уровень «+»	Нижний уровень «-»
1	2	3	4	5	6
Газовое месторождение большой электрической мощности (более 75 МВт)					
$x_1$	Количество УКПГ, шт.	10,5	4,5	15	6
$x_2$	Расстояние от источника питания до потребителя $L$ , км	105	45	150	60
$x_3$	Коэффициент прироста электрической нагрузки $k_{пр}$ , о. е.	3	2	5	1
$x_4$	Коэффициент распределения нагрузки по ВЛ $k_{расп}$ , о. е.	0,775	0,225	1	0,55

1	2	3	4	5	6
Газовое месторождение средней электрической мощности (от 7 до 75 МВт)					
$x_1$	Количество УКПГ, шт.	3,5	1,5	5	2
$x_2$	Расстояние от источника питания до потребителя $L$ , км	45	30	75	15
$x_3$	Коэффициент прироста электрической нагрузки $k_{пр}$ , о. е.	3	2	5	1
$x_4$	Коэффициент распределения нагрузки по ВЛ $k_{расп}$ , о. е.	0,775	0,225	1	0,55
Газовое месторождение малой электрической мощности (до 7 МВт)					
$x_1$	Мощность УКПГ, МВт.	4,5	2,5	7	2
$x_2$	Расстояние от источника питания до потребителя $L$ , км	11,5	8,5	20	3
$x_3$	Коэффициент прироста электрической нагрузки $k_{пр}$ , о. е.	2,5	1,5	5	1
Распределительная сеть – «Магистральная схема с одной сквозной магистралью»					
$x_1$	Количество газовых кустов $N$ , шт.	6	4	10	2
$x_2$	Расстояние от источника питания до потребителя $L$ , км	10,25	9,75	20	0,5
$x_3$	Коэффициент прироста электрической нагрузки в период падающей добычи $k_{пр}$ , о. е.	5,5	4,5	10	1
$x_4$	Коэффициент распределения нагрузки по ВЛ $k_{расп}$ , о. е.	0,7	0,15	0,85	0,55

Разработаны математические модели для следующих схем электроснабжения:

магистральная схема с двумя сквозными магистралями с трансформацией в конце линии для малой мощности газового месторождения (одно УКПГ мощностью до 7 МВт);

магистральная схема с двумя сквозными магистралями с трансформацией, распределенной по линии для средней мощности газового месторождения (до десяти УКПГ общей мощностью от 7 до 75 МВт);

магистральная схема с двумя сквозными магистралями с трансформацией, распределенной по линии для большой мощности газового месторождения (более десяти УКПГ общей мощностью свыше 75 МВт);

магистральная схема с одной сквозной магистралью с трансформацией, распределенной по линии для кустов газовых скважин.

При построении математических моделей для системы внешнего электроснабжения газовых месторождений использованы следующие классы напряжения: для месторождений малой мощности и распределительной сети – 6, 10, 20, 35, 110 кВ, средней и большой мощности – 20, 35, 110, 220, 330 кВ.

Для составления математических моделей было построено всего 309 схем электроснабжения и для каждой схемы рассчитаны их дисконтируемые затраты в разработанной программе «ПРАДИЗ» (номер регистрации № 2020619917, дата регистрации 26.08.2020).

В таблице 2 приведено изменение факторов для питающей сети системы внешнего электроснабжения газовых месторождений большой электрической мощности (более 75 МВт), эта таблица содержит 16 их сочетаний, полученных при планировании ПФЭ типа 2<sup>4</sup>. Пределы варьирования факторов определяются спецификой газовых месторождений.

Таблица 2 – Изменение факторов при ПФЭ 2<sup>4</sup>

Номер опыта	Количество УКПГ $N$ , шт.	Расстояние от источника питания до потребителя $L$ , км	Коэффициент прироста электрической нагрузки $k_{пр}$ , о. е.	Коэффициент распределения нагрузки по ВЛ $k_{расп}$ , о. е.
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
1	15	60	1	0,55
2	6	150	1	0,55
3	6	60	5	0,55
4	6	60	1	1
5	6	60	1	0,55
6	15	150	5	1
7	15	60	1	0,55
8	15	150	5	0,55
9	15	150	1	1
10	6	60	5	0,55
11	6	60	1	1
12	6	150	5	1
13	15	60	5	0,55
14	15	60	1	1
15	15	150	5	1
16	6	60	5	1

Выбор оптимального класса напряжения в каждой точке принятого плана выполняется по минимуму дисконтируемых затрат.

В таблице 3 приведены результаты расчета дисконтируемых затрат при различных классах напряжения – 20, 35, 110, 220, 330 кВ.

Таблица 3 – Дисконтируемые затраты при комплексном изменении факторов

Номер опыта	Дисконтируемые затраты, млн руб.				
	класс напряжения				
	20 кВ	35 кВ	110 кВ	220 кВ	330 кВ
1	23111	10969	13056,8	20683,4	34530,6
2	31906,3	14497,9	10295,8	18441,8	31448,6
3	12827,5	8903,3	16794,7	12405,2	20689,9
4	10906,4	4876,2	6146,3	10436,1	17636,7
5	5564	3151,5	6119,9	10429,5	17633,8
6	752538,4	328837,9	72739,4	51417,2	83467,5
7	99068,1	47798,6	17619,8	28792,3	48387,9
8	81974,3	39785,6	22719,1	27772,5	44133,7
9	31403,8	14628,5	13294,5	26089	43385,5
10	105136,3	52375,2	13497,9	21092,8	35217
11	52232,7	23290	10361,8	18458,3	31455,9
12	43264,4	20396,8	8742,7	12570,2	20764,6
13	487949,1	205517,9	51606,4	38496,1	59235,2
14	173539,4	74200	24433,5	28941,2	48454,5
15	142893,3	61193,3	26235,3	29257,9	44875,6
16	273298,4	112466,1	26384,5	21120,6	34817,2

■ – наименьшее значение дисконтируемых затрат

Выбор оптимального напряжения при формировании общей модели осуществляется методом Лагранжа по трем точкам.

Для этого выполнен анализ полученных результатов расчета дисконтируемых затрат пяти классов напряжений 20, 35, 110, 220, 330 кВ в каждом опыте (см. таблицу 3), который

позволил выбрать три значения дисконтируемых затрат:  $R_2$  – наименьшее значение дисконтируемых затрат и два ближайших значения: верхнее и нижнее –  $R_1$  и  $R_3$  соответственно.

Выбор трех точек значений дисконтируемых затрат и соответствующий им класс напряжения для каждого опыта представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Дисконтируемые затраты и соответствующие им классы напряжения

Номер опыта	Класс напряжения, кВ			Дисконтируемые затраты, млн руб.		
	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
1	20	35	110	23111,00	10969,00	13056,80
2	35	110	220	14497,90	10295,80	18441,80
3	20	35	110	12827,50	8903,30	16794,70
4	20	35	110	10906,40	4876,20	6146,30
5	20	35	110	5564,00	3151,50	6119,90
6	110	220	330	72739,40	51417,20	83467,50
7	35	110	220	47798,60	17619,80	28792,30
8	35	110	220	39785,60	22719,10	27772,50
9	35	110	220	14628,50	13294,50	26089,00
10	35	110	220	52375,20	13497,90	21092,80
11	35	110	220	23290,00	10361,80	18458,30
12	35	110	220	20396,80	8742,70	12570,20
13	110	220	330	51606,40	38496,10	59235,20
14	35	110	220	74200,00	24433,50	28941,20
15	35	110	220	61193,30	26235,30	29257,90
16	110	220	330	26384,50	21120,60	34817,20

Расчет оптимального напряжения по трем точкам, которые заданы координатами  $U_1, R_1; U_2, R_2; U_3, R_3$  определяется аналитическим выражением:

$$F(U) = F_1(U)R_1 + F_2(U)R_2 + F_3(U)R_3. \quad (2)$$

Аналитическое выражение (2) связывает зависимостью стандартные напряжения и дисконтируемые затраты.

Выражение для определения оптимального напряжения по трем точкам имеет вид:

$$U_{\text{опт}} = \frac{\frac{R_1}{A}(U_2+U_3) + \frac{R_2}{B}(U_1+U_3) + \frac{R_3}{C}(U_1+U_2)}{2\left(\frac{R_1}{A} + \frac{R_2}{B} + \frac{R_3}{C}\right)}, \quad (3)$$

где

$$A = (U_1 - U_3)(U_1 - U_2); \quad (4)$$

$$B = (U_2 - U_1)(U_2 - U_3); \quad (5)$$

$$C = (U_3 - U_1)(U_3 - U_2). \quad (6)$$

Эксперимент для питающей сети системы внешнего электроснабжения газовых месторождений большой электрической мощности (более 75 МВт) реализуется из  $N = 24 = 16$  расчетов, в каждом из которых задается плановое сочетание факторов  $x_1, x_2, x_3, x_4$  и определяется  $U_{\text{опт}}$ .

Условия расчета записываются в виде матрицы планирования эксперимента (таблицы 5, 6), где столбцы 2 – 23 соответствуют кодированным значениям факторов.

В матрице планирования выделяются следующие эффекты взаимодействия:

– первого порядка –  $x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_4, x_2x_4, x_3x_4$ ;

– второго порядка –  $x_1x_2x_3, x_1x_2x_4, x_1x_3x_4, x_2x_3x_4$ ;

– третьего порядка –  $x_1x_2x_3x_4$ .

Таблица 5 – Матрица планирования ПФЭ 2<sup>4</sup>

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_4$	$x_2x_4$	$x_3x_4$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
2	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
3	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1
4	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
8	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
9	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
10	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
11	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
12	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
13	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
14	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
15	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1
16	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1
$U_{bi}$	133,06	15,40	32,18	27,34	12,54	0,0047	5,67	-1,02	-7,70	-2,42	5,16
$R_{20bi}$	145475,8	78583,84	101482,75	92009,38	39533,76	52731,33	50269,73	65762,59	11500,29	26409,88	25979,65
$R_{35bi}$	63930,49	33935,86	43442,46	39754,03	16055,61	22779,79	21213,30	27672,30	5792,96	11269,94	10983,40
$R_{110bi}$	21253,03	8960,08	7114,36	8586,98	2289,23	4272,31	4524,98	4102,69	1673,35	2823,19	1396,25
$R_{220bi}$	23525,26	7905,94	4819,78	3241,31	1261,06	660,72	2063,42	1445,33	1234,07	378,23	563,86
$R_{330bi}$	38508,39	12300,43	8052,9	4391,70	2098,80	1025,38	2727,49	2232,05	2138,16	889,50	982,34

Окончание таблицы 5

Номер опыта	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$	$U_{\text{опт}},$ кВ	$R_{20}$ кВ, млн руб.	$R_{35}$ кВ, млн руб.	$R_{110}$ кВ, млн руб.	$R_{220}$ кВ, млн руб.	$R_{330}$ кВ, млн руб.
1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	1	1	1	-1	-1	71,00	23111,0	10969,0	13056,8	20683,4	34530,60
2	1	1	-1	1	-1	112,34	31906,3	14497,9	10295,8	18441,8	31448,60
3	1	-1	1	1	-1	59,59	12827,5	8903,3	16794,7	12405,2	20689,90
4	-1	1	1	1	-1	70,68	10906,4	4876,2	6146,3	10436,1	17636,70
5	-1	-1	-1	-1	1	63,61	5564,0	3151,5	6119,9	10429,5	17633,80
6	1	1	1	1	1	208,94	752538,4	328837,9	72739,4	51417,2	83467,50
7	-1	-1	1	1	1	146,36	99068,1	47798,6	17619,8	28792,3	48387,90
8	-1	1	-1	1	1	149,46	81974,3	39785,6	22719,1	27772,5	44133,70
9	1	-1	-1	1	1	84,77	31403,8	14628,5	13294,5	26089	43385,50
10	-1	1	1	-1	1	154,13	105136,3	52375,2	13497,9	21092,8	35217,00
11	1	-1	1	-1	1	137,32	52232,7	23290,0	10361,8	18458,3	31455,90
12	1	1	-1	-1	1	148,08	43264,4	20396,8	8742,7	12570,2	20764,60
13	1	-1	-1	-1	-1	207,60	487949,1	205517,9	51606,4	38496,1	59235,20
14	-1	1	-1	-1	-1	159,62	173539,4	74200,0	24433,5	28941,2	48454,50
15	-1	-1	1	-1	-1	159,85	142893,3	61193,3	26235,3	29257,9	44875,60
16	-1	-1	-1	1	-1	195,54	273298,4	112466,1	26384,5	21120,6	34817,20
$U_{bi}$	-4,35	1,23	-7,07	-4,60	3,53						
$R_{20bi}$	33928,31	7321,23	4363,37	16264,56	921,91						
$R_{35bi}$	14449,68	4311,84	3349,95	7543,78	2352,53						
$R_{110bi}$	3358,49	200,91	803,48	1996,24	-616,14						
$R_{220bi}$	1294,89	394,14	542,64	1034,08	1052,47						
$R_{330bi}$	2113,84	948,26	1024,25	1987,49	2047,35						

Полученные математические модели расчета оптимального нестандартного напряжения и дисконтируемых затрат для системы внешнего электроснабжения газового месторождения представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Математические модели оптимального нестандартного напряжения и дисконтируемых затрат для системы внешнего электроснабжения газового месторождения

Номер п/п	Параметр	Формула
1	2	3
Газовое месторождение большой мощности (более 75 МВт)		
1	Оптимальное нестандартное напряжение, кВ	$U_{\text{опт}} = 133 + 15,4x_1 + 32,2x_2 + 27,3x_3 + 12,5x_4 + 0,0047x_1x_2 + 5,67x_1x_3 - 1x_2x_3 - 7,7x_1x_4 - 2,4x_2x_4 + 5,16x_3x_4 - 4,35x_1x_2x_3 + 1,23x_1x_2x_4 - 7x_1x_3x_4 - 4,6x_2x_3x_4 + 3,52x_1x_2x_3x_4$
2	Дисконтируемые затраты для напряжения 20 кВ, млн руб.	$R_{20 \text{ кВ}} = 145476 + 78584x_1 + 101482x_2 + 92009x_3 + 39534x_4 + 52731x_1x_2 + 50270x_1x_3 + 65763x_2x_3 + 11500x_1x_4 + 26410x_2x_4 + 25979x_3x_4 + 33928x_1x_2x_3 + 7321x_1x_2x_4 + 4363x_1x_3x_4 + 16264x_2x_3x_4 + 922x_1x_2x_3x_4$
3	Дисконтируемые затраты для напряжения 35 кВ, млн руб.	$R_{35 \text{ кВ}} = 63930 + 33936x_1 + 43442x_2 + 39754x_3 + 16055x_4 + 22780x_1x_2 + 21213x_1x_3 + 27672x_2x_3 + 5793x_1x_4 + 11270x_2x_4 + 10983x_3x_4 + 14450x_1x_2x_3 + 4312x_1x_2x_4 + 3350x_1x_3x_4 + 7544x_2x_3x_4 + 2352x_1x_2x_3x_4$
4	Дисконтируемые затраты для напряжения 110 кВ, млн руб.	$R_{110 \text{ кВ}} = 21253 + 8960x_1 + 7114x_2 + 8587x_3 + 2290x_4 + 4272x_1x_2 + 4525x_1x_3 + 4103x_2x_3 + 1673x_1x_4 + 2823x_2x_4 + 1396x_3x_4 + 3358x_1x_2x_3 + 201x_1x_2x_4 + 803x_1x_3x_4 + 1996x_2x_3x_4 - 616x_1x_2x_3x_4$
5	Дисконтируемые затраты для напряжения 220 кВ, млн руб.	$R_{220 \text{ кВ}} = 23525 + 7905x_1 + 4820x_2 + 3241x_3 + 1261x_4 + 661x_1x_2 + 2063x_1x_3 + 1445x_2x_3 + 1234x_1x_4 + 378x_2x_4 + 564x_3x_4 + 1295x_1x_2x_3 + 394x_1x_2x_4 + 543x_1x_3x_4 + 1034x_2x_3x_4 + 1052x_1x_2x_3x_4$
6	Дисконтируемые затраты для напряжения 330 кВ, млн руб.	$R_{330 \text{ кВ}} = 38508 + 12300x_1 + 8052x_2 + 4392x_3 + 2098,8x_4 + 1025x_1x_2 + 2727x_1x_3 + 2232x_2x_3 + 2138x_1x_4 + 889x_2x_4 + 982x_3x_4 + 2114x_1x_2x_3 + 948x_1x_2x_4 + 1024x_1x_3x_4 + 1987x_2x_3x_4 + 2047x_1x_2x_3x_4$
Газовое месторождение средней мощности (от 7 до 75 МВт)		
7	Оптимальное нестандартное напряжение, кВ, млн руб.	$U_{\text{опт}} = 76 + 18x_1 + 16,9x_2 + 16,7x_3 + 2,19x_4 + 3,9x_1x_2 + 9,3x_1x_3 + 2,2x_2x_3 + 12x_1x_4 - 11x_2x_4 - 3,5x_3x_4 + 5,4x_1x_2x_3 + 4,5x_1x_2x_4 + 7,37x_1x_3x_4 - 11x_2x_3x_4 + 3,8x_1x_2x_3x_4$
8	Дисконтируемые затраты для напряжения 20 кВ, млн руб.	$R_{20 \text{ кВ}} = 13852 + 5697x_1 + 11015x_2 + 8216x_3 + 2590x_4 + 4390x_1x_2 + 3111x_1x_3 + 7614x_2x_3 + 1851x_1x_4 + 1880x_2x_4 + 1478x_3x_4 + 3377x_1x_2x_3 + 1343x_1x_2x_4 + 762x_1x_3x_4 + 1700x_2x_3x_4 + 1169x_1x_2x_3x_4$
9	Дисконтируемые затраты для напряжения 35 кВ, млн руб.	$R_{35 \text{ кВ}} = 6558 + 2699x_1 + 4537x_2 + 3389x_3 + 1115x_4 + 1784x_1x_2 + 1263x_1x_3 + 3077x_2x_3 + 708x_1x_4 + 665x_2x_4 + 536x_3x_4 + 1237x_1x_2x_3 + 329x_1x_2x_4 + 144x_1x_3x_4 + 672x_2x_3x_4 + 347x_1x_2x_3x_4$
10	Дисконтируемые затраты для напряжения 110 кВ, млн руб.	$R_{110 \text{ кВ}} = 5296 + 1284x_1 + 1287x_2 + 720x_3 + 8,58x_4 + 192x_1x_2 + 91,5x_1x_3 + 90,2x_2x_3 + 313x_1x_4 + 118x_2x_4 - 190x_3x_4 + 375,2x_1x_2x_3 - 225x_1x_2x_4 + 116x_1x_3x_4 + 307x_2x_3x_4 - 35x_1x_2x_3x_4$
11	Дисконтируемые затраты для напряжения 220 кВ, млн руб.	$R_{220 \text{ кВ}} = 8534 + 1691x_1 + 2339x_2 + 802x_3 - 101x_4 + 168x_1x_2 - 43x_1x_3 - 97x_2x_3 + 367x_1x_4 + 149x_2x_4 - 336x_3x_4 + 399x_1x_2x_3 - 362x_1x_2x_4 + 132x_1x_3x_4 + 382x_2x_3x_4 - 129x_1x_2x_3x_4$

1	2	3
Питающая сеть – «Магистральная схема с двойной сквозной магистралью»		
Газовое месторождение малой мощности (до 7 МВт)		
12	Оптимальное нестандартное напряжение, кВ	$U_{\text{опт}} = 33,8 + 4,87x_1 + 15,6x_2 + 14,8x_3 + 2,22x_1x_2 + 2,35x_1x_3 + 11,07x_2x_3 + 0,94x_1x_2x_3$
13	Дисконтируемые затраты для напряжения 6 кВ, млн руб.	$R_{6 \text{ кВ}} = 5700 + 1864x_1 + 4960x_2 + 3671x_3 + 1654x_1x_2 + 1260x_1x_3 + 3310x_2x_3 + 1103x_1x_2x_3$
14	Дисконтируемые затраты для напряжения 10 кВ, млн руб.	$R_{10 \text{ кВ}} = 2337 + 720x_1 + 1784x_2 + 1374x_3 + 547x_1x_2 + 455x_1x_3 + 1106x_2x_3 + 338x_1x_2x_3$
15	Дисконтируемые затраты для напряжения 20 кВ, млн руб.	$R_{20 \text{ кВ}} = 1184 + 331x_1 + 700x_2 + 572x_3 + 201x_1x_2 + 309x_1x_3 + 400x_2x_3 + 184x_1x_2x_3$
16	Дисконтируемые затраты для напряжения 35 кВ, млн руб.	$R_{35 \text{ кВ}} = 954 + 209x_1 + 378x_2 + 267x_3 + 89x_1x_2 + 192,5x_1x_3 + 123x_2x_3 + 84,4x_1x_2x_3$
17	Дисконтируемые затраты для напряжения 110 кВ, млн руб.	$R_{110 \text{ кВ}} = 1417 + 107,75x_1 + 401x_2 + 191,6x_3 + 6,45x_1x_2 + 67,45x_1x_3 + 9,93x_2x_3 + 5,95x_1x_2x_3$
Распределительная сеть – «Магистральная схема с одной сквозной магистралью»		
18	Оптимальное нестандартное напряжение, кВ	$U_{\text{опт}} = 17,4 + 2,1x_1 + 5,5x_2 + 2,9x_3 + 1,7x_4 + 1,33x_1x_2 + 0,94x_1x_3 + 3,69x_2x_3 + 0,9x_1x_4 + 1,79x_2x_4 + 1,06x_3x_4 + 1,35x_1x_2x_3 + 0,85x_1x_2x_4 + 0,45x_1x_3x_4 + 1,14x_2x_3x_4 + 0,63x_1x_2x_3x_4$
19	Дисконтируемые затраты для напряжения 6 кВ, млн руб.	$R_{6 \text{ кВ}} = 506,46 + 274x_1 + 4503x_2 + 334x_3 + 117x_4 + 241x_1x_2 + 229x_1x_3 + 311x_2x_3 + 93x_1x_4 + 112x_2x_4 + 93x_3x_4 + 210x_1x_2x_3 + 89x_1x_2x_4 + 69x_1x_3x_4 + 88x_2x_3x_4 + 65,5x_1x_2x_3x_4$
20	Дисконтируемые затраты для напряжения 10 кВ, млн руб.	$R_{10 \text{ кВ}} = 400 + 202x_1 + 353x_2 + 252x_3 + 133x_4 + 176x_1x_2 + 180x_1x_3 + 239x_2x_3 + 81x_1x_4 + 130x_2x_4 + 129x_3x_4 + 169x_1x_2x_3 + 78,3x_1x_2x_4 + 76,9x_1x_3x_4 + 125,6x_2x_3x_4 + 74,2x_1x_2x_3x_4$
21	Дисконтируемые затраты для напряжения 20 кВ, млн руб.	$R_{20 \text{ кВ}} = 226 + 86x_1 + 151x_2 + 85,6x_3 + 12x_4 + 45,3x_1x_2 + 71x_1x_3 + 44,1x_2x_3 + 9,06x_1x_4 + 10,48x_2x_4 + 11,73x_3x_4 + 41,8x_1x_2x_3 + 7,7x_1x_2x_4 + 8,83x_1x_3x_4 + 10,13x_2x_3x_4 + 7,33x_1x_2x_3x_4$
22	Дисконтируемые затраты для напряжения 35 кВ, млн руб.	$R_{35 \text{ кВ}} = 296,5 + 102,6x_1 + 151x_2 + 74x_3 + 11,16x_4 + 12,3x_1x_2 + 56,7x_1x_3 + 12,3x_2x_3 + 6,06x_1x_4 + 1,2x_2x_4 + 11,05x_3x_4 + 12,01x_1x_2x_3 - 3,825x_1x_2x_4 + 5,95x_1x_3x_4 + 1,11x_2x_3x_4 - 3,94x_1x_2x_3x_4$
23	Дисконтируемые затраты для напряжения 110 кВ, млн руб.	$R_{110 \text{ кВ}} = 661 + 202x_1 + 202x_2 + 242x_3 + 25,7x_4 - 18,35x_1x_2 + 166x_1x_3 - 16x_2x_3 + 13x_1x_4 - 12x_2x_4 + 25,6x_3x_4 - 18,4x_1x_2x_3 - 24,7x_1x_2x_4 + 13x_1x_3x_4 - 12x_2x_3x_4 - 24,7x_1x_2x_3x_4$

Значение напряжения при расчете оптимального напряжения по математическим моделям, как правило, получается нестандартным.

Стандартное напряжение сети трехфазного переменного тока – класс напряжения, который принят на территории Российской Федерации [13, 14] (таблица 7).

Таблица 7 – Шкала стандартных номинальных напряжений

Класс напряжения, кВ														
6	10	15	20	35	–	–	–	110	150	220	330	500	750	1150

По математическим моделям разработан алгоритм выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газовых месторождений.

Алгоритм выбора оптимального стандартного класса напряжения заключается в следующем:

- 1) выбрать схему электроснабжения (по таблице 2);
- 2) определить оптимальное нестандартное напряжение по математическим моделям (по таблице 2);
- 3) определить по шкале стандартных номинальных напряжений (по таблице 3) ближайшее большее и ближайшее меньшее стандартное напряжение;
- 4) рассчитать дисконтируемые затраты (по таблице 2) для обоих стандартных напряжений;
- 5) сравнить дисконтируемые затраты и выбрать класс напряжения с минимальными затратами.

На основании разработанного алгоритма на языке программирования C# (C Sharp) создана программа выбора оптимального напряжения системы внешнего электроснабжения «ПРОН».

В программе «ПРОН» исследованы системы внешнего электроснабжения действующих газовых месторождений Западной Сибири на предмет оптимального класса напряжения. Результаты исследования представлены на рисунках 2 – 5.

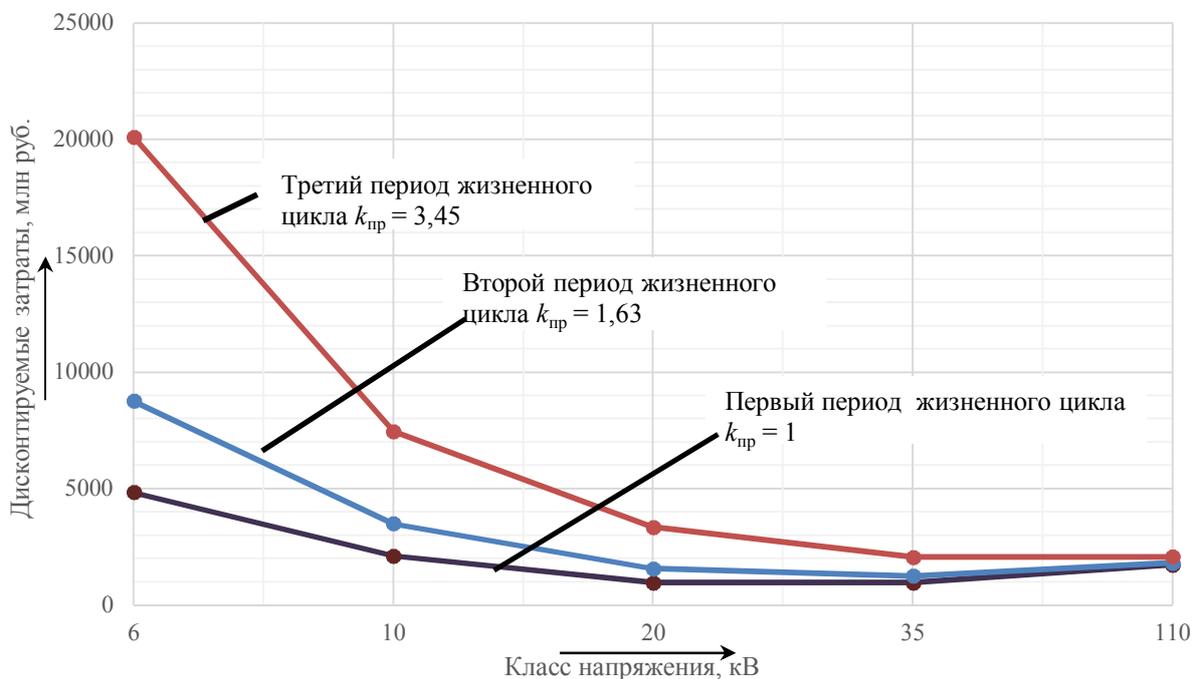


Рисунок 3 – График зависимости класса напряжения от дисконтируемых затрат питающей сети ВЛ «Вынгапур – Песчаная» (Вынгапуровское газовое месторождение)

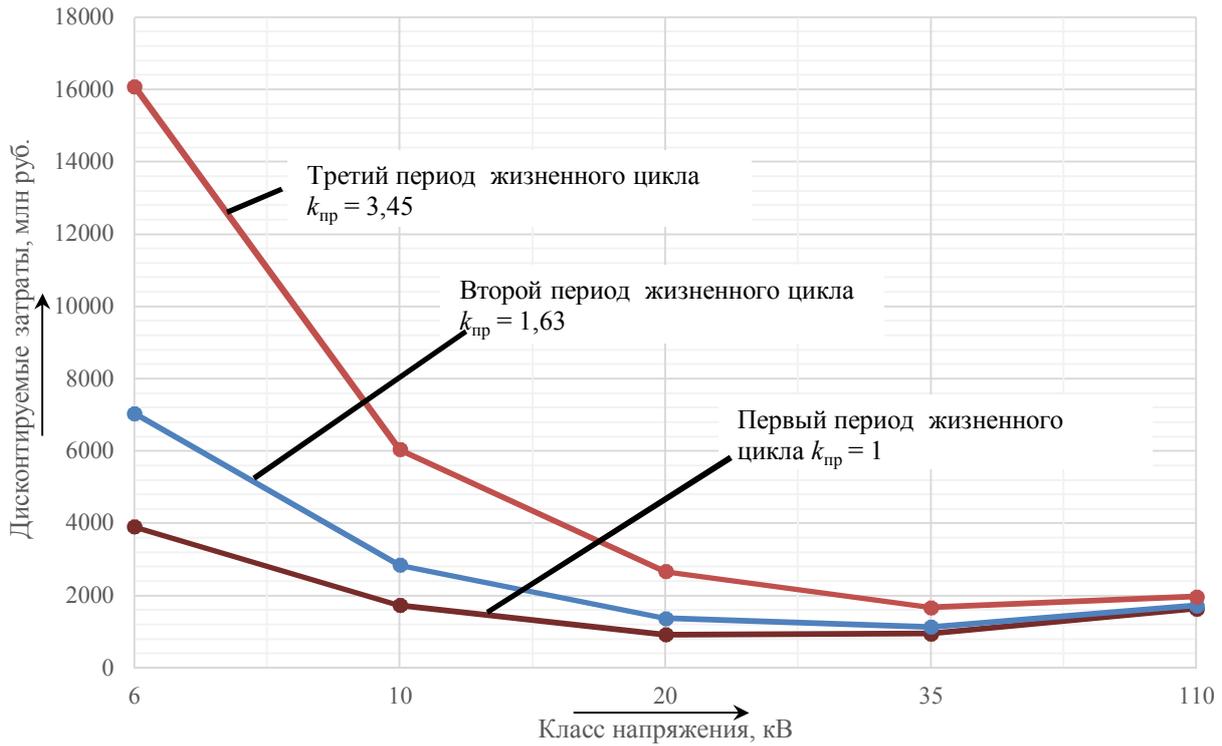


Рисунок 4 – График зависимости класса напряжения от дисконтируемых затрат питающей сети ВЛ «Кирпичная – Таланга» (Западно-Таркосалинское газовое месторождение)

Таким образом, анализируя графики зависимости класса напряжения от дисконтируемых затрат питающей сети (см. рисунки 2, 3), можно сделать вывод о том, что чем выше класс напряжения, тем меньше разница в дисконтируемых затратах. На указанных графиках видно, что для класса напряжения 6 кВ значения дисконтируемых затрат стоят далеко друг от друга, а для класса напряжения 110 кВ значения дисконтируемых затрат сходятся в одну точку.

Это говорит о том, что чем выше класс напряжения, тем питающая сеть системы внешнего электроснабжения более приспособлена к росту электрической нагрузки, т. е. к развитию (продлению жизненного цикла) газового месторождения.

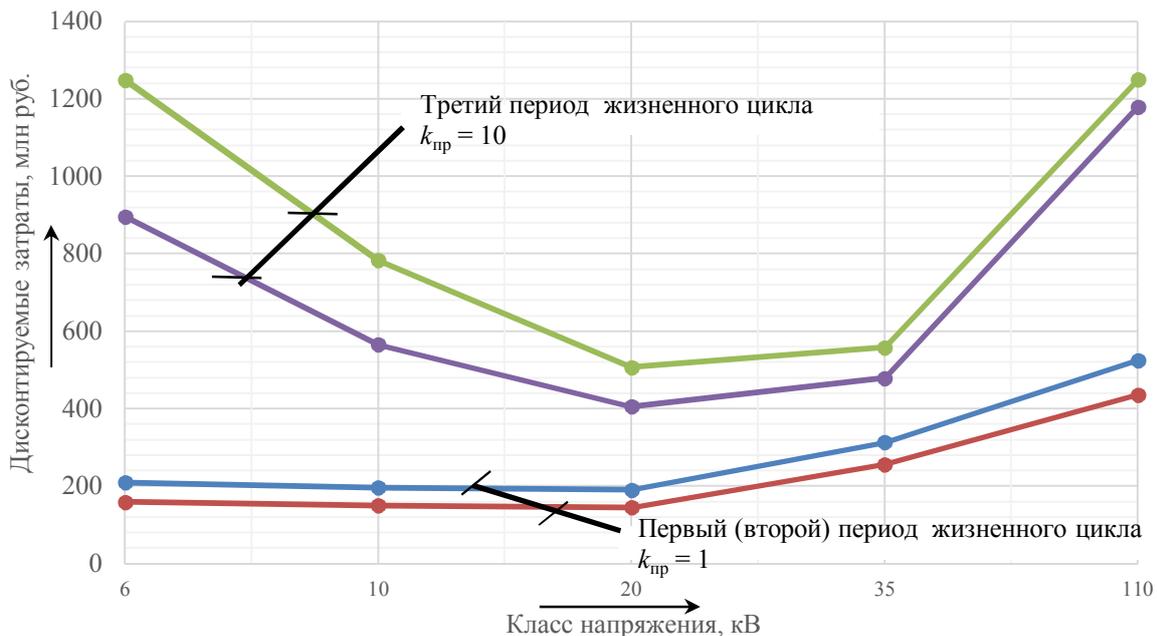


Рисунок 5 – График зависимости класса напряжения от дисконтируемых затрат распределительной сети ВЛ (Юбилейное газовое месторождение)

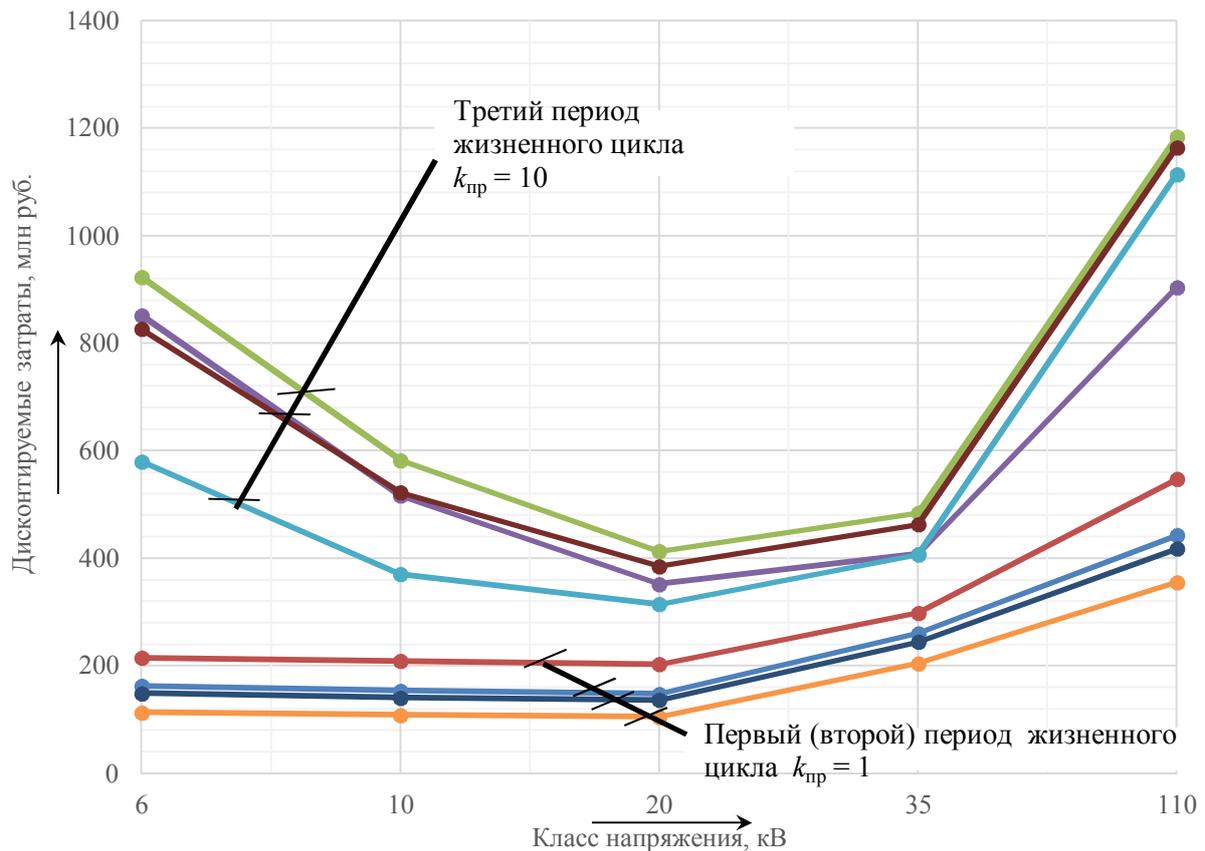


Рисунок 6 – График зависимости класса напряжения от дисконтируемых затрат распределительной сети ВЛ (Южно-Русское газовое месторождение)

Анализируя графики зависимости класса напряжения от дисконтируемых затрат распределительной сети (см. рисунки 4 – 6), можно сделать вывод о том, что класс напряжения 20 кВ является оптимальным для распределительной сети системы внешнего электроснабжения кустов газовых скважин. При росте электрической нагрузки разница между значениями дисконтируемых затрат минимальна.

Еще в 1980 г. Федоровым А. А. в статье [14] отмечалось, что существующие системы электроснабжения с классом напряжения 6(10) кВ ставят технический предел использования при росте электрических нагрузок. Использование напряжения 20 кВ в распределительных сетях позволяет не только уменьшить потери в линиях, но и увеличить радиус обслуживания подстанций, кроме того, оно ведет к сокращению числа трансформаций.

Однако в 2020 г. проектирование распределительной сети системы электроснабжения газовых месторождений выполняется в классе напряжения 6 кВ и в лучшем случае 10 кВ.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Определен коэффициент прироста расчетной среднегодовой электрической мощности нагрузки для питающей сети: во втором периоде жизни – от 1,37 до 2,63 о. е. (за счет ввода ДКС); в третьем периоде – от 3,03 до 3,74 о. е. (за счет ввода ДКС и МКУ). Определен коэффициент прироста среднегодовой расчетной электрической мощности для распределительной сети на кусты газовых скважин в третьем периоде – от 3,98 до 8,03 о. е. (за счет ввода МКУ).

2. Проведенный анализ существующих методов выбора класса напряжения показал, что выбор напряжения осуществляется по трем направлениям: эмпирический, аналитический и подход с применением теории планирования эксперимента. Существующие методы расчета класса напряжения не учитывают особенности (протяженные линии электропередачи и многократный рост нагрузки в конце жизненного цикла) газовых месторождений.

3. Проведенные исследования показали, что при создании математических моделей выбора оптимального класса напряжения питающей сети системы внешнего электроснабжения газовых месторождений необходимо учитывать все влияющие факторы, а в качестве варьируемых выбирать существенные факторы, такие как мощность УКПГ, количество УКПГ, количество кустов газовых скважин, расстояние от источника питания до потребителя электроэнергии, коэффициент прироста электрической нагрузки, коэффициент распределения нагрузки по ВЛ.

4. Разработаны четыре математических модели с линейными полиномами выбора оптимального напряжения.

5. Разработан алгоритм выбора стандартного оптимального класса напряжения для системы внешнего электроснабжения с учетом всех периодов жизненного цикла газового месторождения при комплексном изменении влияющих факторов.

6. Исследовано внешнее электроснабжение действующих газовых месторождений Западной Сибири на предмет оптимального класса напряжения. Установлено, что прогрессивны классом напряжения для распределительной сети является 20 кВ; для питающей сети газовых месторождений большой и средней мощности – 110 кВ; для питающей сети газовых месторождений малой мощности – 35 и 110 кВ.

7. Класс напряжения 6 кВ является непрогрессивным и неперспективным для системы внешнего электроснабжения новых газовых месторождений, так как он затормаживает развитие жизненного цикла газового месторождения.

## Список литературы

1. Безносиков, А. Ф. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений : учебное пособие / А. Ф. Безносиков, И. А. Синцов, Д. А. Остапчук. – Тюмень : ТИУ, 2016. – 80 с. – Текст : непосредственный.

2. Хачатуров, В. Р. Математическое моделирование ликвидации газовых месторождений / В. Р. Хачатуров, А. Н. Соломатин, А. К. Скиба. – Текст : непосредственный // Экспозиция. Нефть. Газ. – 2016. – № 6(52). – С. 34 – 36.

3. Воронцов, М. А. Перспективы применения, расправленного компримирования в промысловых системах добычи газа / М. А. Воронцов, А. А. Ротов, И. В. Марущенко, Е. М. Лаптев. – Текст : непосредственный // Вести газовой науки. – 2014. – № 4 (20). – С. 164 – 173.

4. Минликаев, В. З. Применение мобильных компрессорных установок на завершающей стадии разработки газовых залежей / В. З. Минликаев, Д. В. Дикамов, О. В. Арно [и др.]. – Текст : непосредственный // Газовая промышленность. – 2015. – № 1 (717). – С. 15 – 17.

5. Саранча, А. В. Низконапорный газ сеноманских залежей ЯНАО / А. В. Саранча, И. С. Саранча. – Текст : непосредственный // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10 – № 3 (52). – С. 146 – 147.

6. Арно, О. Б. Техничко-технологические решения и инновации на разных стадиях жизненного цикла месторождений Ямбурга / О. Б. Арно. – Текст : непосредственный // Научный журнал Российского газетного общества. – 2015. – № 2-3. – С. 7 – 14.

7. Сэротэтто, И. В. Применение модульных компрессорных установок как метод эффективной разработки Ямбургского месторождения на стадии падающей добычи / И. В. Сэротэтто, В. В. Новохатин. – Текст : непосредственный // Техника и технология строительства и ремонта нефтяных и газовых скважин. Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов. Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений. – Тюмень: ТИУ, 2015. – С. 169 – 172.

8. Огай, В. А. Экономическая и энергетическая эффективность применения отечественных МКУ при добыче низконапорного Сеноманского газа / В. А. Огай. – Текст : непосредственный // Научный форум. Сибирь. – 2015. – Вып. 1. – С. 59 – 61.

9. Ермилов, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Ермилов. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с. – Текст : непосредственный.

10. Мельников, М. А. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие / М. А. Мельников. – Томск : Томский политехнический ун-т, 2000. – 144 с. – Текст : непосредственный.
11. Веников, В. А. Моделирование энергетических систем / В. А. Веников. – Текст : непосредственный // Электричество. – 1971. – № I. – С. 5 – 13.
12. Шабад, М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. – Санкт-Петербург : ПЭИПК, 2010. – 350 с. – Текст : непосредственный.
13. ГОСТ 721-77 «Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В» : межгосударственный стандарт : издание официальное : дата введения 1978-07-01. – Москва: Издательство стандартов, 2002. – 8 с. – Текст : непосредственный.
14. Федоров, А. А. Необходимость применения напряжения 20 кВ в распределительных сетях предприятий и городов / А. А. Федоров, В. В. Каменева, А. И. Чернусский [и др.]. – Текст : непосредственный // Электричество. – 1980. – № 8. – С. 58 – 59.
15. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с. – Текст : непосредственный.
16. Мельников, Н. А. Электрические сети и системы / Н. А. Мельников. – Москва: Энергия, 1975. – 463 с. – Текст : непосредственный.
17. Черепанов, В. В. Линеаризация затрат на элементы системы электроснабжения при выборе номинального напряжения электрической сети / В. В. Черепанов, И. А. Суворова. – Текст : непосредственный // Научно-методологические проблемы и новые технологии образования. – 2012. – № 6 (48). – С. 53 – 55.

## References

1. Beznosikov A. F., Sintsov I. A., Ostapchuk D. A. *Razrabotka i ekspluatatsia gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdenij: uchebnoe posobie* (Development and operation of gas and gas condensate fields: textbook). Tyumen: TIU Publ., 2016, 80 p.
2. Hachaturov V. R., Solomatin A. N., Skiba A. K. Mathematical modeling of gas field liquidation [Matematicheskoe modelirovanie likvidatsii gazovykh mestorozhdeni]. *Ekspozitsija. Neft. Gaz – The journal of oil and gas exposition*, 2016, no. 6 (52), pp. 34 – 36.
3. Voroncov M. A., Rotov A. A., Marushhenko I. V., Laptev E. M. Prospects of the use of straightened compression in commercial gas production systems [Perspektivy primeneniya raspravlenogo komprimirovaniya v promyslovykh sistemakh dobychi gaza]. *Vesti gazovoj nauki: nauchno-tekhnicheski sbornik – The journal of the news of gas science*, 2014, no. 20, pp. 164 – 173.
4. Minlikaev V. Z., Dikamov D. V., Arno O. V., Merkulov A. V., Kirsanov S. A., Krasovski A. V., Svenski S. Yu., Kononov A. V. Application of mobile compressor units at the final stage of development of gas fields [Primenenie mobilnykh kompressornykh ustanovok na zavershaiushhei stadii razrabotki gazovykh zalezhei]. *Gazovaja promyshlennost – The journal of gas industry*, 2015, no. 1 (717), pp. 15 – 17.
5. Sarancha A. V., Sarancha I. S. Low-pressure gas of Cenomanian fields of Yamalo-Nenets Autonomous District [Nizkonapornyj gaz senomanskih zalezhej JaNAO]. *Akademicheski zhurnal Zapadnoi Sibiri – Academic journal of Western Siberia*, 2014, vol. 10, no. 3 (52), pp.146 – 147.
6. Arno O. B. Technical and technological solutions and innovations at different stages of Yam-burg fields' life cycle [Tehniko-tehnologicheskie reshenia i innovatsii na raznykh stadiakh zhiznennogo cikla mestorozhdeni Yamburga]. *Nauchnyj zhurnal Rossiiskogo gazetnogo obshhestva – Scientific journal of the Russian newspaper society*, 2015, no. 2-3, pp. 7 – 14.
7. Serotetto I. V., Novohatin V. V. Application of modular compressor units as a method of effective development of the Yamburgskoe field at the stage of falling production [Primenenie modulnykh kompressornykh ustanovok kak metod effektivnoi razrabotki Yamburgskogo mestorozh-

denia na stadii padayushhei dobychi]. *Tekhnika i tekhnologija stroitelstva i remonta nefதியanykh i gazovykh skvazhin. Mashiny i oborudovanie nefதியanykh i gazovykh promyslov. Razrabotka i ekspluatatsia nefதியanykh mestorozhdeni* (Technique and technology of construction and repair of oil and gas wells. Machinery and equipment for oil and gas fields. Development and operation of oil fields). – Tyumen: TIU, 2015, pp. 169 – 172.

8. Ogai V. A. Economic and energy efficiency of the use of national MCU in the production of low-pressure Cenomanian gas [Ekonomicheskaja i energeticheskaja effektivnost primeneniya otechestvennykh MKU pri dobychi nizkonapornogo Senomanskogo gaza]. *Nauchnyj forum. Sibir– Scientific forum. Siberia*, 2015, issue 1, pp. 59 – 61.

9. Ermilov A. A. *Osnovy elektrosnabzhenia promyshlennykh predpriyati* (Fundamentals of power supply of industrial enterprises). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1983, 208 p.

10. Melnikov M. A. *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatij: uchebnoe posobie* (Power supply of industrial enterprises: Textbook). Tomsk: TPU Publ., 2000, 144 p.

11. Venikov V. A. Modeling of energy systems [Modelirovanie energeticheskikh sistem]. *Elektrichestvo – The journal of electricity*, 1971, no. 1, pp. 5 – 13.

12. Shabad M. A. *Raschety releinoi zashhity i avtomatiki raspredelitelnykh setei* (Calculations of relay protection and distribution networks automatization). St. Petersburg: PEIPK Publ., 2010, 350 p.

13. *Sistemy elektrosnabzhenia, seti, istochniki, preobrazovateli i priemniki elektricheskoi energii. Nominalnye naprjazhenia svyshe 1000 V, GOST 721-77* (Power supply systems, networks, sources, converters and receivers of electric energy. Rated voltages over 1000 V). Moscow, Standarty, 2002, 8 p.

14. Fedorov A. A., Kameneva V. V., Chernussky A. I., Stebunova E. D., Sidorov S. T. The need to use 20 kV voltage in distribution networks of enterprises and cities [Neobhodimost primeneniya naprjazhenia 20 kV v raspredelitelnykh setjah predpriyati i gorodov]. *Elektrichestvo – The journal of electricity*, 1980, no. 8, pp. 58 – 59.

15. Fedorov A. A., Kameneva V. V. *Osnovy elektrosnabzhenija promyshlennykh predpriyatij* (Fundamentals of electricity supply of industrial enterprises). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984, 472 p.

16. Melnikov N. A. *Elektricheskie seti i sistemy* (Electrical network and the system). Moscow: Energy Publ., 1975, 463 p.

17. Cherepanov V. V., Suvorova A. I. Linearizacija zatrat na elementy sistemy elektrosnabzhenia pri vybore nominalno-go naprjazhenia elektricheskoi seti [Linearization of costs for elements of electricity supply system while choosing the nominal voltage of the electric network]. *Nauchno-metodologicheskie problemy i novye tekhnologii obrazovaniia – Nauchno-metodologicheskie problemy i novye tekhnologii obrazovaniia*, 2012, no. 6 (48), pp. 53 – 55.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Богачков Иван Михайлович**

ООО «Газпром проектирование», Тюменский филиал.

Воровского ул., д. 2, г. Тюмень, 625019, Российская Федерация.

Главный специалист электротехнического отдела, сектор высоковольтного электрооборудования.

Тел.: +7 (912) 3851455.

E-mail: bogim83@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Bogachkov Ivan Mikhailovich**

ООО "Gazprom engineering", Tyumen branch.

Vorovsky str., 2, Tyumen, 625019, Russian Federation.

Chief specialist of the electrical Department, high-voltage electrical equipment sector.

Phone: +7 (912) 3851455.

E-mail: bogim83@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Богачков, И. М. Оптимизация системы внешнего электроснабжения путем выбора прогрессивного класса напряжения с учетом всего жизненного цикла газового месторождения / И. М. Богачков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 114 – 130.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Bogachkov I. M. External power supply system optimization by choosing a progressive voltage class considering the total life cycle of a gas field. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 114 – 130 (In Russian).

УДК 681.527

К. С. Петров, А. С. Окишев, В. В. Петров

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ОСЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ СТИГМАТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования точечного магнитоиндукционного датчика на основе математической модели, которая позволяет обеспечить повышение надежности работы автоматизированных систем для диагностирования технического состояния подвижного состава в процессе движения поезда путем улучшения точности исходной информации, т. е. моментов фиксации прохождения осей колесных пар над магнитоиндукционными датчиками. На первом этапе разработки стигматической математической модели системы определена аналитическая зависимость величины магнитного потока в магнитном сердечнике и выходного значения ЭДС от сопротивления воздушного зазора между датчиком и гребнем колеса. На втором этапе разработки математической модели найдена зависимость от времени магнитного сопротивления воздушного зазора между сердечником магнитоиндукционного датчика и гребнем колеса железнодорожного вагона, движущегося по прямолинейному рельсовому пути с постоянной скоростью. На основе применения цифровых технологий разработанная стигматическая модель позволяет оценить энергетические параметры магнитоиндукционных датчиков в зависимости от свойств современных магнитных материалов. Результаты моделирования показали, что величина МДС постоянного магнита определяет основные параметры магнитоиндукционных датчиков, поэтому применение современных магнитов на основе редкоземельных металлов позволяет устранить традиционный недостаток устаревших типов магнитоиндукционных датчиков, т. е. снизить их габариты и массу. Применение предложенной стигматической модели расширяет область возможных решений экстремальных задач для выбора и обоснования параметров магнитоиндукционных датчиков, помогает повысить точность систем диагностирования технического состояния вагонного парка и безопасность движения на железнодорожном транспорте.

**Ключевые слова:** моделирование, автоматизация, диагностирование, электромеханическая система, надежность, цифровые технологии, энергонезависимый магнитоиндукционный датчик, колесная пара, ось, вагон.

Konstantin S. Petrov, Andrey S. Okishev, Vladimir V. Petrov  
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## MATHEMATICAL MODEL MAGNETIC-INDUCTION SENSOR FOR ROLLING STOCK AXLES RAILWAY TRANSPORT BASED ON A STIGMATIC APPROACH

**Abstract.** The article presents the results of research of a point magneto-induction sensor based on a mathematical model, which allows you to increase the reliability of automated systems for diagnosing technical condition rolling stock in the course of train movement by improvement the accuracy of the initial information, that is, the moments of fixation passing of wheelset axles over magneto-induction sensors. At the first stage of developing a stigmatic mathematical model the analytical dependence of the value of the magnetic flux in the magnetic core and the output EMF value on resistance of the air gap between the sensor and the wheel crest. At the second stage of development of the mathematical model found time dependence of the magnetic resistance of the air gap between the core of the magneto-induction sensor and the comb wheels of a railway car moving along a straight track at a constant speed. On the basis of application the developed stigmatic model allows evaluating the energy parameters of magneto-induction sensors depending on the properties of modern magnetic materials. The simulation results showed that the MMF value is constant the magnet determines the main parameters of magneto-induction sensors, so the use of modern magnets based on rare earth they allow to eliminate the traditional disadvantage of outdated types of magneto-induction sensors, that is, to reduce their size and weight. The application of the proposed stigmatic model expands the scope of possible solutions to extreme problems for selection and justification parameters of magneto-induction sensors, helps to improve the accuracy of systems for diagnosing the technical condition of the car fleet and traffic safety on railway transport.

**Keywords:** modeling, automation, diagnostics, electromechanical system, reliability, digital technologies, energy-independent magnetic-induction sensor, wheeled pair, axle, wagon.

Информационные системы для диагностирования технического состояния подвижного состава получают широкое распространение на железнодорожном транспорте благодаря высокому уровню стандартизации и унификации оборудования как в Российской Федерации,

так и в соседних государствах, использующих соответствующие стандарты и совместимые устройства. Наиболее ответственными элементами таких информационных систем на железнодорожном транспорте являются точечные датчики прохождения осей подвижного состава, которые расположены вдоль рельсового пути. Основной особенностью стигматической модели системы является то, что в рамках этой модели рассматриваются только точечные датчики, габаритными размерами которых можно пренебречь по сравнению с радиусом колеса железнодорожного вагона.

В некоторых современных системах железнодорожной автоматики для счетчиков осей применяют два последовательно расположенных точечных датчика, размещенных в общем корпусе. Такая конструкция датчика позволяет повысить достоверность фиксации проследования каждой колесной пары, кроме того, имеется возможность определения направления движения подвижной единицы по очередности их срабатывания. Точечные путевые датчики для подсчета осей в процессе движения железнодорожного состава применяются практически во всех информационных системах, выпускаемых многими известными зарубежными фирмами, например, Siemens и General Electric [1].

Известны способы и устройства на основе оптических измерительных систем, такие как Устройство диагностирования геометрических параметров колесных пар подвижного состава [2]. Принцип работы такой системы основан на лазерном бесконтактном контроле геометрии движущихся трехмерных объектов с помощью триангуляционных датчиков положения, но лазерные технологии не способны надежно работать в неблагоприятных погодных условиях и при отсутствии внешнего источника электроснабжения. Например, известная Автоматизированная диагностическая система контроля параметров колесных пар вагонов «Комплекс» потребляет мощность от источника питания не менее 3 кВт [3]. Кроме того, подобные сложные системы для обеспечения надежной работы требуют наличия развитой инфраструктуры, мощного источника бесперебойного электроснабжения и дополнительных эксплуатационных затрат.

Имеются предложения и менее затратных решений этой актуальной задачи [4, 5], которые основаны на совместном применении цифровых технологий и напольного оборудования КТСМ (комплекс технических средств многофункциональный) [6]. Фиксацию моментов прохождения осей колесных пар подвижного состава над датчиками точечного типа предлагается использовать для оценки технического состояния подвижного состава железнодорожного транспорта на основе разработанной математической модели [7]. В такой автоматизированной системе для контроля ходовых частей вагонов определяются и хранятся в оперативной памяти значения углов перекоса и скорости всех колесных пар, прошедших над датчиками [8]. По заданному алгоритму система, используя сигналы от этих датчиков, осуществляет распознавание всех типов подвижных единиц состава и оценивает их кинематические параметры. По каналу связи на ближайший контрольный пункт передаются порядковые номера вагонов в поезде и номера колесных пар в вагоне, для которых зафиксировано превышение пороговых значений измеренных параметров ходовых частей. Причем применение магнитоиндукционных датчиков в составе системы позволяет реализовать энергетическую независимость напольного оборудования системы от внешних источников питания [9].

Для повышения качества диагностирования технического состояния вагонов в процессе движения поезда необходимо обеспечить в первую очередь разработку более точных датчиков прохождения осей колесных пар на основе цифровой обработки сигналов в реальном масштабе времени. Целью данной работы является моделирование формы выходного сигнала точечного магнитоиндукционного датчика осей колесных пар подвижных единиц, исследование его параметров для разработки более точных алгоритмов фиксации моментов прохождения осей колесных пар над датчиком на основе выбранного критерия.

В датчиках магнитоиндукционного типа выходной сигнал возникает на клеммах его обмотки благодаря эффекту электромагнитной индукции. Формирование биполярного импульса возникает при прохождении гребня колеса над датчиком. При приближении гребня к сер-

дечнику датчика величина магнитного потока в магнитной цепи датчика увеличивается и формируется импульс определенной полярности. В процессе удаления колеса от датчика величина магнитного потока в магнитной цепи уменьшается и возникает импульс противоположной полярности. Таким образом, амплитуда и длительность выходных сигналов датчика определяются скоростью движения колесной пары, то есть скоростью перераспределения магнитных потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  в магнитной цепи датчика (рисунок 1), а форма выходных импульсов зависит от конструктивных особенностей магнитоиндукционного датчика.

Постоянный магнит создает магнитодвижущую силу (МДС), которая порождает внешний замкнутый магнитный поток от полюсов ( $S-N$ ) магнита через магнитопровод из ферромагнитного материала, рельс и воздушный зазор между головкой рельса и сердечником магнитоиндукционного датчика. Пропорционально скорости изменения магнитного потока на выходных клеммах обмотки датчика наводится электродвижущая сила (ЭДС), зависимость которой от времени описывается выражением:

$$e(t) = -W \frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (1)$$

где  $e(t)$ , В, – электродвижущая сила на выходе датчика;  $W$  – число витков обмотки магнитоиндукционного датчика.

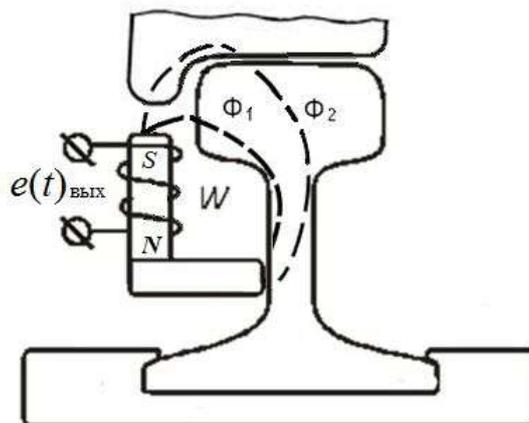


Рисунок 1 – Принцип работы точечного магнитоиндукционного путевого датчика

Магнитный поток, пересекающий витки катушки датчика, определяется так:

$$\Phi(t) = B \cdot S(t), \quad (2)$$

где  $B$  – величина индукции магнитного поля в магнитной цепи;  $S(t)$  – эффективная площадь контура, которую пересекает вектор магнитного потока, зависящий в данном случае от взаимного положения сердечника датчика и движущегося колеса вагона, т. е. в конечном счете от времени.

Эквивалентная схема разветвленной магнитной цепи для моделирования точечного путевого датчика магнитоиндукционного типа представлена на рисунке 2, где приняты следующие обозначения:

$e(t)$  – ЭДС на клеммах обмотки датчика;

$S-N$  – постоянный магнит, вокруг которого находится обмотка датчика  $W$ ;

$\Phi_1$  – магнитный поток, проходящий через воздушный зазор  $L_{в1}$ , основное направление вектора которого перпендикулярно рельсу при отсутствии гребня колеса над датчиком;

$\Phi_2$  – магнитный поток, проходящий через воздушный зазор  $L_{в2}$ , величина которого зависит от взаимного расположения гребня колеса и магнитного сердечника датчика, а основное направление вектора этого потока – вдоль рельса.

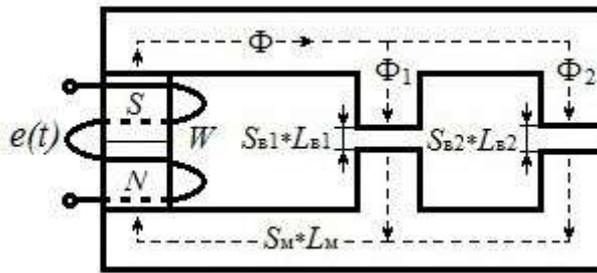


Рисунок 2 – Эквивалентная схема магнитной цепи датчика

Эквивалентные электрические схемы замещения магнитной цепи датчика изображены на рисунке 3. Причем эквивалентное сопротивление воздушного зазора в одноконтурной электрической схеме замещения этой магнитной цепи

$$R_B(t) = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}(t)}{R_{B1} + R_{B2}(t)}, \quad (3)$$

где  $R_{B1}$ , A/Bб, – магнитное сопротивление воздушного зазора при отсутствии гребня колеса над датчиком (максимальное значение – 30 мм), имеющее постоянное значение;

$R_{B2}(t)$ , A/Bб, – магнитное сопротивление воздушного зазора, величина которого зависит от расположения гребня колеса относительно магнитного сердечника датчика (минимальное значение – 10 мм), т. е. зависит от времени в процессе движения колеса над датчиком.

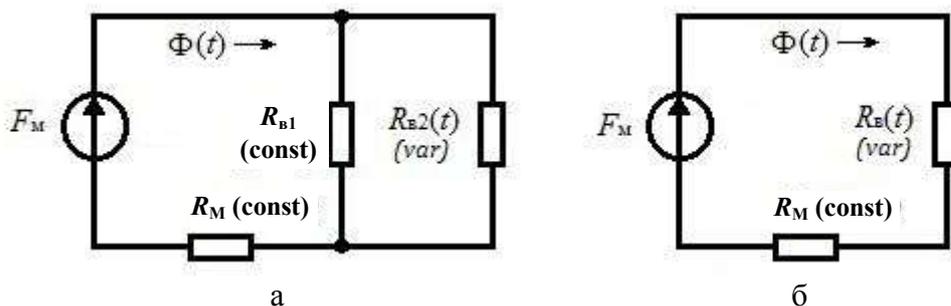


Рисунок 3 – Электрическая схема замещения магнитной цепи:  
а – двухконтурная схема замещения магнитной цепи; б – эквивалентная одноконтурная электрическая схема замещения этой же магнитной цепи

На первом этапе разработки стигматической математической модели системы необходимо найти аналитическую зависимость величины магнитного потока  $\Phi(t)$  от сопротивления воздушного зазора между датчиком и гребнем колеса. В замкнутом контуре магнитной системы без учета рассеивания алгебраическая сумма всех магнитодвижущих сил и магнитных напряжений равна нулю:

$$\sum_{p=1}^m \pm F_{mp} = \sum_{k=1}^n U_{mk}. \quad (4)$$

Уравнение (4) соответствует второму закону Кирхгофа для магнитной цепи, левая часть которого представляет алгебраическую сумму всех МДС, действующих в замкнутом контуре, а правая часть уравнения (4) – сумма падений магнитных напряжений на пассивных элементах в составе контура магнитной цепи.

Для представленной одноконтурной схемы замещения (рисунок 3, б) уравнение (4) можно конкретизировать:

$$F_M = \Phi(t) \cdot (R_M + R_B(t)), \quad (5)$$

здесь  $F_m$ , А, – МДС постоянного магнита датчика;  $R_m$  – суммарное сопротивление ферромагнитных участков магнитопровода датчика;  $R_b(t)$  – эквивалентное сопротивление воздушного зазора, значение которого зависит от скорости движения колеса и положения его гребня относительно датчика. Хотя магнитное сопротивление ферромагнитного участка магнитопровода существенно меньше сопротивления воздушного зазора ( $R_m \ll R_b$ ), им все-таки не следует пренебрегать при разработке математической модели. Учет этой постоянной составляющей системы так же, как и влияние  $R_{b1}$ , позволяет получить более адекватную модель. Кроме того, если принять, что величина воздушного зазора в реальных условиях работы датчика изменяется в пределах от 10 до 30 мм, то можно считать, что отсутствуют условия насыщения ферромагнитных элементов магнитной цепи, и математическую модель магнитной системы датчика можно считать практически линейной.

В данной системе единственным источником МДС является постоянный магнит, поэтому из уравнения (5) можно выразить магнитный поток

$$\Phi(t) = \frac{F_m}{R_m + R_b(t)}, \text{ т. е. } \Phi(t) = \frac{1}{\mu_c} \cdot \frac{B_c \cdot l_c}{R_m + R_b(t)}, \quad (6)$$

а сопротивления магнитному потоку в магнитопроводе и воздушном зазоре системы можно определить так:

$$R_m = \frac{L_m}{\mu_0 \cdot \mu_m \cdot S_m}; \quad R_b(t) = \frac{L_b(t)}{\mu_0 \cdot \mu_b \cdot S_b(t)}, \quad (7)$$

где  $\mu_c$  – относительная магнитная проницаемость магнитного материала сердечника;  $\mu_b = 1$  – относительная проницаемость воздуха в системе СИ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ , (В·с / А·м), – абсолютная магнитная проницаемость;  $B_c$ , Тл, – индукция постоянного магнита датчика;  $l_c$ , м, – длина магнитного сердечника датчика.

На втором этапе разработки математической модели необходимо найти зависимость магнитного сопротивления воздушного зазора между сердечником магнитоиндукционного датчика и гребнем колеса железнодорожного вагона от времени. Кинематическая схема системы для анализа взаимного расположения датчика и колеса, которое равномерно движется с заданной скоростью, изображена на рисунке 4.

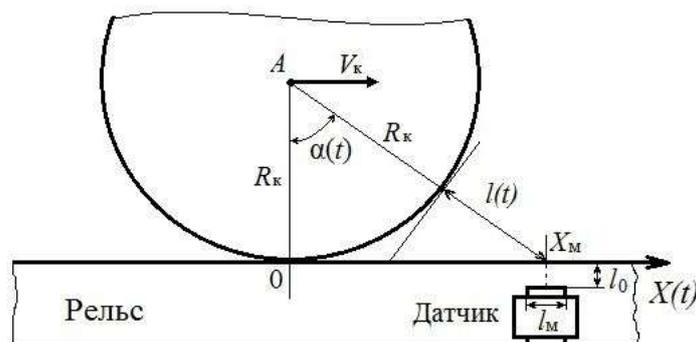


Рисунок 4 – Эквивалентная схема магнитной цепи датчика

На рисунке 4 приняты следующие обозначения:  $R_k$ , м, – радиус колеса;  $V_k$ , м/с, – постоянная скорость движения колеса;  $X(t)$ , м, – горизонтальная координата движения колеса (пройденный путь);  $X_m$ , м, – расстояние от точки касания колеса и рельса до центральной оси датчика;  $l_0$ , м, – минимальное значение воздушного зазора между сердечником датчика и гребнем колеса;  $l(t)$ , м, – минимальное расстояние от ближайшей точки колеса до точки пересечения оси датчика и головки рельса;  $l_m$ , м, – ширина магнитного сердечника датчика;  $h_m$ , м, – его толщина;  $\alpha(t)$  – угол между нормалью к рельсу и лучом, выходящим из точки А (ось колеса) по направлению к точке  $X_m$ , расположенной на пересечении верхней поверхности головки рельса и осью симметрии магнитного сердечника датчика.

Расстояние, которое проходит колесо вдоль рельсового пути, определяется скоростью движения колесной пары (т. е. координата  $X(t) = V_k \cdot t$ ). Рассмотрим процесс приближения (и удаления) точки касания колеса и рельса к датчику в пределах от 0 до  $2R_k$  относительно центра магнитного сердечника (точки  $X_m$ ). При этом кратчайшее расстояние от гребня колеса до точки  $X_m$  с учетом минимального значения эффективного воздушного зазора определим по выражению:

$$L_b(t) = l(t) + l_0 = \sqrt{R_k^2 + (X(t) - X_m)^2} - R_k + l_0 \text{ при } 0 < X(t) < 2R_k. \quad (8)$$

Угол  $\alpha(t)$  между нормалью к рельсу и прямой, определяющей кратчайшее расстояние от центра колеса до точки  $X_m$ , определим так:

$$\alpha(t) = \tan^{-1}\left(\frac{X(t) - X_m}{R_k}\right), \text{ например, при } X(t_m) = X_m, \alpha(t_m) = 0. \quad (9)$$

Эквивалентная площадь воздушного зазора между сердечником датчика и гребнем колеса, через который проходит магнитный поток, имеющий векторный характер, с учетом переменного угла наклона  $\alpha(t)$  определяется выражением:

$$S_b(t) = l_m \cdot h_m \cdot \cos[\alpha(t)], \quad (10)$$

где  $l_m$  – ширина магнитного сердечника датчика (вдоль рельсового пути);  $h_m$  – толщина поперечного сечения (поперек рельсового пути) магнитного сердечника датчика, через который проходит магнитный поток;  $\alpha(t)$  – острый угол между вектором магнитной индукции и нормалью к площади поперечного сечения магнитного сердечника датчика.

На третьем этапе разработки математической модели необходимо подставить выражения (8) и (10) в формулы (7) и (6), а затем в (1), в результате получим окончательную формулу для вычисления зависимости ЭДС на выходе точечного магнитоиндукционного датчика от времени. Разработанная модель позволяет описать процесс взаимодействия гребня колеса и магнитоиндукционного датчика и оценить влияние различных конструктивных параметров этой системы на точность формирования момента прохождения колеса над датчиком. Учитывая громоздкость окончательного аналитического выражения полученной математической модели, и для упрощения анализа результатов моделирования дальнейшие вычисления формы выходного сигнала магнитоиндукционного датчика произведем на основе численных методов. Для рассмотрения конкретного примера применения модели предварительно необходимо определить условия и исходные данные параметров объекта моделирования:

- радиус колеса  $R_k = 0,5$  м (т. е. значительно больше ширины магнитного сердечника датчика), что позволяет реализовать стигматическую (точечную) модель системы;
- отсутствует рассеивание магнитного поля и насыщение во всех элементах магнитной цепи датчика, что позволяет реализовать линейную модель магнитной системы;
- скорость движения колеса равномерная:  $V_k = 36$  км/ч (т. е. 10 м/с);
- тип материала постоянного магнита сердечника – «Альнико» ( $AlNiCo$ );
- число витков обмотки датчика  $W = 5000$ ;
- минимальный воздушный зазор между поверхностью магнитного сердечника датчика и гребнем колеса  $l_0 = 0,01$  м;
- максимальный воздушный зазор между магнитным сердечником датчика и головкой рельса  $l_p = 0,03$  м.

Габаритные размеры сердечника магнитоиндукционного датчика:

- длина  $l_c = 0,07$  м (по высоте рельса – вертикально);
- ширина  $l_M = 0,06$  м (вдоль рельса – горизонтально);
- толщина  $h_M = 0,05$  м (вдоль оси, перпендикулярной к рельсовому пути).

Полученный в результате вычислений в среде MatLab график зависимости ЭДС на выходе магнитоиндукционного датчика от времени, где точка касания колеса и рельса находится напротив оси магнитного сердечника в момент  $t = 0,05$  с, изображен на рисунке 5.

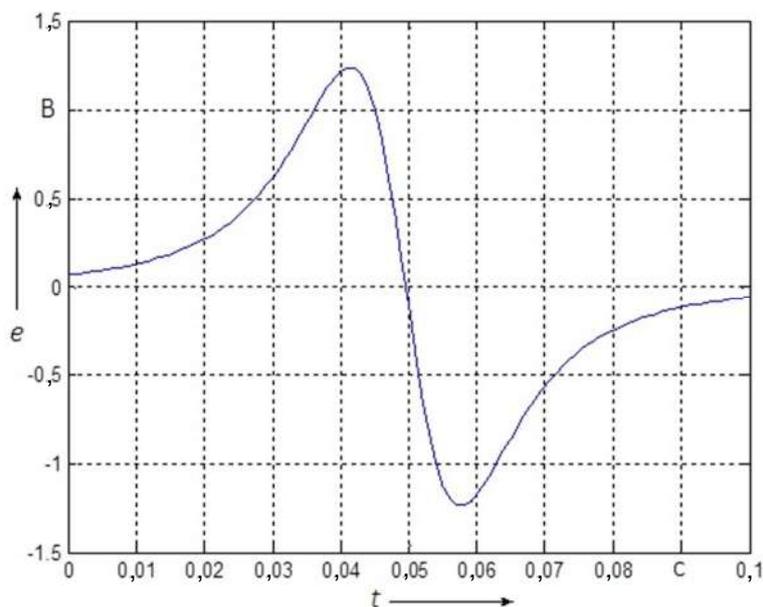


Рисунок 5 – Зависимость ЭДС на выходе датчика от времени при  $V_k = 10$  м/с,  $l_c = 0,07$  м,  $l_M = 0,06$  м,  $h_M = 0,05$  м, где  $A_{\max} = 1,24$  В,  $A_{\min} = -1,24$  В,  $T_{\min} = 0,042$  с,  $T_{\max} = 0,058$  с

Оценку качества сигнала на выходе датчика с точки зрения наилучших условий, обеспечивающих наибольшую точность определения момента прохождения колеса над датчиком, будем производить по критерию максимального значения коэффициента чувствительности, который можно определить так:

$$K_{\text{ч}} = \frac{\Delta A_{\text{имп}}}{\Delta T_{\text{имп}}} = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, \text{ например, для сигнала (см. рисунок 5) } K_{\text{ч}} = 135,6. \quad (11)$$

Коэффициент  $K_{\text{ч}}$  определяется как отношение размаха ЭДС знакопеременного выходного импульса к интервалу времени между его максимальным и минимальным значениями. Размах импульсного сигнала характеризует его энергетическую составляющую, т. е. чем он выше, тем выше помехоустойчивость системы, а скорость изменения сигнала определяет точность фиксации момента прохождения колеса над датчиком.

Применение разработанной стигматической модели для оценки влияния свойств материала магнитного сердечника на параметры выходного сигнала магнитоиндукционного датчика рассмотрим на простом примере сравнительного анализа использования двух типов сердечников: «Альнико» и «Неодим» [10]. Результаты расчетов на основе разработанной модели для анализа конкретных значений и формы сигнала на выходе магнитоиндукционного датчика при заданных параметрах магнитной системы представлены в таблице, которые практически совпадают с результатами экспериментальных исследований для материала типа «Альнико», описанными в источнике [11]. В таблице приведены оценки влияния этих параметров на точность определения момента прохождения колеса над датчиком согласно критерию (11).

Оценка влияния параметров сердечника магнитоиндукционного датчика на точность определения момента прохождения колеса над датчиком по выбранному критерию при постоянных значениях:  $V_k = 10$  м/с;  
 $l_c = 0,07$  м;  $h_m = 0,05$  м

Параметр датчика	Материал сердечника «Альнико»			Материал сердечника «Неодим»		
	$(AlNiCo) B_r = 0,7$ Тл, $H_c = 50$ кА/м			$(NdFeB) B_r = 1,1$ Тл, $H_c = 1000$ кА/м		
Ширина сердечника $l_m$ , м	0,015	0,03	0,06	0,015	0,03	0,06
Размах импульса $\Delta A_{имп}$ , В	0,5425	1,085	2,17	10,85	21,7	43,4
Длительность импульса $\Delta T_{имп}$ , с	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
Оценка сигнала $K_c$ , В/с	33,9	67,8	135,6	678,1	1356,2	2712,5

В результате проведенных исследований на основе разработанной стигматической математической модели можно сделать следующие выводы.

1. Величина МДС постоянного магнита определяет основные параметры магнитоиндукционных датчиков, поэтому применение современных магнитов на основе редкоземельных металлов позволяет устранить традиционный недостаток устаревших типов магнитоиндукционных датчиков, т. е. снизить их габариты и массу.

2. Увеличение ширины сердечника магнитоиндукционного датчика при использовании стигматического подхода повышает мощность выходного сигнала и помехоустойчивость системы в целом, но не влияет на его форму и длительность.

3. Применение предложенной стигматической модели позволяет расширить область решения экстремальных задач для выбора и обоснования параметров магнитоиндукционных датчиков и повысить надежность систем диагностирования технического состояния вагонного парка и безопасность движения на железнодорожном транспорте.

### Список литературы

1. Путьевые датчики для устройств железнодорожной автоматики / С. А. Щиголов, А. В. Кондакова [и др.]. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 11. – С. 1 – 3.

2. Патент № 2270120 Российская Федерация, МПК В 61 К 9/12. Устройство диагностирования геометрических параметров колесных пар подвижного состава : № 2004125216/11: заявлено 17.08.2004 : опубликовано 20.02.2006, Бюл. № 5 / Коробейников Ю. Г., Федоров Ф. В., Фомин В. М. [и др.]; патентообладатель Институт теоретической и прикладной механики СО РАН (ИТПМ СО РАН) (RU). Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН (КТИ НИ СО РАН) (RU). – Текст : непосредственный.

3. Автоматизированная диагностическая система контроля параметров колесных пар вагонов «Комплекс». – Текст : электронный. – URL : <http://www.sibai.ru/avtomatizirovannaya-diagnosticheskaya-sistema-kontrolya-parametrov-kolesnyix-par-vagonov-kompleks.html> (дата обращения: 03.04.2020).

4. Автоматизированная система сопровождения транзитных поездов / В. А. Кандаев, В. В. Петров [и др.]. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 1999. – № 7. – С. 11 – 13.

5. Петров, В. В. Интегральная оценка для диагностирования отклонений кинематических параметров вагонной тележки и колесных пар движущегося состава / В. В. Петров, К. С. Петров, С. А. Ступаков. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 113 – 123.

6. Микропроцессорный комплекс технических средств многофункциональный. – Текст : электронный. – URL : <https://nkass.ru/ktsm-kompleks-tehnicheskikh-sredstv-mnogofunktsionalnyi.html> (дата обращения: 03.04.2020).

7. Петров, В. В. Математическая модель для оценки влияния отклонений конструктивных параметров вагонной тележки от номинальных значений на ее кинематические свойства /

В. В. Петров, К. С. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 2 (38). – С. 55 – 65.

8. Патент № 192 859 Российская Федерация, МПК В 61 К 9/12. Устройство контроля технического состояния тележек подвижного состава : № 2019118942 : заявлено 17.06.2019 : опубликовано 03.10.2019, Бюл. № 28 / Кондратенко Е. В., Петров В. В., Петров К. С. – патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – Текст : непосредственный.

9. Петров, К. С. Энергонезависимая информационная система для контроля технического состояния тележек подвижного состава железнодорожного транспорта / К. С. Петров, Е. В. Кондратенко, В. В. Петров. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 257 – 263.

10. Современные виды постоянных магнитов, их параметры. – Текст : электронный – URL: <https://www.kakras.ru/doc/magnets-and-magnetic-fields.html> (дата обращения: 03.04.2020).

11. Петров, В. В. Энергетические аспекты магнитоиндукционных датчиков осей подвижного состава железнодорожного транспорта / В. В. Петров, А. С. Окишев, К. С. Петров. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 32 – 39.

## References

1. Shchigolev S. A., Kondakova A. V, Sobol' D. Ye. Track sensors for railway automation devices [Putevyye datchiki dlya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki]. *Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, Communication, Informatics Journal*, 2013, no. 11, pp. 1 – 3.

2. Korobeynikov Yu. G., Fedorov F. V., Fomin V. M., Trubacheev G. V., Chuguy YU. V., Plotnikov S. V. *Patent RU 2270120 C1*, 20.02.2006.

3. *Avtomatizirovannaya diagnosticheskaya sistema kontrolya parametrov kolesnykh par vagonov «KOMPLEKS»* (Automated diagnostic system for monitoring parameters of coforest pairs of wagons «COMPLEX»), Available at: <http://www.sibai.ru/avtomatizirovannaya-diagnosticheskaya-sistema-kontrolya-parametrov-kolesnykh-par-vagonov-kompleks.html> (accessed 03 April 2020).

4. Kandayev V. A., Petrov V. V., Chernenko V. M., Zakharov V. A. Automated tracking system for transit trains [Avtomatizirovannaya sistema soprovozhdeniya tranzitnykh poyezdov]. *Avtomatika, svyaz', informatika. – Automation, Communication, Informatics Journal*, 1999, no.7, pp. 11 – 13.

5. Petrov V. V., Petrov K. S., Stupakov S. A. Integral estimation for diagnosing deviations of kinematic parameters of bogie and wheel pairs of a moving train [Integral'naya otsenka dlya diagnostirovaniya otkloneniy kinematicallykh parametrov vagonnoy telezhki i kolesnykh par dvizhushchegosya sostava]. *Materialy IV vserossiyskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiyem «Tekhnologicheskoye obespecheniye remonta i povysheniye dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava»* (Materials of the IV All-Russian scientific and technical conference with international participation «Technological maintenance repair and improvement of the dynamic qualities of the railway rolling stock»). – Омск, 2017, pp. 113 – 123.

6. *Mikroprotsessornyy kompleks tekhnicheskikh sredstv mnogofunktsional'nyy* (Microprocessor complex of technical means multifunctional), Available at: <https://nkass.ru/ktsm-kompleks-tehnicheskikh-sredstv-mnogofunktsionalnyi.html> (accessed 03 April 2020).

7. Petrov V. V., Petrov K. S. A mathematical model for evaluating the influence of deviations in the design parameters of a railway carriage the influence of nominal values on its kinematic properties [Matematicheskaya model' dlya otsenki vliyaniya otkloneniy konstruktivnykh parametrov vagonnoy telezhki ot nominal'nykh znacheniy na yeye kinematicallykiye svoystva]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 2 (38), pp. 55 – 65.

8. Kondratenko Ye. V., Petrov V. V., Petrov K. S. *Patent RU 192 859 U1*, 03.10.2019.

9. Petrov K. S., Kondratenko Ye. V., Petrov V. V. Non-volatile information system for moni-

toring the technical condition of mobile carts the composition of railway transport [Energonezavisimaya informatsionnaya sistema dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya telezhek podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta]. *Materialy XIV nauchnoy konferentsii posvyashchennoy dnyu Rossiyskoy nauki «Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the XIV scientific conference dedicated to the day of Russian science «Innovative projects and technologies in education, industry and transport»). – Omsk, 2020, pp. 257 – 263.

10. *Sovremennyye vidy postoyannykh magnitov, i ikh parametry* (Modern types of permanent magnets and their parameters). Available at: <https://www.kakras.ru/doc/magnets-and-magnetic-fields.html> (accessed 03 April 2020).

11. Petrov V. V., Petrov K. S., Okishev A. S. Energy aspects of the magnetic induction sensors of the axles of rolling stock railway transport [Energeticheskiye aspekty magnitoinduksiionnykh datchikov osey podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta]. *Materialy III vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii mashinostroitel'nykh proizvodstv»* (Materials of the III All-Russian scientific and technical conference with international participation «Innovative projects and technologies machine-building industries»). – Omsk, 2019, pp. 32 – 39.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Петров Константин Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Студент ОмГУПСа.

Тел.: (3812) 31-04-09.

E-mail: [tef@omgups.ru](mailto:tef@omgups.ru)

### Окишев Андрей Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: [OkishevAS@omgups.ru](mailto:OkishevAS@omgups.ru)

### Петров Владимир Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: [PetrovVV@omgups.ru](mailto:PetrovVV@omgups.ru)

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Петров, К. С. Математическая модель магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе стигматического подхода / К. С. Петров, А. С. Окишев, В. В. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 131 – 140.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Petrov Konstantin Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, Russian Federation.

The student OSTU.

Phone: (3812) 31-04-09.

E-mail: [tef@omgups.ru](mailto:tef@omgups.ru)

### Okishev Andrey Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: [OkishevAS@omgups.ru](mailto:OkishevAS@omgups.ru)

### Petrov Vladimir Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Chief scientific worker, Associate Professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: [PetrovVV@omgups.ru](mailto:PetrovVV@omgups.ru)

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Petrov K. S., Okishev A. S., Petrov V. V. Mathematical model magnetic-induction sensor for rolling stock axles railway transport based on a stigmatic approach. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 131 – 140 (In Russian).

УДК 621.396.49

Е. Д. Бычков, Д. С. Лузан

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ КОГНИТИВНЫХ КАРТ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

**Аннотация.** Микроминиатюризация элементов систем связи способствовала развитию Интернета вещей, что привело к расширению разнообразного сервиса и для служб железной дороги. Одним из составных частей Интернета вещей является беспроводная сенсорная сеть (БСС). Особенностью функционирования БСС является динамично изменяющаяся информационная сетевая обстановка, что усложняет принятие оперативно достоверных управленческих решений в системе мониторинга состояний объектов железнодорожного транспорта на основе их оценок. Одним из направлений принятия достоверного решения в сложной сетевой обстановке на БСС является использование в узлах управления БСС когнитивных карт. В связи с этим в статье рассматриваются различные модели когнитивных карт для оценки состояний сетевых элементов и сетевых процессов, которые в том числе могут быть использованы для служб железнодорожного транспорта.

**Ключевые слова:** когнитивная карта, когнитивная нечеткая матрица, композиция матриц, агрегирование, железнодорожная радиосвязь.

Evgeniy D. Bychkov, Dmitriy S. Luzan

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## USING MODELS OF COGNITIVE MAPS FOR WIRELESS SENSOR NETWORK MONITORING

**Abstract.** Microminiaturization elements of communication systems contributed to development Internet of Things, which led the expansion of various railway transport services. One of the Internet of Things component's is the wireless sensor network (WSN). Feature of WSN is a dynamically changing spatial and information network environment. It complicates the adoption of promptly reliable management decisions based on assessments of the states of network elements. One of the directions of making a reliable decision in a complex network environment on the WSN is using cognitive maps in the WSN control nodes. In this article discusses various models of cognitive maps for assessing the states of network elements and network processes, which can also be used for railway transport services.

**Keywords:** cognitive map, cognitive fuzzy matrix, matrix composition, aggregation, railway radio communications.

Обеспечение безопасного и качественного функционирования современного железнодорожного транспорта является составной задачей телекоммуникационных сетей. Одним из перспективных направлений здесь является использование беспроводных сенсорных сетей в системе мониторинга состояний элементов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Особенностью работы БСС является нелицензионное (вторичное) использование радиочастотного спектра в моменты периодов времени отсутствия их загруженности основными лицензионными источниками сообщений. Дело в том, что частотный диапазон всего спектра практически полностью распределен и лицензирован различными службами, но используется ими недостаточно эффективно. Поэтому возникает проблема, как эффективно использовать незагруженные промежутки частотного спектра для передачи нагрузки (информации) БСС без ущерба для качества связи.

Решения данной задачи нашлись в концепции когнитивной технологии, заключающейся в использовании когнитивной радиостанции в сети беспроводной связи [1, 2]. Такая радиостанция для эффективного распределения радиочастотного спектра должна самостоятельно адаптивно изменять некоторые характеристики передачи сигналов: частота; мощность в соответствии с условиями окружающей среды; методы кодирования; методы модуляции и др. С учетом изложенного необходимо разрабатывать алгоритмы адаптации (самоорганизации) и принятия решения в устройствах управления в условиях отсутствия полной информации в

постоянно меняющейся сетевой обстановке. Одним из методов эффективного управления является разработка моделей когнитивных карт (КК).

**Четкие модели когнитивных карт.** Под *когнитивной картой* понимается взвешенный ориентированный граф  $Q = (V, G)$ , где  $V = \{1, 2, \dots, j, \dots, v\}$  – множество вершин, которые представляет собой совокупность концептов (*факторов*), описывающих состояние моделируемой *ситуации* или исследуемой системы.

Значение  $j$ -го концепта (фактора)  $v_j$  является числом действительным. Причинно-следственные связи между концептами (факторами) и их влияние друг на друга отражают дуги  $G \subseteq V \times V$ . Модель когнитивной карты описывается квадратной матрицей  $A = \|a_{kl}\|_{m \times m}$ , элементы которой  $a_{kl} \in [-1, 1]$  отражают влияние  $l$ -го фактора на  $k$ -й фактор. «Направление» влияния показывает знак элемента  $a_{kl}$ , а его абсолютная величина обозначает «силу влияния». Нулевое значение  $a_{kl}$  соответствует отсутствию влияния.

В когнитивном моделировании для оценки реакций принятия решений и изменения внешних воздействий на концепты используется теория импульсных процессов. Под *импульсом* понимается разностная модель вида

$$q_j(t) = v_j(t) - v_j(t-1), \quad t > 0. \quad (1)$$

Здесь  $v_j(t-1)$  – значение вершины  $v_j$  в предыдущий момент времени;  $v_j(t)$  – значение вершины  $v_j$  в настоящий момент времени под влиянием подмножества концептов.

Изменения управляемых концептов чаще всего служат импульсами для когнитивной модели. Принятие других значений вершины  $v_j$  когнитивного графа (КГ) для импульсного динамического процесса определяется выражением [3]:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + q_i(t+1) + \sum_{j=1}^n w_{ji} \cdot q_j(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $q_i(t+1)$  – внешний импульс в вершину  $v_i$  в момент  $t+1$ ;

$w_{ji}$  – вес влияния концепта  $j$ -го на  $i$ -й концепт,  $w_{ji} \in [-1, 1]$ ;

$\sum_{j=1}^n w_{ji} \cdot q_j(t)$  – суммарное значение внутренних импульсов на вершину  $v_i$  из ее смежных

вершин  $j$  КГ;

$n$  – количество вершин в КГ.

Следует отметить, что Ф. Робертсом [4] были предложены динамические модели КК видов:

$$K_j(t+1) = \sum_{i=1}^n w_{ij} K_i(t); \quad \Delta K_j(t+1) = \sum_{i=1}^n w_{ij} \Delta K_i(t), \quad (3)$$

где  $w_{ij}$  – вес влияния концептов  $i$ -го на  $j$ -й;

$w_{ij} \in [-1, 1]$ ;  $n$  – число концептов  $i$ , непосредственно влияющих на  $j$ -й концепт;

$K_i(t)$  и  $\Delta K_i(t)$  – значения и приращения величин  $i$ -го концепта в момент времени  $t$ ;

$K_j(t+1)$  и  $\Delta K_j(t+1)$  – значения и приращения величин  $j$ -го концепта в момент времени  $(t+1)$ .

При анализе когнитивных карт в процессе принятия различных задач управления импульсные воздействия могут разделяться на простые и комплексные. Простые воздействия – начальный импульс задается только для одного концепта, комплексные воздействия – начальные импульсы задаются для нескольких концептов.

**Нечеткие модели когнитивных карт.** Под нечеткой *когнитивной картой* также понимается взвешенный ориентированный граф  $Q = (K, G)$ , где  $K = \{1, 2, \dots, k\}$  – множество

вершин, которые представляет собой совокупность концептов (*факторов*), описывающих состояние моделируемой *ситуации* или исследуемой системы.

Значения концептов  $K_i$ ,  $i = 1, \dots, k$ , представляются нечеткими множествами  $\tilde{K}_i$  в виде совокупности упорядоченных пар:

$$\tilde{K}_i = \{(\mu_{\tilde{K}_i}(x_i) / x_i)\}, \quad (4)$$

где  $\mu_{\tilde{K}_i}(x_i)$  – степень принадлежности  $x_i$  к нечеткому множеству  $\tilde{K}_i$ ,  $\mu_{\tilde{K}_i}(x_i): X_i \rightarrow [0, 1]$ ;

$X_i$  – четкое универсальное базовое множество.

Значения концептов  $K_j$ ,  $j = 1, \dots, k$ , также представляются нечеткими множествами  $\tilde{K}_j$  в виде совокупности упорядоченных пар:

$$\tilde{K}_j = \{(\mu_{\tilde{K}_j}(x_j) / x_j)\}, \quad (5)$$

где  $\mu_{\tilde{K}_j}(x_j)$  – степень принадлежности,  $x_j$  к нечеткому множеству  $\tilde{K}_j$ ,  $\mu_{\tilde{K}_j}(x_j): X_j \rightarrow [0, 1]$ ;

$X_j$  – также четкое универсальное базовое множество.

Множество дуг  $G \subseteq K \times K$  отражает причинно-следственные связи между концептами (факторами) и их влияние друг на друга. Отношения влияния между концептами  $\tilde{K}_i$  и  $\tilde{K}_j$ ,  $i = 1, \dots, k$ ,  $j = 1, \dots, k$ , задаются нечеткими бинарными отношениями  $\tilde{R}_{ij}$  между нечеткими множествами  $\tilde{K}_i$  и  $\tilde{K}_j$ ,  $\tilde{R}_{ij} = (x_i, x_j) \rightarrow [0, 1]$ ,  $x_i \in [0, 1]$ ,  $x_j \in [0, 1]$ . То есть  $\tilde{R}_{ij}$  устанавливает степень принадлежности  $\mu_{\tilde{R}_{ij}}(x_i, x_j) \in [0, 1]$  для каждой пары элементов  $(x_i, x_j) \in X_i \times X_j$  соответственно.

Совокупность же отношений влияния между всеми концептами нечеткой когнитивной карты задается матрицей нечетких бинарных отношений:

$$\tilde{M} = \begin{pmatrix} \tilde{R}_{11} & \tilde{R}_{12} & \dots & \tilde{R}_{1k} \\ \tilde{R}_{21} & \tilde{R}_{22} & \dots & \tilde{R}_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{R}_{k1} & \tilde{R}_{k2} & \dots & \tilde{R}_{kk} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Приведенная матрица (6) также называется нечеткой реляционной когнитивной картой (НРКК).

Механизм распространения влияний между концептами когнитивной карты во времени определяется моделями динамики этой когнитивной карты.

При моделировании НРКК, как отмечается в статье [5], временная задержка распространения импульса влияния принимается одинаковой для всех вершин КК. Данная задержка определяется интервалом времени  $\Delta t = (t_{i+1} - t_i)$ . При непосредственном взаимодействии вершин КК друг на друга за один такт системного времени происходят передача этого влияния по дуге графа когнитивной карты от концепта-источника к концепту-приемнику и агрегирование отдельных влияний от концептов-источников к концепту-приемнику.

В настоящее время существуют различные динамические модели нечетких реляционных когнитивных карт [6 – 8].

В модели НРКК Kosko [6] используется нелинейная функция  $f$ , ограничивающая результат в диапазоне  $[0, 1]$  или  $[-1, 1]$ :

$$\tilde{K}_j(t+1) = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij} \tilde{K}_i(t)\right), \quad (7)$$

где  $\tilde{K}_i(t)$  – нечеткое множество  $i$ -го концепта (фактора) в момент времени  $t$ .

В качестве функции или шкалы  $f(\cdot)$ , отображающей диапазон значений концептов  $[0, 1]$ , наиболее часто используется сигмоидальная функция:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}}, \lambda > 1, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – крутизна функции.

Аргумент  $x$  функции определяется выражением:

$$x_i \equiv \left( \sum_{i=1}^n w_{ij} \tilde{K}_i(t) \right), \quad (9)$$

где  $\tilde{K}_i(t)$  – нечеткое множество конкретного концепта.

Однако расчет формулы (8) неудобен, если в (9) присутствует выражение нечеткого множества конкретного концепта. Поэтому здесь предлагается привести нечеткое множество концепта  $\tilde{K}_i(t)$  к четкому числу через операции дефаззификации (defuzzification) через следующие алгоритмы.

1. Средний центр нечеткого множества (centre average defuzzification).

$$y_i^* = \frac{\sum_{r=1}^n \alpha_r \max_y \mu_{K_i}(y_r)}{\sum_{r=1}^n \alpha_r}, \quad (10)$$

где  $\alpha_r$  – уровень нечеткого множества,  $\alpha_r \in [0, 1]$ ;

$\mu_{K_i}(y_r)$  – степень функции принадлежности нечеткого множества  $\tilde{K}_i(t)$ ,  $\mu_{K_i}(y_r) \in [0, 1]$ .

2. Центр тяжести функции принадлежности  $\mu_{K_i}(y)$

$$y_i^* = \frac{\sum_{r=1}^{Y_{\max}} y_r \mu_{K_i}(y_r)}{\sum_{r=1}^{Y_{\max}} \mu_{K_i}(y_r)}, \quad (11)$$

где  $Y_{\max}$  – число элементов  $y_r$  в нечетком множестве  $\tilde{K}_i(t)$ .

С учетом выражений (10) или (11) вычисление аргумента  $x$  функции (6) принимает вид:

$$x_i \equiv \left( \sum_{i=1}^n w_{ij} y_i^*(t) \right). \quad (12)$$

В работе Силова В. Б. [7] представлено, что передачу влияний между смежными концептами когнитивной карты осуществляется на основе операций  $s$ -норм и  $t$ -норм:

$$\tilde{K}_j(t+1) = S_{i=1}^n (w_{ij} T \tilde{K}_i(t)), \quad (13)$$

где  $S$  –  $s$ -норма;

$T$  –  $t$ -норма.

В работах [8, 9] предложена и исследована динамическая модель для НРКК:

$$\tilde{K}_j(t+1) = \tilde{K}_j(t) \oplus \left( \bigoplus_{i=1}^n ((\tilde{K}_i(t) - \tilde{K}_i(t-1)) \circ \tilde{R}_{ij}) \right), \quad (14)$$

где  $\tilde{K}_j(t+1)$ ,  $\tilde{K}_j(t)$ ,  $\tilde{K}_i(t)$ ,  $\tilde{K}_i(t-1)$  – нечетко-множественные значения концептов, зависящие от моментов времени;

$\tilde{R}_{ij}$  – нечетко-множественное отношение между концептами;

$\circ$  – операция нечеткой композиции;

$\bigoplus_{i=1}^n$  – операция агрегирования нечетких влияний;

$\oplus$  – операция нечеткого агрегирования совокупных влияний.

Выражение (14) является динамической моделью для НРКК дискретной системы с обратными связями. Здесь обратные связи представляются «двухуровневыми». Это связано с двумя факторами: 1) значение концепта в момент времени  $(t + 1)$  зависит от его собственного значения в момент  $t$  и, следовательно, приводит к итерационным вычислениям при моделировании НРКК; 2) возможное появление новых обратных связей, что может быть обусловлено распространением влияния по НРКК.

В данной модели динамики НРКК в качестве операции агрегирования используется промежуточная дефаззификация (приведение к четкости) и операции сложения или вычитания нечетких значений с последующим ограничением результата. Однако промежуточная дефаззификация в этих моделях приводит к потере информации.

Рассмотрим другой подход анализа сетевой обстановки с использованием когнитивных карт. Пусть задано множество концептов  $C = \{c_i\}_i^N$  некоторой предметной области исследований. Также известно множество параметров этой области  $\Pi = \{\pi_k\}_k^K$ . Приведенные множества  $C$  и  $\Pi$  являются базовыми. Будем считать, что полная информация о концептах предметной области исследований и его параметрах отсутствует. Необходимо определить в предметной области исследований наиболее влиятельные концепты  $c_i \in C$  в моменты времени  $(t + 1)$  при условии изменения значимости параметров. Для решения этой задачи воспользуемся теорией нечетких множеств.

Для нашей задачи нечеткое апостериорное множество наиболее влиятельных концептов определяется выражением:

$$\tilde{B}(t+1) = \tilde{B}(t) \oplus T\tilde{R}_k = \tilde{B}(t) \oplus T[\tilde{M}_{\Pi}^C(t) \circ \tilde{M}_k^{\Pi}(t)], \quad (15)$$

где  $\tilde{B}(t)$  – нечеткое множество наиболее влиятельных концептов в момент времени  $t$ ;

$\oplus$  – оператор агрегирования;

$T$  – оператор t-нормы;

$\circ$  – знак композиции нечетких матриц;

$\tilde{R}_k$  – обобщенная нечеткая матрица, полученная в результате композиции нечетких матриц  $\tilde{M}_{\Pi}^C(t)$  и  $\tilde{M}_k^{\Pi}(t)$ .

Матрица  $\tilde{M}_{\Pi}^C(t)$  представляет собой обобщенную нечеткую матрицу концептов  $c_i \in C$  по условию параметров  $\pi_k \in \Pi$ , которая имеет вид:

$$\tilde{M}_{\Pi}^C = \begin{matrix} & c_1 & c_2 & c_3 & \dots & c_i \\ \pi_1 & \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \dots & \alpha_{1i} \\ \pi_2 & \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \dots & \alpha_{2i} \\ \pi_3 & \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \dots & \alpha_{3i} \\ & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \pi_k & \alpha_{k1} & \alpha_{k2} & \alpha_{k3} & \dots & \alpha_{ki} \end{matrix} \cdot \quad (16)$$

Каждая строка матрицы (16) есть нечеткое множество  $\tilde{C}_{ki} = \langle \text{Значимость концептов по условию параметра } \pi_k \rangle$  с функцией принадлежности  $\mu(c_i, \pi_k) \in [0, 1]$ ,  $\alpha_{ik} \in [0, 1]$ . Каждая строка данной матрицы является сжатием рефлексивных нечетких матриц предпочтения типа:

$$\tilde{M}_{\pi_1}^C = c_1 \begin{vmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & \dots & c_j \\ 1 & \alpha_{12}^{(1)} & \alpha_{13}^{(1)} & \dots & \alpha_{1j}^{(1)} \\ \alpha_{21}^{(1)} & 1 & \alpha_{23}^{(1)} & \dots & \alpha_{2j}^{(1)} \\ \alpha_{31}^{(1)} & \alpha_{32}^{(1)} & 1 & \dots & \alpha_{3j}^{(1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{i1}^{(1)} & \alpha_{i2}^{(1)} & \alpha_{i3}^{(1)} & \dots & 1 \end{vmatrix}, \dots, \tilde{M}_{\pi_k}^C = c_3 \begin{vmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & \dots & c_j \\ 1 & \alpha_{12}^{(k)} & \alpha_{13}^{(k)} & \dots & \alpha_{1j}^{(k)} \\ \alpha_{21}^{(k)} & 1 & \alpha_{23}^{(k)} & \dots & \alpha_{2j}^{(k)} \\ \alpha_{31}^{(k)} & \alpha_{32}^{(k)} & 1 & \dots & \alpha_{3j}^{(k)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{i1}^{(k)} & \alpha_{i2}^{(k)} & \alpha_{i3}^{(k)} & \dots & 1 \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Матрицы (17) по условию параметра  $\pi_k$  сжимаются в матрицу-строку по алгоритму, приведенному в работе [10]. Матрица  $\tilde{M}_k^\Pi(t)$  представляет собой рефлексивную матрицу параметров  $\pi_k$ , которая имеет вид:

$$\tilde{M}_k^\Pi = \begin{vmatrix} \pi_1 & \pi_2 & \pi_3 & \dots & \pi_j \\ \pi_1 & 1 & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1j} \\ \pi_2 & b_{21} & 1 & b_{23} & \dots & b_{2j} \\ \pi_3 & b_{31} & b_{32} & 1 & \dots & b_{3j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \pi_q & b_{q1} & b_{q2} & b_{q3} & \dots & 1 \end{vmatrix}, \quad (18)$$

где  $\pi_k$  – параметр предметной области исследования;  
 $b_{ji}$  – числовое значение функции принадлежности:

$$\mu_R(\pi_k, \pi_j) = \langle \pi_k \text{ не хуже } \pi_j \rangle, k, j = \overline{1, K}, b_{kj} \in [0, 1]. \quad (19)$$

Методы построения и анализа моделей принятия решений в когнитивных картах на основе нечеткой логики не исключают и вероятностных подходов при оценке состояний сетевых концептов (факторов) [10].

В статье рассмотрены детерминированные и нечеткие модели оценки состояний БСС, использование которых зависит от сложности сети и наличия априорной информации о сетевой обстановке. Предложены новая модель построения когнитивных карт на основе системы нечетких матриц предпочтения и модифицированный алгоритм оценки концептов в когнитивной модели Коско.

Предложенная модель может быть использована в выборе маршрута передачи информации по беспроводной сети, чтобы корректно и оптимально выбрать маршрут передачи информации с использованием соответствующих методов модуляции в сложной электромагнитной ситуационной обстановке. Однако это требует дополнительных исследований.

### Список литературы

1. Дворкович, А. Умное радио / А. Дворкович, О. Слюсар. – Текст : непосредственный // Радиочастотный спектр. – 2009. – № 4. – С. 26 – 29.
2. Cognitive Radio Platforms: Wireless Open-Access Research Platform for Networks. – Текст : электронный. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/bc4a/c5ff28941832af21bf531694d49c4adf155c.pdf> (дата обращения: 18.05.2020).

3. Робертс, Ф. С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Пер. с англ. А. М. Раппопорта, С. И. Травкина; под ред. А. И. Теймана. – Москва : Наука, 1986. – 496 с. – Текст : непосредственный.
4. Roberts F. S. Discrete mathematical models with applications to social, biological and environmental problems. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs*, 1976, 560 p.
5. Федулов, А. С. Модели системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт / А. С. Федулов, В. В. Борисов. – Текст : непосредственный // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 1. – С. 66 – 80.
6. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps, *International Journal of Man-Machine Studies*, 1986, vol. 24, pp. 65 – 75.
7. Силов, В. Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке в политике, макроэкономике, социологии, менеджменте, медицине, экологии / В. Б. Силов. – Москва : ИНПРО – РЕС, 1995. – 228 с. – Текст : непосредственный.
8. Борисов, В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2012. – 284 с. – Текст : непосредственный.
9. Федулов, А. С. Нечеткие реляционные когнитивные карты / А. С. Федулов. – Текст : непосредственный // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2005. – № 1. – С. 120 – 133.
10. Бычков, Е. Д. Математические модели управления состояниями цифровой телекоммуникационной сети с использованием теории нечетких множеств / Е. Д. Бычков. – Омск : ОмГТУ, 2010. – 236 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Dvorkovich A., Sljusar O. Cognitive radio [Umnoe radio]. *Radiochastotnyj spektr*, 2009, no. 4, pp. 26 – 29.
2. Cognitive Radio Platforms: Wireless Open-Access Research Platform for Networks, Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/bc4a/c5ff28941832af21bf531694d49c4adf155c.pdf> (accessed 18 May 2019).
3. Roberts F. S. *Diskretnye matematicheskie modeli s prilozhenijami k social'nym, biologicheskim i jekologicheskim zadacham* (Discrete mathematical models with applications to social, biological and environmental problems ). Moscow: Nauka Publ., 1986, 496 p.
4. Roberts F. S. Discrete mathematical models with applications to social, biological and environmental problems. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs*, 1976, 560 p.
5. Fedulov A. S., Borisov V. V. Models of system dynamics based on fuzzy relational cognitive maps [Modeli sistemnoj dinamiki na osnove nechetkih reljacionnyh kognitivnyh kart]. *Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti – Management, communication and security systems*, 2016, no. 1, pp. 66 – 80.
6. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps, *International Journal of Man-Machine Studies*, 1986, vol. 24, pp. 65 – 75.
7. Silov V. B. *Prinjatie strategicheskikh reshenij v nechjotkoj obstanovke v politike, makroekonomike, sociologii, menedzhmente, medicine, jekologii* (Making strategic decisions in a fuzzy situation in politics, macroeconomics, sociology, management, medicine, ecology). Moscow: INPRO – RES Publ., 1995, 228 p.
8. Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S. *Nechetkie modeli i seti* (Fuzzy models and networks). Moscow: Gorjachaja linija-Telekom Publ., 2012, 284 p.
9. Fedulov A. S. Fuzzy relational cognitive maps [Nechetkie reljacionnye kognitivnye karty]. *Izvestija RAN. Teorija i sistemy upravlenija – Izvestiya RAS. Theory and control systems*, 2005, no. 1, pp. 120 – 133.
10. Bychkov E. D. *Matematicheskie modeli upravlenija sostojanijami cifrovoj telekommunikacionnoj seti s ispol'zovaniem teorii nechetkih mnozhestv* (Mathematical models of digital

telecommunication network state management using the theory of fuzzy sets). Omsk: OmSTU Publ., 2010, 236 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Бычков Евгений Дмитриевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: bychkov\_ev@mail.ru

### Лузан Дмитрий Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Бычков, Е. Д. Использование моделей когнитивных карт для оценки состояний беспроводной сенсорной сети / Е. Д. Бычков, Д. С. Лузан. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 141 – 148.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Bychkov Evgeniy Dmitrievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Dr. Sci. Tech., associate professor, professor at the department «Telecommunication, radio engineering systems and networks», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: bychkov\_ev@mail.ru

### Luzan Dmitriy Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation

Post-graduate student.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Bychkov E. D., Luzan D. S. Using models of cognitive maps for wireless sensor network monitoring. Journal of Transsib Railway Studies, 2020, no. 2 (42), pp. 141 – 148 (In Russian).

## Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования;
- электрические станции и электроэнергетические системы;
- энергетические системы и комплексы;
- автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru).

### Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

#### В редакцию журнала представляются:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (не более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

#### Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

#### Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подписи к рисункам и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100-2018;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. *Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

*Научное издание*

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 2 (42) 2020

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 03 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.  
Компьютерная верстка – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;  
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru)

Подписано в печать 30.10.2020.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 30.10.2020.

