

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 2(34)

2018

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. Бокарев Сергей Александрович – проректор по научной работе СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
7. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. Демин Юрий Васильевич – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТ, д.т.н., профессор (Новосибирск).
10. Зыкина Анна Владимировна – зав. кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГТУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. Каргапольцев Сергей Константинович – первый проректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
12. Косарев Александр Борисович – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
13. Лю Цзянькунь – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
14. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
15. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, д.т.н., доцент (Омск).
16. Сидоров Олег Алексеевич – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
17. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
18. Файзибаев Шерзод Сабирович – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТашИИТА, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
19. 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. Cheremisin Vasily Titovich – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
5. Bokarev Sergey Alexandrovich – vice-rector for research of SSTU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
8. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Demin Yuri Vasilyevich – professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
10. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. Kargapoltcev Sergey Konstantinovich – vice-rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
12. Kosarev Alexander Borisovich – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
13. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
14. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
15. Paramonov Alexander Mikhailovich – professor of the department «Heat-power» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk).
16. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
18. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons» of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
19. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

- Анисимов А. С., Чернышков И. В. Оперативная оценка расхода топлива тепловозами на основе методов математического моделирования режимов работы энергетических установок 2
- Гельвер И. С., Гельвер С. А., Дроздова И. А. Анализ текущего и предельного напряженно-деформированного состояний подвижного состава железных дорог при упруго-пластическом поведении материала 13
- Илесалиев Д. И. Увеличение массы партии грузов за счёт рационального выбора транспортной тары 21
- Кольцов Ю. А., Скребков А. В. Оценка эксплуатационных показателей безотказности оборудования электровозов 29
- Клюка В. П., Лексустов И. С., Рауба А. А. Исследование ключевых параметров лазерного триангуляционного дальномера для использования в целях технического контроля деталей вагона 36

Транспортная энергетика

- Аржаников Б. А., Баева И. А. Влияние организации движения соединенных грузовых поездов на повышение пропускной способности участков, электрифицированных на постоянном токе 50
- Доманов К. И., Незевак В. Л., Шатохин А. П. Исследование режимов работы системы тягового электроснабжения в целях установки накопителя электрической энергии 65
- Комяков А. А., Пономарев А. В., Эрбес В. В. Разработка технологии повышения энергетического эффективности производственных процессов в сервисных локомотивных депо 76
- Менакер К. В., Яковлев Д. А., Востриков М. В. Повышение эффективности работы систем электропитания нетяговых потребителей 85
- Никифоров М. М., Вильгельм А. С., Еркебаев А. Ж. Влияние технической и участковой скорости на эффективность использования энергии рекуперации 94
- Саркенов С. С. Оценка энергоэффективности графиков движения поездов на основе моделирования методами нелинейной регрессии и нейронных сетей 106
- Третьяков Е. А., Галкин А. Г., Сидорова Е. А. Перспективные методы управления транспортом и распределением электроэнергии в электрических сетях железных дорог 113

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Копытов Е. Ю., Степаненко Н. И., Любченко А. А., Богданов А. А. Подход к автоматизированной оценке качества технического обслуживания в региональном центре связи 125

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

- Арипов Н. М., Камалетдинов Ш. Ш. Моделирование процессов композитного документооборота в грузовых и коммерческих работах железных дорог Республики Узбекистан на основе сетевого планирования и управления 140
- Соколов М. М. Построение условного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты 150

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

А. С. Анисимов, И. В. Чернышков

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

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА РАСХОДА ТОПЛИВА ТЕПЛОВОЗАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Аннотация. В статье рассматривается возможность определения удельного расхода топлива тепловозами в эксплуатации с использованием косвенных расчетных методов, основанных на использовании данных локомотивных бортовых систем и дополнения их математическими моделями рабочего цикла и модели для определения состава отработавших газов дизельного двигателя. Приводятся основные уравнения и алгоритмы предлагаемых для реализации такого метода математических моделей и результаты их использования, представлены результаты сравнения результатов моделирования и опытных данных об удельном расходе топлива тепловозов ТЭМ18ДМ. Предложен возможный алгоритм совместного использования данных математических моделей, сделаны выводы о возможном развитии такого способа для определения энергоэффективности тепловозов без вывода их из эксплуатации.

Ключевые слова: математическая модель, состав отработавших газов, оценка расхода топлива, тепловоз, локомотивные бортовые системы.

Alexander S. Anisimov, Igor V. Chernyshkov

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

OPERATIVE ESTIMATING OF DIESEL LOCOMOTIVE FUEL CONSUMPTION WITH ITS POWER UNIT MODE MATHEMATICAL MODEL

Abstract. The article discusses the possibility of determining the specific fuel consumption of diesel locomotives in operation using indirect calculation methods based on the use of these locomotive onboard systems and supplementing them with mathematical models of the operating cycle and the model for determining the composition of the exhaust gases of a diesel engine. The basic equations and algorithms proposed for the implementation of such a method of mathematical models and the results of their use are presented, the results of a comparison of simulation results and experimental data on the specific consumption of fuel of diesel locomotives TEM18DM are presented. A possible algorithm for their joint use is proposed, conclusions are made on the possible development of such a method for determining the energy efficiency of diesel locomotives without taking them out of service.

Keywords: mathematical model, exhaust data, fuel consumption estimating, diesel locomotive, locomotive onboard systems.

Контроль топливной эффективности тепловозного парка представляет собой актуальную и до сих пор окончательно не решенную проблему. Данный вопрос тем более обостряется разнородностью серий локомотивов, появлением современных и старением существующих образцов подвижного состава.

В настоящее время наблюдается повсеместное развитие локомотивных бортовых систем, средств экологического контроля и реостатных испытаний, электронных систем мониторинга и управления локомотивных хозяйством, что создает возможность получать, записывать и хранить большое количество данных о работе тепловозов. В связи с этим представляется перспективным дополнять данные системы математическими моделями, позволяющими получить дополнительную информацию о состоянии конкретного локомотива в эксплуатации [1].

Основным показателем, контролируя который можно судить об энергоэффективности тепловоза, является удельный эффективный расход топлива дизелем локомотива. Определить его можно как на основе экспериментальных данных, так и косвенно из расчета внутрицилиндровых процессов сжатия, сгорания и расширения. Преимуществом расчетного метода является возможность его реализации без затрат дизельного топлива и вывода тепловоза из эксплуатации.

Однако для реализации моделирования работы дизеля необходимо иметь полный набор параметров, характеризующих состояние протекающих термодинамических процессов, к тому же не все параметры могут быть измерены в эксплуатации без отрыва от работы локомотива. Удельный расход топлива может быть определен с помощью математической модели рабочего процесса дизельного двигателя тепловоза, построенной на уравнениях:

объемного баланса [2]:

$$dp = \frac{kp_r}{V_\phi} (\partial_s V + \partial_b V + \partial_m V + \partial_Q V - \partial V), \quad (1)$$

где dp – изменение давления газов в цилиндре, МПа;

k – коэффициент адиабаты;

p_r – текущее давление в цилиндре, МПа;

V_ϕ – текущий объем цилиндра, м³;

$\partial_s V$ – изменение объема в результате поступления газов в цилиндр, м³;

$\partial_b V$ – изменение объема в результате выхода газов из цилиндра, м³;

$\partial_m V$ – изменение объема в результате изменения количества молекул, м³;

$\partial_Q V$ – изменение объема в результате подвода к газам внешнего тепла, м³;

∂V – изменение объема в результате движения поршня, м³;

двухфазного тепловыделения Б. П. Пугачева [3]:

$$\frac{dx}{d\phi} = \frac{x_1}{\phi_1^2} \phi e^{-\frac{\phi^2}{2\phi_1^2}} + \frac{x_2}{\phi_2^2} \phi e^{-\frac{\phi^2}{2\phi_2^2}}, \quad (2)$$

где x_1 и x_2 – доли тепла, выделившегося в первой и во второй фазах;

ϕ_1 и ϕ_2 – продолжительность от начала сгорания до момента максимальной скорости тепловыделения в первой и во второй фазах, с;

теплообмена в цилиндре дизеля [4]:

$$dQ_{\text{охл}}^\phi = \alpha_{\text{сум}} (T_r - T_{\text{ст}}) F_{\text{ст}} \frac{d\phi}{6n_d}, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{сум}}$ – суммарный усредненный по поверхности коэффициент теплоотдачи от рабочего тела к стенкам цилиндра, Вт/(м²·К);

T_r – температура рабочего тела, К;

$T_{\text{ст}}$ – температура поверхности камеры сгорания, К;

$F_{\text{ст}}$ – площадь поверхности теплообмена, м²;

$d\phi / 6n_d$ – время теплоотдачи, с.

формуле для коэффициента теплоотдачи, полученной Г. Вошни, уточненной и преобразованной Г. Хохенбергом [5]:

$$\alpha_{\text{сум}} = 130 \cdot V_\phi^{-0,06} T_r^{-0,4} p_r^{0,8} [c_m + 1,4]^{0,8}, \quad (4)$$

где V_ϕ – текущий объем цилиндра, м³;

p_r – текущее давление в цилиндре, бар;

T_r – температура рабочего тела, К;

c_m – средняя скорость поршня, м/с.

Алгоритм работы математической модели расчета рабочего цикла дизельного двигателя представлен на рисунке 1.

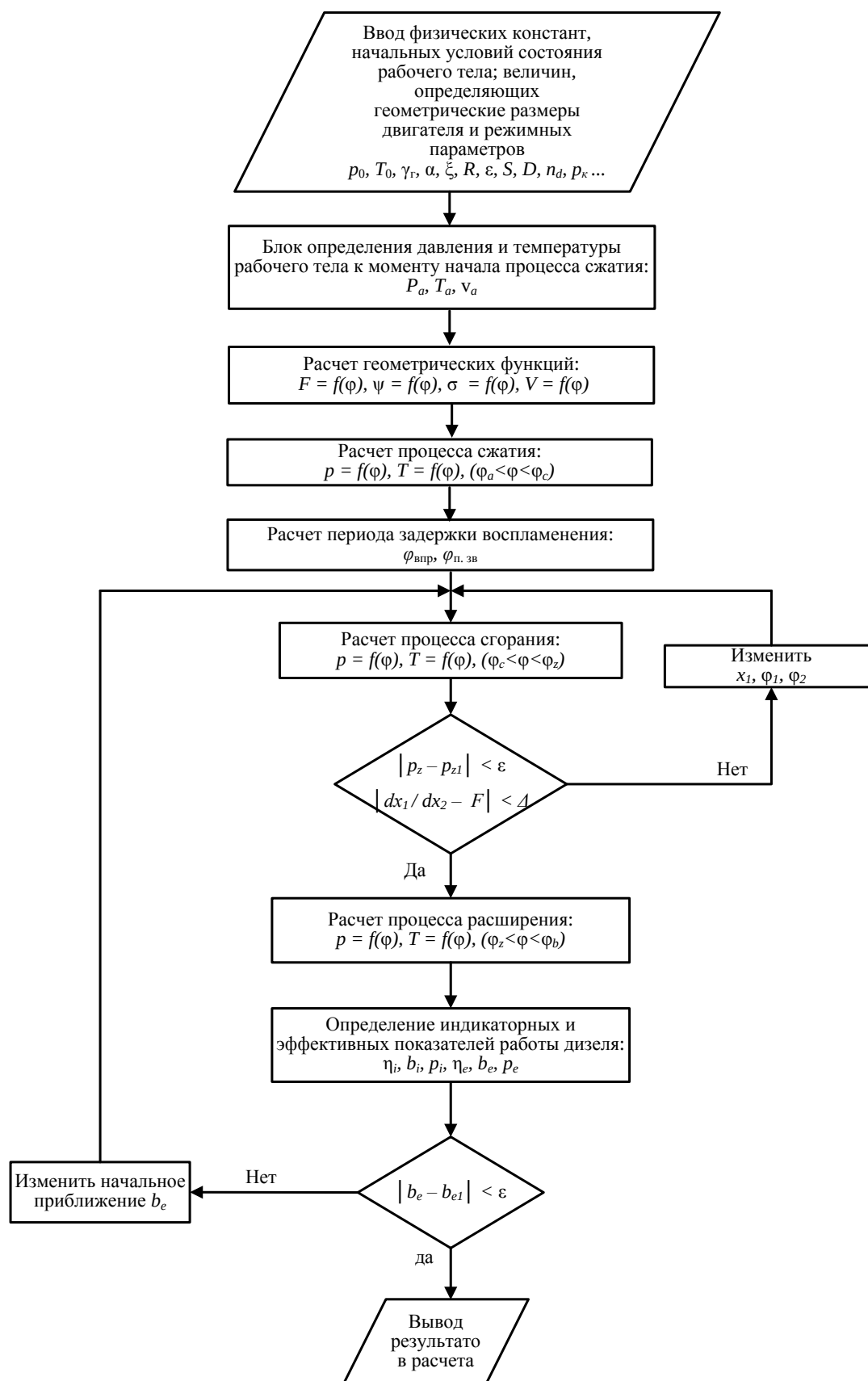


Рисунок 1 – Алгоритм расчета рабочего процесса дизельного двигателя

Для оперативного определения расхода топлива требуется знание ряда параметров. Причем некоторые из этих параметров можно задать заранее, остальные же будут изменяться в зависимости от режимов работы, технического состояния локомотива и внешних условий. На основе анализа математической модели выделены переменные в эксплуатации величины, влияющие на расход топлива:

$$b_e = f(\Pi_k, n_d, N_e, B_q, p_k, p_z, p_0, T_0), \quad (5)$$

где b_e – удельный эффективный расход топлива, кг/(кВт·ч);

Π_k – позиция контроллера машиниста;

n_d – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹;

N_e – эффективная мощность дизеля, кВт;

B_q – часовой расход топлива, кг/ч;

p_k – давление наддувочного воздуха, МПа;

p_z – максимальное давление сгорания, МПа;

p_0 – атмосферное давление, МПа;

T_0 – температура окружающей среды, К.

Часть параметров, входящих в формулу (5), регистрируется большинством существующих локомотивных бортовых систем, что позволяет без труда использовать текущие их значения в качестве условий для расчета. Однако такие характеристики работы дизеля, как мощность и максимальное давление сгорания, проблематично оперативно контролировать, следовательно, целесообразно получать такие параметры косвенными методами – на основе моделирования.

С целью анализа влияния максимального давления сгорания (p_z) и эффективной мощности дизеля (N_e) на состав отработавших газов была разработана математическая модель образования продуктов сгорания, учитывающая переменные значения давления и температуры рабочего тела в процессе работы дизеля. Модель построена на уравнениях материального баланса и учитывает 11 элементов в составе отработавших газов [6, 7]:

$$\begin{cases} \alpha_p (P_O + P_{O_2} + P_{OH} + P_{H_2O} + P_{NO} + P_{CO} + P_{CO_2}) = \alpha (P_{CO} + P_{CO_2}); \\ \beta_p (P_N + P_{N_2} + P_{NO}) = P_O + P_{O_2} + P_{OH} + P_{H_2O} + P_{NO} + P_{CO} + P_{CO_2}; \\ \gamma_p (P_H + P_{H_2} + P_{OH} + P_{H_2O}) = P_{CO} + P_{CO_2}; \\ P = P_O + P_{O_2} + P_H + P_{H_2} + P_{OH} + P_{H_2O} + P_N + P_{N_2} + P_{NO} + P_{CO} + P_{CO_2}, \end{cases} \quad (6)$$

где α_p , β_p , γ_p – коэффициенты равновесия, зависящие от элементарного состава топлива;

α – суммарный коэффициент избытка воздуха;

P – суммарное давление газовой смеси;

P_i – парциальное давление i -го элемента продуктов сгорания.

Для решения системы (6) используем метод, описанный в работе [8]: обе части каждого уравнения логарифмируются и раскладываются в ряд Тейлора, полагая неизвестными логарифмы парциальных давлений смеси. При этом члены разложения второго и большего порядков не учитываются.

В результате расчет сводится к решению системы четырех линейных алгебраических уравнений относительно четырех логарифмов неизвестных парциальных давлений:

$$\begin{cases} A_1 \Delta \lg(P_{H_2O}) + B_1 \Delta \lg(P_{H_2}) + C_1 \Delta \lg(P_{CO}) + D_1 \Delta \lg(P_{N_2}) = E_1; \\ A_2 \Delta \lg(P_{H_2O}) + B_2 \Delta \lg(P_{H_2}) + C_2 \Delta \lg(P_{CO}) + D_2 \Delta \lg(P_{N_2}) = E_2; \\ A_3 \Delta \lg(P_{H_2O}) + B_3 \Delta \lg(P_{H_2}) + C_3 \Delta \lg(P_{CO}) + D_3 \Delta \lg(P_{N_2}) = E_3; \\ A_4 \Delta \lg(P_{H_2O}) + B_4 \Delta \lg(P_{H_2}) + C_4 \Delta \lg(P_{CO}) + D_4 \Delta \lg(P_{N_2}) = E_4. \end{cases} \quad (7)$$

Причем коэффициенты $A_1, \dots, E_4$, зависящие от начальных приближений парциальных давлений и констант равновесия компонентов, определяются по зависимостям [8]:

$$\begin{aligned} A_1 &= a_{11} + a_{13} + a_{15}; \\ B_1 &= a_{12} - 0,5a_{13} + 0,5a_{14} - a_{15}; \\ C_1 &= a_{15} + a_{16}; \\ D_1 &= 0; \\ E_1 &= -(a_{13}b_7 + a_{14}b_8 + a_{15}b_5 + b_1); \\ &\dots \\ D_4 &= 0,5a_{49} + a_{4,10} + a_{4,11}; \\ E_4 &= -(a_{43}b_7 + a_{44}b_8 + a_{45}b_5 + a_{47}b_6 + a_{48}b_9 + a_{49}b_{11} + a_{4,11}b_{10} + b_4), \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= P_{H_2O} / (P_{H_2O} + P_{H_2} + P_{OH} + P_H); \\ a_{12} &= P_{H_2} / (P_{H_2O} + P_{H_2} + P_{OH} + P_H); \\ a_{13} &= P_{OH} / (P_{H_2O} + P_{H_2} + P_{OH} + P_H); \\ &\dots \\ b_{11} &= 2 \lg(k_{15}) + 2 \lg(P_{H_2O}) + \lg(P_{N_2}) - 2 \lg(P_{H_2}) - 2 \lg(P_{NO}). \end{aligned} \quad (9)$$

При этом результаты решения системы уравнений (7) используются как начальные условия для последующих итераций до получения требуемой точности (рисунок 2).

Далее расчет ведется для значений давления и температуры при сгорании на каждом угле поворота коленчатого вала с учетом формы характеристики тепловыделения:

$$m_i(\varphi) = \sum_{j=\varphi_0}^{\varphi_z} m_{ij}(p_j, T_j) dx_j, \quad (10)$$

где m_i – изменение массы i -го элемента газовой смеси в j -й момент времени;

m_{ij} – масса i -го элемента газовой смеси в момент сгорания, соответствующая j -му углу поворота коленчатого вала;

p_j – давление газов в цилиндре дизеля в j -й момент процесса сгорания;

T_j – температура газов в цилиндре дизеля в j -й момент процесса сгорания;

dx_j – доля сгоревшего топлива в цилиндре дизеля в j -й момент процесса сгорания.

Результатом работы математической модели является набор значений массы каждого элемента смеси в каждый момент процесса сгорания. В качестве примера подобных данных приведены зависимости массы CO , CO_2 , NO , H_2O от угла поворота коленчатого вала в процессе сгорания топлива в цилиндре дизеля ПД4Д на номинальном режиме работы (рисунок 3), полученные решением уравнений (6) – (10).

Для использования такой математической модели с целью определения удельного расхода топлива необходимо найти критерий подбора неизвестных параметров рабочего процесса на основе данных о составе отработавших газов [9].

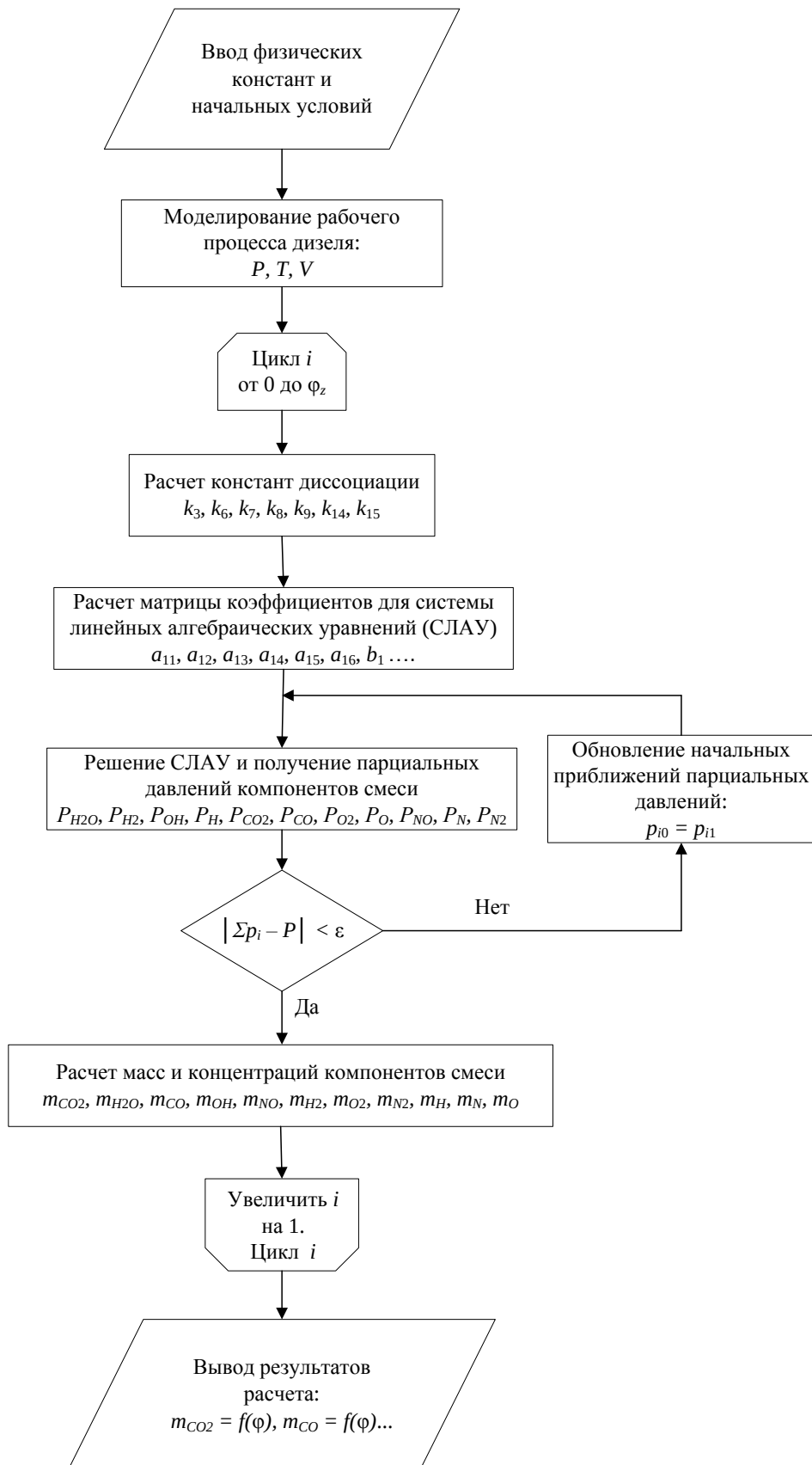


Рисунок 2 – Алгоритм определения состава отработавших газов дизеля

В качестве неизвестных параметров сгорания топлива приняты эффективная мощность дизеля (N_e) и максимальное давление сгорания (p_z), а в качестве исходных характеристик отработавших газов – массовая доля CO , CO_2 или NO в процентах от общей массы смеси.

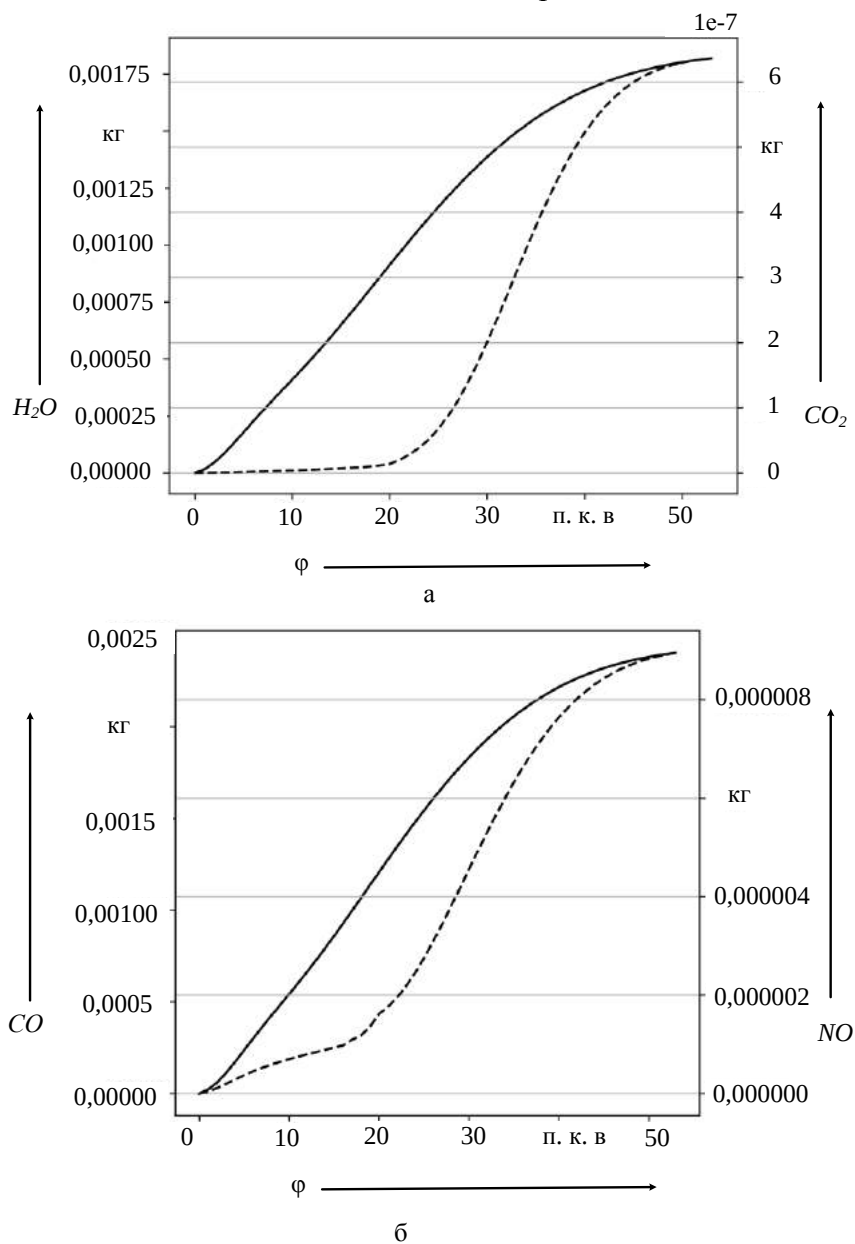


Рисунок 3 – Зависимости массы элементов газовой смеси от угла поворота коленчатого вала в процессе сгорания: а – для H_2O , CO_2 ; б – для NO , CO

С целью установления зависимости между указанными величинами было проведено математическое моделирование процесса сгорания топлива в цилиндре тепловозного дизеля ПД4Д на номинальном режиме работы при различных значениях N_e и p_z .

На основе данной модели производился расчет массовой доли продуктов сгорания топлива на основе рассчитанных параметров рабочего цикла и построены зависимости количества монооксида углерода (рисунок 4), углекислого газа (рисунок 5) и оксида азота (рисунок 6) от значений N_e и p_z . Анализ данных зависимостей показывает, что невозможно с достаточной точностью определить величины N_e и p_z на текущем режиме работы, используя данные о содержании только одного элемента в отработавших газах. Информация о содержании одного элемента газовой смеси позволяет локализовать пространство значений

($N_e; p_z$) до определенной области, следовательно, используя данные двух, трех или более элементов, можно определить искомые параметры с удовлетворительной точностью. Полученные в результате этого значения N_e и p_z используются как входные данные для моделирования процессов сжатия, сгорания и расширения, по результатам которого определяется удельный расход топлива. Если представлять математическую модель как черный ящик, то взаимную работу двух моделей можно представить схемой (рисунок 7).

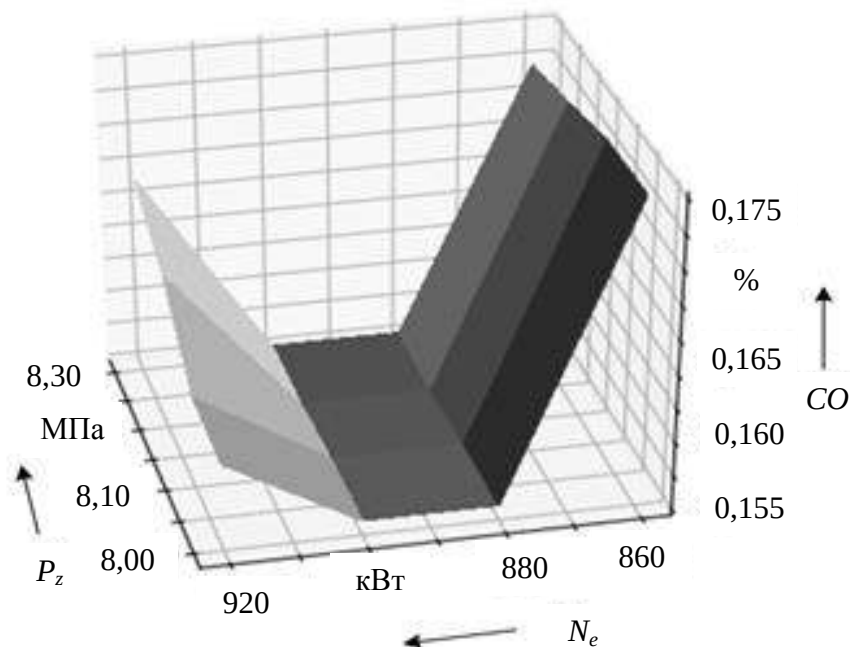


Рисунок 4 – Зависимость массовой доли CO в отработавших газах от часового расхода топлива и максимального давления сгорания

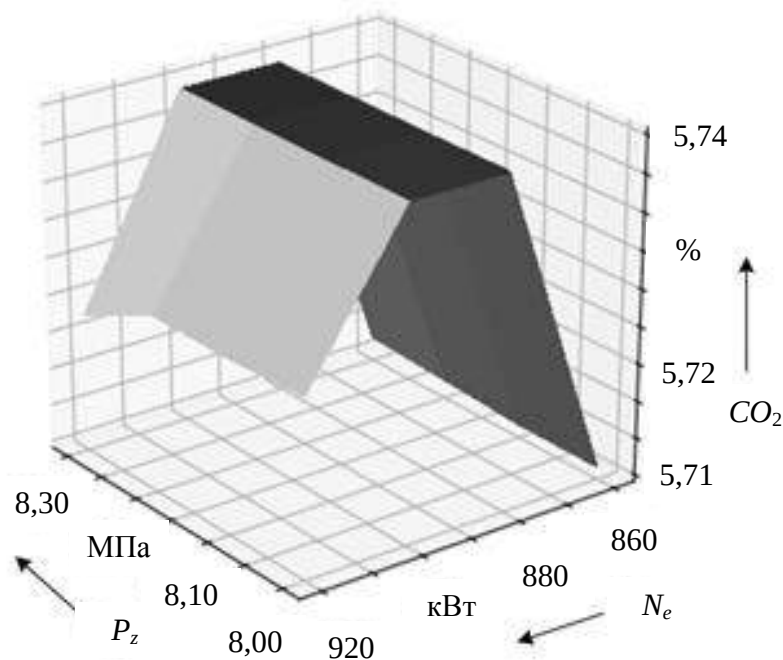


Рисунок 5 – Зависимость массовой доли CO₂ в отработавших газах от часового расхода топлива и максимального давления сгорания

В математическую модель рабочего цикла дизеля заложена возможность рассчитать индикаторные и эффективные показатели во всем диапазоне режимов работы. Для анализа адекватности работы математической модели были произведены расчеты рабочего процесса дизеля ПД4Д тепловоза ТЭМ18ДМ на различных позициях контроллера машиниста (рисунок 8).

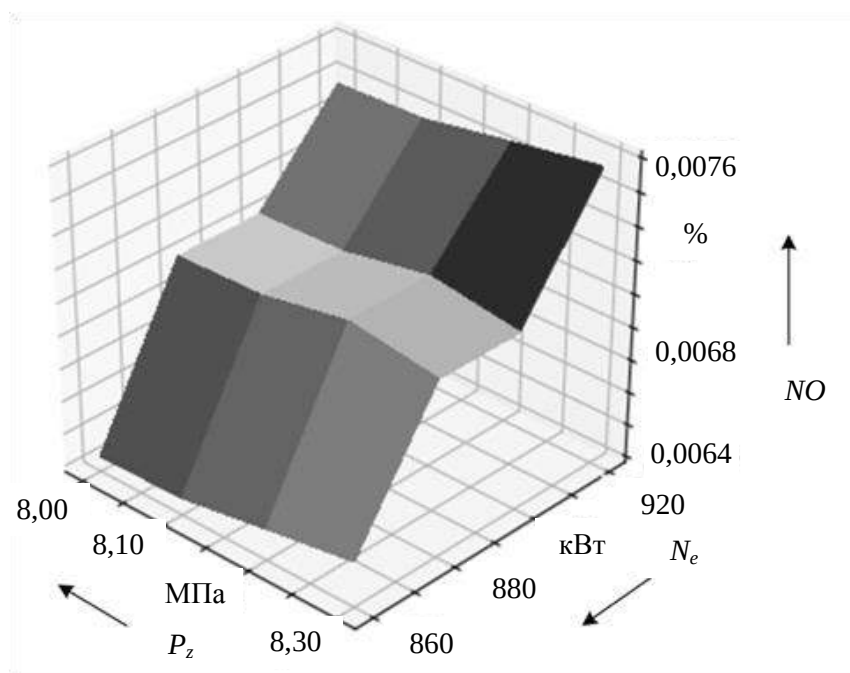


Рисунок 6 – Зависимость массовой доли NO в отработавших газах от часового расхода топлива и максимального давления сгорания

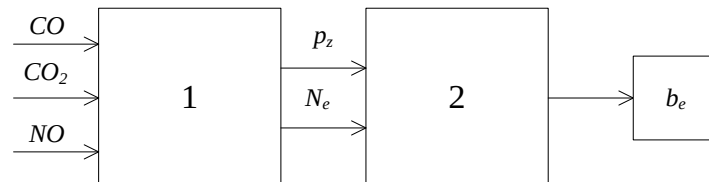


Рисунок 7 – Схема взаимодействия математических моделей: 1 – модель образования состава продуктов сгорания; 2 – модель рабочего цикла дизеля

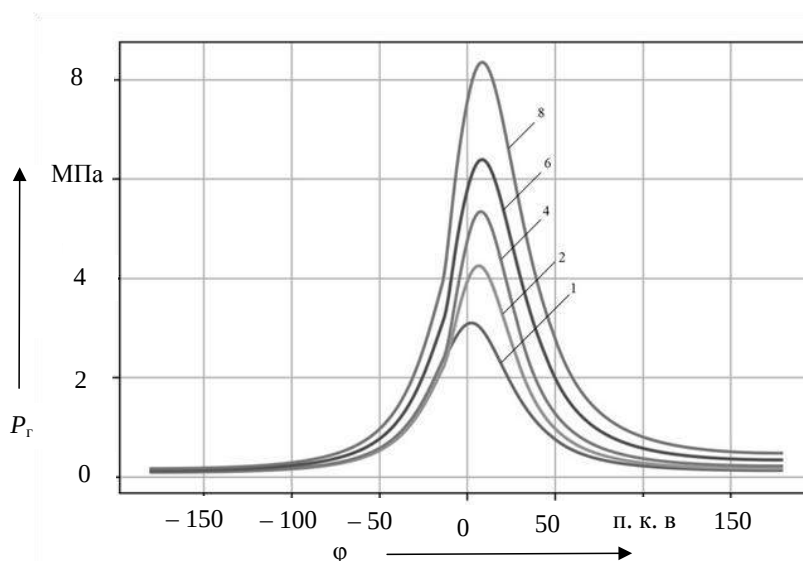


Рисунок 8 – Давление газов в цилиндре дизеля тепловоза ТЭМ18ДМ в процессе сжатия, сгорания и расширения при различных позициях КМ

По полученным данным о давлении в цилиндре были рассчитаны показатели удельного расхода топлива дизелем, после чего расчетные значения сравнены с опытными данными [10]. Зависимости удельного расхода топлива от эффективной мощности дизеля, полученные по результатам моделирования и опытов, представлены на рисунке 9.

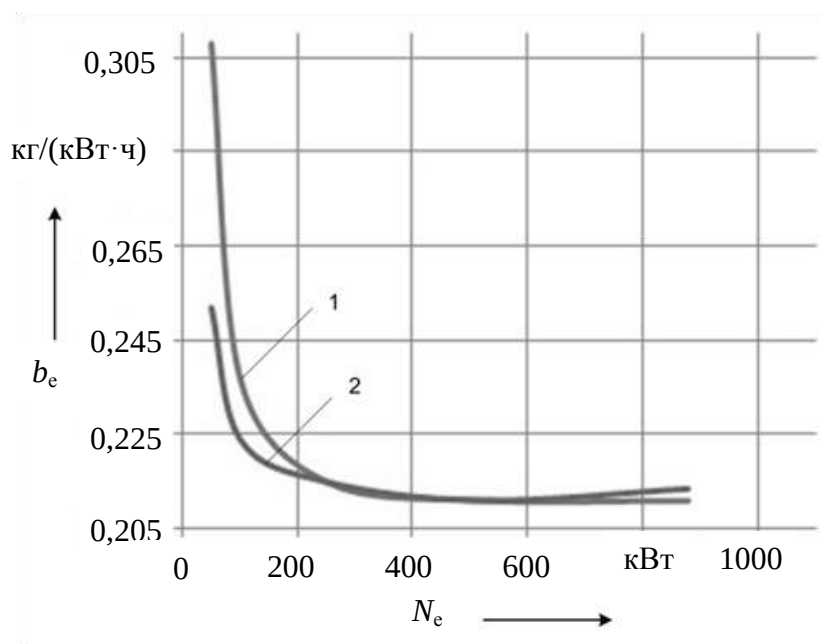


Рисунок 9 – Зависимости удельного расхода топлива от эффективной мощности дизеля:
1 – опытные данные; 2 – данные моделирования

На основе сравнения опытных и расчетных данных можно сделать вывод о том, что модель рабочего процесса дает удовлетворительные результаты по определению эффективности работы дизеля от 2-й до 8-й позиции контроллера машиниста, относительная погрешность определения расхода топлива не превышает 5 %. Однако для оценки достоверности модели необходимо проведение испытаний на реальном дизеле с последующим сравнением опытных и расчетных данных.

Вполне возможно, что зависимости массовой доли химических элементов в отработавших газах от эффективной мощности и максимального давления сгорания могут различаться при различных режимах работы тепловоза и техническом состоянии его узлов и агрегатов, следовательно, требуется экспериментальная проверка данного предположения.

В целом данный способ оперативного определения удельного расхода топлива тепловозами может быть реализован и встроен в систему обработки данных бортовых систем, что позволит получать дополнительную информацию о состоянии локомотивного парка в эксплуатации.

Список литературы

1. Лакин, И. И. Универсальная программа диагностирования локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления [Текст] / И. И. Лакин, А. А. Аболмасов // Локомотив. – 2018. – № 2. – С. 22 – 24.
2. Володин, А. И. Комплексный анализ термодинамических, экономических и экологических характеристик тепловозных дизелей в условиях эксплуатации: Монография [Текст] / А. И. Володин, Е. И. Сковородников, А. С. Анисимов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – 166 с.
3. Кавтарадзе, Р. З. Теория поршневых двигателей: Специальные главы: Учебник [Текст] / Р. З. Кавтарадзе / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2008. – 720 с.

4. Коньков, А. Ю. Диагностирование дизеля на основе идентификации рабочих процессов: Монография [Текст] / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко. – Владивосток: Дальнаука, 2014. – 365 с.
5. Кавтарадзе, Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: Учебное пособие [Текст] / Р. З. Кавтарадзе / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2007. – 472 с.
6. Звонов, В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В. А. Звонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
7. Дубовкин, Н. Ф. Справочник по теплофизическим свойствам углеводородных топлив и их продуктов сгорания [Текст] / Н. Ф. Дубовкин. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.
8. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах (состав и термодинамические свойства) [Текст] / И. Н. Карп, Б. С. Сорока и др. – Киев: Техника, 1967. – 382 с.
9. Володин, А. И. Методы оценки технического состояния, эксплуатационной экономичности и экологической безопасности дизельных локомотивов: Монография [Текст] / А. И. Володин. – М.: Желдориздат, 2007. – 264 с.
10. Сиротенко, И. В. Что показали сравнительные испытания тепловозов ТЭМ14, ТЭМ7А, ТЭМ18В и ТЭМ18ДМ [Текст] / И. В. Сиротенко // Локомотив. – 2015. – №12. – С. 28 – 30.

References

1. Lakin I. I., Abolmasov A. A. A universal program for diagnosing locomotives from onboard microprocessor control systems [Universalnaia programma diagnostirovaniia locomotivov po danim bortovikh microprocessornikh system upravleniia]. *Locomotive*, 2018, no. 2, pp. 22 – 24.
2. Volodin A. I. *Complex analysis of thermodynamic, economic and ecological characteristics of operating locomotive diesels* (Complex thermodynamic, economic, ecologic characteristics analysis of operating locomotive diesels). Omsk: OSTU, 2011, 166 p.
3. Kavtaradze R. Z. *Theoria porshnevnykh dvigatelei* (Piston engines theory). Moscow: MSTU, 2008, 720 p.
4. Konkov A. U. *Diagnostirovanie dizelia na osnove identyfikatsii rabochikh processov* (Working cycle identification diesel engine diagnosis). Vladivostok, 2014, 365 p.
5. Kavtaradze R. Z. *Localnii teploobmen v porshnevnykh dvs* (Local heat exchange in piston IC engines). Moscow: MSTU, 2007, 472 p.
6. Zvonov V. A. *Toksichnost dvigatelei vnutrennego sgorania* (IC engines toxicity). Moscow: Mashinostroenie, 1981, 160 p.
7. Dubovkin N. F. *Spravochnik po uglevodorodnim toplivam i ikh produktam sgorania* (Handbook on thermal properties of hydrocarbon fuels and their combustion products). Moscow: Gosenergoizdat, 1962, 288 p.
8. Karp I. N., Soroka B. S., Dashevskii L. N., Semerkina S. D. *Produkty sgorania prirodnogo gaza pri vysokikh temperaturakh* (Combustion products of natural gas at high temperatures). Kiev: Tehnika, 1967, 382 p.
9. Volodin A. I. *Metody ocenki tekhnicheskogo sostoiania, ekspluatacionoi ekonomichnosti i ekologicheskoi bezopasnosti diselnih locomotivov* (Methods for assessing the technical condition, operational efficiency and environmental safety of diesel locomotives). Moscow: Zeldorizdat, 2007, 264 p.
10. Sirotenko I. V. What did the comparative tests of TEM14, TEM7A, TEM18W & TEM18DM diesel locomotives show? [Chto pokazali sravnitelnie ispitanie teplovozov TEM14, TEM7A, TEM18W i TEM18DM]. *Locomotive*, 2016, no. 12, pp. 28 – 30.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анисимов Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anisimov Alexandr Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-17.

E-mail: anisimovas1971@mail.ru

Чернышков Игорь Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-17.

E-mail: chernyshkovigor@yandex.ru

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-17.

E-mail: anisimovas1971@mail.ru

Chernyshkov Igor Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-17.

E-mail: chernyshkovigor@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Анисимов, А. С. Оперативная оценка расхода топлива тепловозами на основе методов математического моделирования режимов работы энергетических установок [Текст] / А. С. Анисимов, И. В. Чернышков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 2 – 13.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Anisimov A. S., Chernyshkov I. V. Operative estimating of diesel locomotive fuel consumption with its power unit mode mathematical model. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 2, no 34, pp. 2 – 13 (In Russian).

УДК 629.4.027.2

И. С. Гельвер, С. А. Гельвер, И. А. Дроздова

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

АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО И ПРЕДЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ ПОВЕДЕНИИ МАТЕРИАЛА

Аннотация. В работе обоснована актуальность проведения научно-исследовательских работ по совершенствованию нормативно-методологической базы при разработке перспективных конструкций подвижного состава железных дорог с применением новых конструкционных материалов, обладающих нелинейными свойствами при деформировании (физической нелинейностью). Рассмотрена возможность использования процедуры метода конечных элементов (МКЭ) при создании таких конструкций. Зависимость напряжений от деформаций аппроксимирована кубической параболой. Это позволило получить обобщения известных соотношений и алгоритмов классической теории МКЭ при нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями. Предложенная методика апробирована при оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) алюминиевого грузового полувагона при различных нормативных нагрузках по I расчетному режиму. Произведена оценка влияния физической нелинейности на НДС хребтовой балки грузового полувагона из алюминиевого сплава АМгб. При расчете напряжений, возникающих при действии продольной силы с эксцентриситетом, напряжения в нелинейном приближении оказываются на 13 % ниже соответствующих значений напряжения, полученных при расчете по линейной теории. Полученные результаты могут быть рекомендованы при разработке аванпроектов новых конструкций, оптимизированных по весовым и прочностным характеристикам.

Ключевые слова: физическая нелинейность, метод конечных элементов, нелинейный закон деформирования, новые конструкционные материалы, алюминиевый полувагон.

Igor S. Gelver, Sergei A. Gelver, Ilga A. Drozdova
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF THE CURRENT AND LIMITED STRESSED-DEFORMED STATES OF THE ROLLING STOCK OF RAILWAYS WITH ELASTIC-PLASTIC CONDUCT OF MATERIAL

Annotation. The relevance of carrying out research works on improving the regulatory and methodological base in the development of promising railroad rolling stock structures with the use of new structural materials with nonlinear properties during deformation (physical nonlinearity) is substantiated in the work. The possibility of using the finite element method (FEM) procedure for creating such constructions is considered. Dependence of stresses on deformations is approximated by a cubic parabola. This made it possible to obtain generalizations of the well-known relations and algorithms of the classical theory of FEM with a nonlinear relationship between stresses and deformations. The proposed technique was tested in the evaluation of the stress-strain state (SSS) of an aluminum gondola car under various standard loads according to the 1st design mode. The effect of physical nonlinearity on the SSS of a spiral beam of a freight gondola car of aluminum alloy AMg6 was estimated. The calculation of the stresses generated by the action of a longitudinal force with eccentricity shows that the stresses in the nonlinear approximation are 13% lower than the corresponding stress values obtained by calculation in the linear theory. The results obtained can be recommended for the development of pilot projects of new structures optimized for weight and strength characteristics.

Keywords: physical nonlinearity, finite element method, law of nonlinear deformation, new construction materials, aluminum gondola car.

В «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» в разделе «Основные направления научных исследований в области железнодорожного транспорта» в качестве одной из важнейших задач ставится создание нормативной базы для оценки прочности перспективных конструкций подвижного состава железных дорог [1].

В ближайшие годы планируется производство новых пассажирских и грузовых вагонов, при этом для грузовых вагонов ставится задача на четверть снизить коэффициент тары. Одним из путей решения этой задачи является использование в вагоностроительной практике новых конструкционных материалов (композитные материалы, алюминиевые сплавы и пр.). Поэтому исследования по совершенствованию методологической базы и технологии производства таких объектов весьма актуальны.

В настоящее время как в России, так и за рубежом при производстве подвижного состава железных дорог широко используются различные сплавы алюминия [2]. Например, Воронежским акционерным самолетостроительным обществом совместно с центром НПП «Технологический центр» для повышения эффективности перевозок угля по заказу ОАО «РЖД» разработан новый полувагон с кузовом из алюминиевых сплавов грузоподъемностью 82 тонны.

Целесообразность применения алюминиевых сплавов в вагоностроении, особенности технологии их производства исследованы в работе [3]. Особенностью алюминия и его сплавов является нелинейная зависимость механического напряжения от относительной деформации (физическая нелинейность материала).

В работах [4, 5] авторы исследуют особенности определения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций подвижного состава железных дорог, выполненных из новых конструкционных материалов. Однако в этих работах не исследуется влияние физической нелинейности на НДС конструкции.

Нормативной базой для создания вагонов из сплавов алюминия в настоящее время являются «Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» [6], где при I расчетном режиме допускаемые напряжения принимаются равными значениям, при которых для алюминиевых сплавов наблюдается отклонение от закона Гука (физическая нелинейность материала). Учет этого эффекта существующими «Нормами...» не предусматривается, что не дает достоверного представления о НДС конструкции.

Как показано авторами работы [10], наиболее приемлемым обобщением закона Гука, вытекающим из разложения потенциальной энергии деформации узлов кристаллической решетки материала в ряд Тейлора, с учетом второго слагаемого является аппроксимация реальной диаграммы деформирования алюминиевого сплава кубической параболой вида:

$$\sigma = P_1 \varepsilon - P_2 \varepsilon^3. \quad (1)$$

Эта задача аппроксимации для алюминиевого сплава АМг6 была решена с помощью программы Origin. Для указанного алюминиевого сплава были получены следующие результаты: $P_1 = (75 \pm 2)$ ГПа; $P_2 = (2980 \pm 380)$ ТПа.

Существует и другой подход к выбору реальной зависимости между напряжениями и деформациями, о котором говорится в работе [11]. При этом варианте аппроксимации константа P_1 принимается равной величине модуля упругости Юнга E конструкционного материала. Для алюминиевого сплава АМг6 $E = 72$ ГПа.

Константу P_2 можно определить из следующих соображений. При некоторой предельной деформации, соответствующей пределу текучести материала, касательный модуль упругости будет равен нулю ($d\sigma/d\varepsilon = 0$). При этом, как показано в работе [11],

$$P_2 = \frac{E^3}{6,76\sigma_T^2}. \quad (2)$$

Такой подход позволяет производить аппроксимацию нелинейной зависимости «напряжения – деформации» через стандартные характеристики механических свойств материала – модуль упругости Юнга и предел текучести.

Существующими «Нормами ...» [6] при расчете на прочность проектируемых конструкций грузовых вагонов рекомендуется использовать метод конечных элементов (МКЭ). В работе [8] показано, что процедуру метода конечных элементов в нелинейной постановке задачи можно привести к виду, широко известному в линейной теории. Отличие состоит лишь в том, что приходится решать систему нелинейных разрешающих уравнений.

В настоящей работе оценивались текущее и предельное НДС хребтовой балки кузова четырехосного грузового полувагона из алюминиевого сплава АМг6 по I расчетному режиму, при котором допускаемые напряжения выбираются близкими к пределу текучести материала (140 МПа). Сечение балки представлено на рисунке 1.

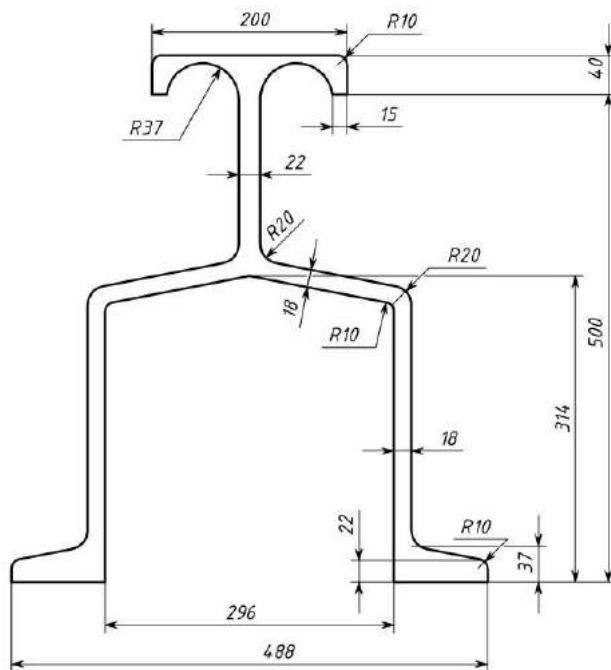


Рисунок 1 – Сечение хребтовой балки

Учет центрально действующей продольной силы осуществим в соответствии с методикой, предложенной авторами работы [9]. Расчетная схема представлена на рисунке 2.

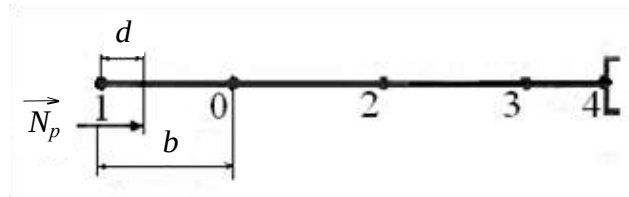


Рисунок 2 – Расчетная схема МКЭ

Процедура формирования разрешающих уравнений для всей системы конечных элементов совпадает с известным алгоритмом из линейной теории МКЭ, описанным в работе [10], единственное отличие состоит в присутствии в правой части системы разрешающих уравнений вектора нелинейности $\{G\}$:

$$[r + C]\{U\} + \{N\} = \{G\}, \quad (3)$$

где $r = \frac{P_1 \cdot F}{b} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 3 \end{bmatrix}$ – матрица реакций;

$\{U\}$ – вектор узловых перемещений;

$$C = \frac{48P_1}{(2a)^3} \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \text{ – матрица податливости;}$$

$$N = \begin{Bmatrix} N_p \left(1 - \frac{d}{b}\right) \\ N_p \frac{d}{b} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ – вектор нагрузок;}$$

$$G = \frac{P_1 \cdot F}{b^3} \begin{Bmatrix} -(U_1 - U_0)^3 \\ (U_1 - U_0)^3 - (U_2 - U_1)^3 \\ (U_2 - U_1)^3 - (U_3 - U_2)^3 \\ (U_3 - U_2)^3 + U_3^3 \end{Bmatrix} \text{ – вектор нелинейности.}$$

Напряжение в линейном приближении определялось в соответствии с законом Гука по формуле:

$$\sigma_0 = P_1 \cdot \left(\frac{U_{0n} - U_{1n}}{b} \right), \quad (4)$$

а с учетом нелинейности – в соответствии с принятым законом деформирования (1):

$$\sigma = P_1 \cdot \left(\frac{U_{0n} - U_{1n}}{b} \right) - P_2 \cdot \left(\frac{U_{0n} - U_{1n}}{b} \right)^3. \quad (5)$$

При продольной сжимающей силе $N_p = 3,5$ МН значение $\sigma_0 = 46,4$ МПа, $\sigma = 46,0$ МПа. Значения практически совпадают. Этого и следовало ожидать, так как при данном виде нагружения хребтовая балка находится в состоянии, далеком от предельно напряженного, когда нелинейность деформирования еще не сказывается.

Другой результат получится при оценке нагруженности от других нормативных сил. Балка рассчитывалась на продольные сжимающие или растягивающие усилия при наличии эксцентриситета (несовпадения нейтральной оси хребтовой балки с осью автосцепки).

В этом случае балка испытывает дополнительный изгиб в вертикальной плоскости от момента

$$M = N \cdot e, \quad (6)$$

где N – величина продольной силы, e – эксцентриситет.

При расчете по I режиму принимались следующие значения: $e = 10$ см; $N = 3,5$ МН.

Для рассмотренного случая НДС хребтовой балки (внецентренное растяжение – сжатие) механическое напряжение определялось в соответствии с методикой, предложенной автором работы [11], по формуле:

$$\sigma = \sigma_0 - \frac{\sigma_0^3}{6,76\sigma_T^2}, \quad (7)$$

где $\sigma_T = 140$ МПа, σ_0 – величина напряжения, полученная при расчете по закону Гука через изгибающий момент в сечении балки.

Результаты расчета изгибающего момента в линейном и нелинейном приближениях представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

Таблица 1 – Результаты расчета изгибающего момента

Длина участка, см	83	83	184	276	368	460
Изгибающий момент, кН·м: линейный расчет	– 241	119	53	– 12	– 8	– 4
нелинейный расчет	– 250	100	45	– 10	– 7	– 4

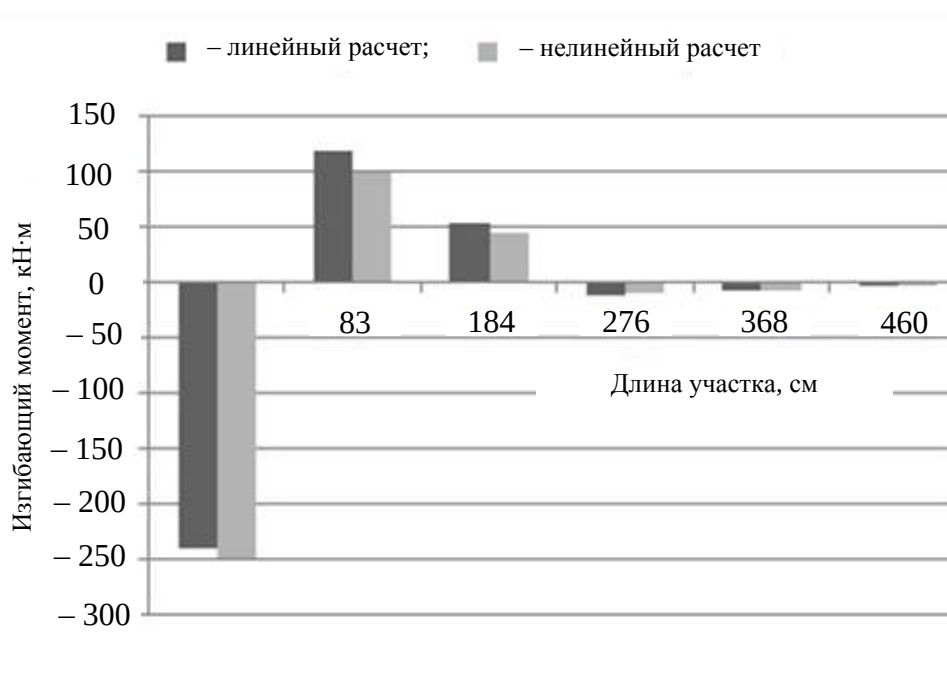


Рисунок 3 – Эпюра изгибающего момента в линейном и нелинейном приближениях

Из анализа результатов расчета изгибающего момента видно, что картина напряженно-деформированного состояния хребтовой балки с учетом физической нелинейности отличается от соответствующей картины при линейном расчете в соответствии с законом Гука.

В таблице 2 и на рисунке 4 представлены результаты расчета механического напряжения.

Таблица 2 – Результаты расчета механического напряжения

Длина участка, см	83	184	276	368	460
Напряжение, МПа: линейный расчет	– 125	61	27	– 6	– 4
нелинейный расчет	– 109	59	27	– 6	– 4

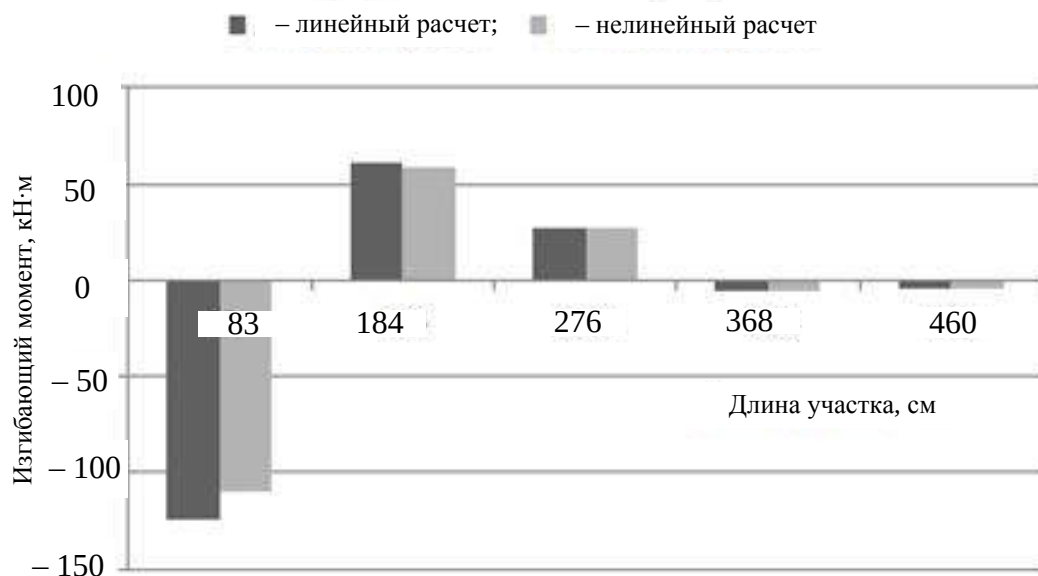


Рисунок 4 – Эпюра напряжения в линейном и нелинейном приближениях

Как видно из результатов расчета, в опасном сечении напряженное состояние приближается к предельному, начинает проявляться нелинейность деформирования ($\sigma_0 = 125$ МПа, а $\sigma = 109$ МПа). Нелинейный расчет дает значение напряжения на 13 % меньше соответствующего значения при линейном расчете.

Предложенная методика учета влияния физической нелинейности на НДС позволяет проводить исследования по созданию перспективных конструкций подвижного состава, оптимизированных по прочностным и весовым характеристикам.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 №877-р – Режим доступа: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3997&layer_id=5104&
2. Журавлева, Л. В. Применение алюминиевых сплавов в грузовом вагоностроении за рубежом [Текст] / Л. В. Журавлева // Железнодорожный транспорт. – 2004. – Вып. 1 – 2. – С. 21 – 36.
3. Иванов, А. А. Условия целесообразного применения алюминиевых сплавов в вагоностроении: на примере полувагонов [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Иванов Александр Анатольевич. – М., 1999. – 143 с.

4. Быков, А. И. Напряженно-деформированное состояние несущих кузовов грузовых вагонов из анизотропных материалов [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Быков Анатолий Иванович. – М., 1999. – 259 с.
5. Холохонова, Е. А. Разработка мер по совершенствованию несущей конструкции кузова вагона скоростного электропоезда из алюминиевых сплавов [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Холохонова Елена Александровна. – Брянск, 1995. – 194 с.
6. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 317 с.
7. Матяш, Ю. И. Применение современных физико-химических подходов к оценке теплопроводности на примере тормозных колодок [Текст] / Ю. И. Матяш, Ю. М. Сосновский, С. Н. Крохин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 3 (11). – С. 40 – 46.
8. Стержневой конечный элемент с учетом физической нелинейности [Текст] / С. А. Гельвер, А. В. Колунин и др. // Вестник СибАДИ / Сибирский гос. автомобильно-дорожный ун-т. – Омск, 2013. – № 5 (33). – С. 88 – 91.
9. Конструирование и расчет вагонов [Текст]: Учебник / В. В. Лукин, Л. А. Шадур и др. / УМЦЖДТ. – М., 2011. – 687 с.
10. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений [Текст] / А. С. Городецкий, В. И. Зоворицкий и др. – М.: Транспорт, 1981. – 143 с.
11. Гельвер, С. А. Исследование напряженно-деформированного состояния кузова грузового полувагона из алюминиевых сплавов с учетом физической нелинейности материала [Текст] / С. А. Гельвер // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2008. – № 4. – С. 20 – 23.

References

1. *Strategiia razvitiia zheleznodorozhnogo transporta v Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda* (Strategy for the development of rail transport in the Russian Federation until 2030). Order of the Government of the Russian Federation of 17.06.2008 № 877-r) http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3997&layer_id=5104&
2. Zhuravleva L. V. Application of aluminum alloys in freight car building abroad [Primenenie aliuminievykh splavov v gruzovom vagonostroenii za rubezhom]. *Zheleznodorozhnyi transport – The journal of Railway Transport*, 2004, no. 1 – 2, pp. 21 – 36.
3. Ivanov A. A. *Usloviia tselesoobraznogo primeneniia aliuminievykh splavov v vagonostroenii: Na primere poluvagonov* (Conditions for the expedient use of aluminum alloys in car building: The example of gondola cars). Doctor's thesis, Moscow, 1999, 143 p.
4. Bykov A. I. *Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie nesushchikh kuzov gruzovykh vagonov iz anizotropnykh materialov* (Stress-strain state of load-carrying bodies of freight wagons from anisotropic materials). Doctor's thesis, Moscow, 1999, 259 p.
5. Kholokhonova E. A. *Razrabotka mer po sovershenstvovaniiu nesushchei konstruktsii kuzova vagona skorostnogo elektropoezda iz aliuminievykh splavov* (Development of measures to improve the load-bearing structure of the car body of a high-speed electric train from aluminum alloys). Doctor's thesis, Bryansk, 1995, 194 p.
6. *Normy dlia rascheta i proektirovaniia vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* (Norms for the calculation and design of railroad cars of the Ministry of Railways of the gauge of 1520 mm (non-self-propelled)), GosNIIV-VNIIZhT, 1996, 317 p.
7. Matiashevskii Iu. I., Sosnovskii Iu. M., Krokhin S. N. Application of modern physical and chemical approaches to the evaluation of thermal conductivity using the example of brake pads [Primenenie sovremennykh fiziko-khimicheskikh podkhodov k otsenke teploprovodnosti na primere tormoznykh kolodok]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 3 (11), pp. 40 – 46.

8. Gel'ver S. A., Kolunin A. V., Shirlin I. I., Markov A. B. Rod end element with allowance for physical nonlinearity [Sterzhnevoi konechnyi element s uchetom fizicheskoi nelineinosti]. *Vestnik SibADI*, 2013, no. 5 (33), pp. 88 – 91.

9. Lukin V. V., Shadur L. A., Koturanov V. N., Khokhlov A. A., Anisimov P. S. *Konstruirovaniye i raschet vagonov* (Design and calculation of wagons). Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transp., 2011, 687 p.

10. Gorodetskii A. S., Zovoritskii V. I., Lantukh-Liashchenko A. I., Rasskazov A. O. *Metod konechnykh elementov v proektirovanii transportnykh sooruzhenii* (The finite element method in the design of transport structures). Moscow: Transport, 1981, 143 p.

11. Gel'ver S. A. Study of the stress-strain state of the body of a freight gondola car of aluminum alloys taking into account the physical nonlinearity of the material [Issledovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoiianiia kuzova gruzovogo poluvagona iz aliuminievykh splavov s uchetom fizicheskoi nelineinosti materiala]. *Transport Urala – The journal of Ural Transport Studies*, 2008, no. 4, pp. 20 – 23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гельвер Игорь Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: unseenshen@gmail.com

Гельвер Сергей Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и химия», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: gelversa@rambler.ru

Дроздова Илга Анатольевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика и химия», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: drozdovailga@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гельвер, И. С. Анализ текущего и предельного напряженно-деформированного состояний подвижного состава железных дорог при упругопластическом поведении материала [Текст] / И. С. Гельвер, С. А. Гельвер, И. А. Дроздова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 13 – 20.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gelver Igor Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Theoretical mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: unseenshen@gmail.com

Gelver Sergei Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Physics and chemistry», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: gelversa@rambler.ru

Drozdova Ilga Anatolievna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Physics and Mathematics, Associate Professor of the department «Physics and chemistry», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: drozdovailga@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gelver I. S., Gelver S. A., Drozdova I. A. Analysis of the current and limited stressed-deformed states of the rolling stock of railways with elastic-plastic conduct of material. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 2, no 34, pp. 13 – 20 (In Russian).

УДК 656.073

Д. И. Илесалиев

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ). г. Ташкент, Узбекистан

УВЕЛИЧЕНИЕ МАССЫ ПАРТИИ ГРУЗОВ ЗА СЧЕТ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ТРАНСПОРТНОЙ ТАРЫ

Аннотация: В статье анализируются влияния транспортной тары на технологию перевозки в зависимости от параметров груза. Параметры транспортных пакетов, сформированных на стандартных поддонах размерами 1200×1000 мм, 1200×800 мм, и внутренние размеры крытых вагонов и контейнеров не кратны между собой и не имеют общего модуля. В связи с этим возникает необходимость изучения данного вопроса на научной основе. Целью исследования является разработка методики выбора рациональной транспортной тары при перевозке тарно-штучных грузов. В статье использованы основные положения теории транспортной логистики и теории складских систем. Материалами для исследования явились результаты обследования существующих способов укладки грузов на стандартные поддоны, а также действующие нормативные документы по размещению грузов в транспортные средства. Практическая значимость состоит в повышении массы транспортной партии грузов.

Ключевые слова: параметры груза, упаковка, тара, размещения, поддон, транспортный пакет, контейнер, условия перевозок.

Daurenbek I. Ilesaliev

Tashkent institute of railway engineering (TIRE). Tashkent. Uzbekistan

INCREASING THE MASS OF THE CARGO PARTY FOR THE ACCOUNT OF A RATIONAL CHOICE OF THE TRANSPORTATION TACK

Abstract. The purpose of the study is to justify a rational method of organizing transportation, depending on the various parameters of packaged cargoes, transport containers, wagons and containers. The methods of investigation are based on the analysis and generalization of existing methods and methods of collecting the initial information, methods of its processing when choosing a rational method for the carriage of packaged goods. Practical significance of the research in the implementation of its results lies in the possibility of increasing the technical rate of loading of wagons and containers.

Keywords: cargo parameters, packaging, packaging, placement, pallet, transport package, container, transportation conditions.

В настоящее время во многих источниках литературы встречается словосочетание «технология перевозок», но его конкретное определение встречается крайне редко. В большом толковом словаре «Collins» это понятие раскрывается так: «Технология – это практическое применение знания и использование методов в производственной деятельности». В толковом словаре русского языка С. И. Ожегова, Н. Ю. Шведова это понятие трактуется так: «Технология – это совокупность производственных методов и процессов в определенной отрасли производства, а также научное описание способов производства». Таким образом, технология перевозок – это комплекс методов выбора транспортной тары и размещения грузов в транспортные средства для дальнейшего транспортирования до пунктов выгрузки.

Улучшение технологии перевозок зависит от рационального размещения тарно-штучных грузов в транспортные средства, так как грузоподъемность зачастую используется только на 50 – 60 % [1 – 3]. На использование грузоподъемности вагонов и контейнеров влияют объемная масса, характер тары и упаковка груза, способы и условия погрузки и размещения грузов. Мероприятия, обеспечивающие рациональное использование грузоподъемности, различны и зависят от типа вагонов и контейнеров: выбор типа вагона и контейнеров, соответствующего рода груза и объемной массы; рациональное размещение тарных грузов в вагон и контейнер; комбинированная погрузка грузов с разной объемной массой.

Тарно-штучные грузы наиболее эффективно перевозить в транспортных пакетах. Это обусловлено повышением производительности погрузочно-разгрузочных машин, сокращением трудозатрат на погрузочно-разгрузочные работы [4]. В связи с этим необходимо разрабатывать методику поиска увеличения массы партии грузов за счет рационального выбора транспортной тары.

Анализ перемещения тарно-штучных грузов и их укладки в штабель на складе выявил, что наибольшую эффективность производственного процесса обеспечивает технология пакетирования в процессе перегрузки [5].

В работе В. И. Тиверовского был рассмотрен поддон размерами 1100 × 1100 мм, который позволяет разместить в контейнере шириной 2320 мм два ряда поддонов по десять штук [6].

В трудах А. М. Островского [7] предлагается учитывать различные факторы, а также рассматривать конкретную перевозку комплексно, принимая во внимание все особенности транспортирования продукции, чтобы обеспечить снижение транспортных издержек и сроков доставки.

И. В. Барсук оценил актуальность вопроса и предложил откорректированный алгоритм укладки двух кратных габаритов высоты, который обеспечивает последовательность послойного размещения наиболее габаритных тяжелых грузов [8].

В работе [9] рассмотрены вопросы снижения транспортных затрат за счет выбора оптимального типа поддона при перевозке строительных грузов. Для снижения транспортных затрат предложено на этапе подготовки груза к отправке учитывать тип поддона.

Авторами С. Ю. Фирсовой, А. В. Куликовым и Б. С. Советбековым были определены оптимальное количество пакетов с яблоками на платформе и минимальное число платформ (ездок), необходимых для перевозки всего объема яблок [9].

В исследовании [10] обоснованы преимущества формирования транспортных пакетов при перевозке скоропортящихся грузов.

Таким образом, выбор тары может быть сформулирован как поиск наиболее рационального решения в области увеличения массы партии груза [5 – 12]. Однако перечисленные выше работы не полностью представляют решение вопросов влияния параметров груза на тару и транспортное средство.

В соответствии с рекомендациями Международной организации по вопросам стандартизации ИСО, решениями Европейской федерации упаковки, Международного железнодорожного союза и других организаций в качестве модуля унификации тары принят поддон размером 800×1200 мм. В соответствии с этим модулем составлен унифицированный ряд чисел с наружными размерами транспортной тары:

1200	1000	720	560	400	300	228
1143	960	685	532	360	285	200
1120	900	667	500	353	280	150
1080	885	643	465	333	266	133
1065	800	600	435	320	250	120
1023	748	571	424	311	240	100

Количество унифицированных чисел равняется 42, а сочетания параметров правильного параллелепипеда составляет 3 (длина, ширина и высота). В соответствии с этим можно определить количество сочетаний:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}, \quad (1)$$

где n – количество унифицированных чисел;

m – размеры правильного параллелепипеда, $m = 3$.

$$C_{42}^3 = \frac{42!}{3!(42-3)!} = 11480.$$

На основании унифицированного ряда можно составить 11480 сочетаний.

В настоящее время существует несколько тысяч разных способов укладки грузов в тару, но наиболее часто используется не более 10 – 15 способов. В настоящей статье рассмотрены способы расчета укладки грузов на поддон по методу профессора О. Б. Маликова, предложенному в работе «Развитие пакетных перевозок на поддонах». В данном исследовании приводятся шесть способов укладки грузовых единиц на стандартный поддон с размерами 1200×1000 мм и 1200×800 мм. Внимание сосредоточено на тарно-штучных грузах с формой правильного прямоугольного параллелепипеда. В данной работе предлагается укладывать тарно-штучные грузы различными способами, т. е. переворачивая на любую сторону.

1. Длинная сторона груза укладывается вдоль длины поддона, докладки при этом нет:

$$R_1 = \varepsilon\left(\frac{a}{\alpha}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{b}{\beta}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{c}{\delta}\right), \quad (2)$$

где a, b, c – параметры транспортного пакета: длина, ширина и высота;

α, β, δ – параметры унифицированной тары: длина, ширина и высота;

$\varepsilon(\dots)$ – обозначение целой части числа, получающегося в результате выполнения действий в скобках указывается округление в меньшую сторону до целого числа.

2. Короткая сторона груза укладывается вдоль длины поддона, докладки нет:

$$R_2 = \varepsilon\left(\frac{a}{\beta}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{b}{\alpha}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{c}{\delta}\right). \quad (3)$$

3. Длинная сторона груза укладывается вдоль длины поддона, а высота – вдоль его ширины:

$$R_3 = \varepsilon\left(\frac{a}{\alpha}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{b}{\delta}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{c}{\beta}\right). \quad (4)$$

4. Длинная сторона грузов укладывается вдоль ширины поддона, а высота – вдоль его длины.

$$R_4 = \varepsilon\left(\frac{a}{\delta}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{b}{\alpha}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{c}{\beta}\right). \quad (5)$$

5. Длинная сторона грузов укладывается вдоль высоты поддона, а ширина – вдоль его высоты:

$$R_5 = \varepsilon\left(\frac{a}{\beta}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{b}{\delta}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{c}{\alpha}\right). \quad (6)$$

6. Высота грузов укладывается вдоль длины поддона, а длина – вдоль его высоты:

$$R_6 = \varepsilon\left(\frac{a}{\delta}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{b}{\beta}\right) \cdot \varepsilon\left(\frac{c}{\alpha}\right). \quad (7)$$

Далее нужно определить i -способ укладки грузовых единиц на поддон, при котором обеспечивается максимальное количество грузов в транспортные пакеты:

$$R_{ис} = \max_{i=1,6} \{R_i\}. \quad (8)$$

Общую массу грузов, уложенных на поддон, можно определить по формуле, кг:

$$G = N_{ис} \cdot g, \quad (9)$$

где g – масса груза, кг (в работе груз независимо от размеров тары во всех случаях имеет одну массу, это объясняется объемной массой грузов).

Коэффициент заполнения поддона грузовыми единицами определяется по формуле:

$$f = \frac{R_{ис} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \delta}{a \cdot b \cdot c}. \quad (10)$$

Результаты анализа укладки грузов на поддон приводятся в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение вместимости поддонов с различными параметрами (фрагмент таблицы)

Параметры груза (длина, ширина и высота)			Параметры поддона: 1200 × 1000 мм			Параметры поддона: 1200 × 800 мм		
α , мм	β , мм	δ , мм	$R_{ис}$, шт.	G , кг	f	$R_{ис}$, шт.	G , кг	f
720	280	120	40	1000	0,62	40	1000	0,78
600	285	133	56	1400	0,82	48	1200	0,87
500	266	250	40	1000	0,85	30	750	0,80
600	424	100	60	1500	0,98	48	1200	0,98
600	333	150	48	1200	0,92	32	800	0,77
1000	424	150	24	600	0,98	15	375	0,76
311	285	266	48	1200	0,73	48	1200	0,91
333	532	400	18	450	0,82	12	300	0,68
720	300	200	24	600	0,66	24	600	0,83
800	250	200	30	750	0,77	30	750	0,96

По данным таблицы 1 видно, что тарно-штучный груз с различными параметрами, укладываемый на поддон с размерами 1200 × 800 мм, использует площадь в среднем на 80 %, а на поддон с параметрами 1200 × 1000 мм укладывается больше грузовых единиц.

Параметры поддонов с размерами 1200 × 1000 мм и 1200 × 800 мм и внутренние размеры крытых вагонов и контейнеров не кратны между собой и не имеют общего модуля.

На железнодорожном транспорте пакетированные грузы обычно перевозят в крытых вагонах или контейнерах. Размещение пакетированных грузов в крытых вагонах можно определить по формуле:

$$N_{пак} = N_L \cdot N_B \cdot N_H, \quad (11)$$

где N_L – число поддонов по длине вагона.

Общее число поддонов с грузом в вагоне (рисунок 1) можно определить по формуле:

$$N_L = \varepsilon \left\{ \frac{L_{ваг} - L_{дв}}{b + 40} \right\}, \quad (12)$$

$L_{ваг}$ – длина вагона, мм;

$L_{дв}$ – длина дверного проема, мм;

b – ширина поддона, мм;

40 – зазор между поддонами, мм;

N_B – число поддонов по ширине вагона,

$$N_B = \varepsilon \left\{ \frac{B_{\text{ваг}}}{a + 40} \right\}, \quad (13)$$

$B_{\text{ваг}}$ – ширина вагона, мм;

a – длина поддона, мм;

N_H – число поддонов по высоте:

$$N_H = \varepsilon \left\{ \frac{H_{\text{ваг}}}{C_{\Pi}} \right\}, \quad (14)$$

здесь $H_{\text{ваг}}$ – высота вагона, мм;

C_{Π} – высота транспортного пакета, мм;

$\varepsilon\{\dots\}$ – обозначения целой части числа, получающегося в результате выполнения действий в скобках.

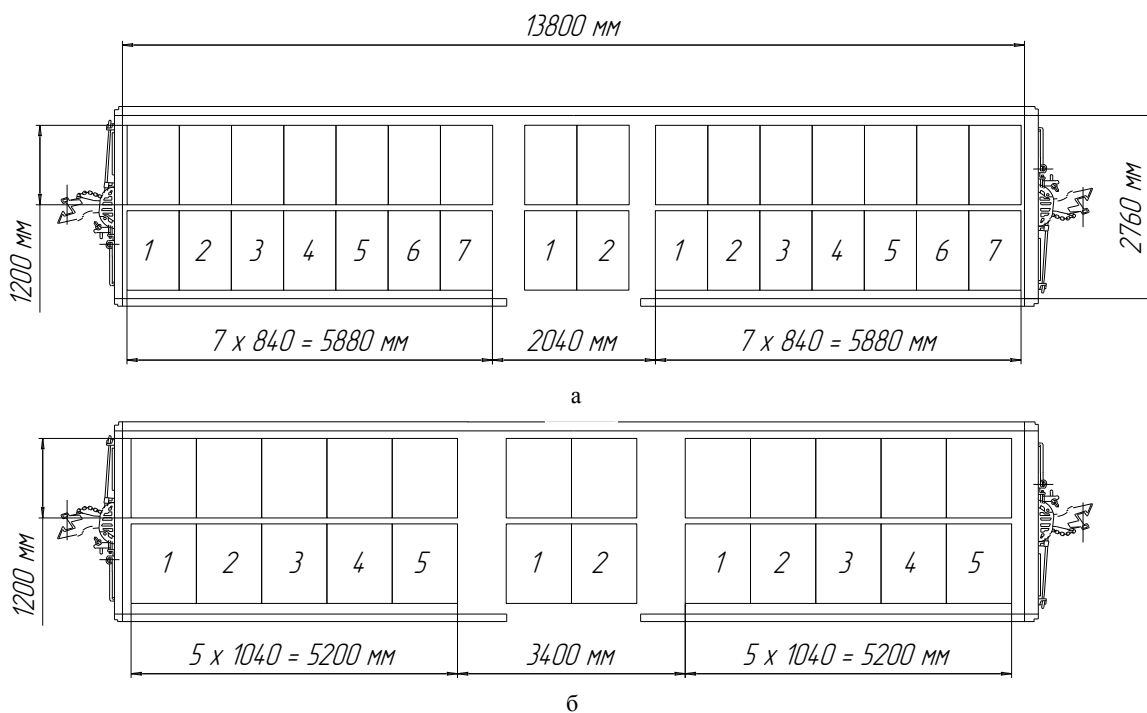


Рисунок 1 – Размещение транспортных пакетов в крытых вагонах на поддонах размерами 1200×800 мм (а) и 1200×1000 мм (б)

В контейнерах поддоны размещаются в один ярус двумя рядами (рисунок 2) по ширине: в одном – стороной 1200 мм вдоль контейнера, а во втором ряду – стороной 800 или 1000 мм вдоль контейнера.

$$N_{\text{конт}} = \left[\varepsilon \left\{ \frac{L_{\text{конт}}}{b + 40} \right\} \cdot 1 + \varepsilon \left\{ \frac{L_{\text{конт}}}{a + 40} \right\} \right] \cdot 1 \text{ яр}, \quad (15)$$

где $L_{\text{конт}}$ – длина контейнера, мм;

40 – зазор между поддонами, мм.

При исследовании в области влияния транспортной тары на условия перевозок грузов в крытых вагонах и контейнерах было выполнено более 1000 расчетов.

Результаты анализа вместимости приводятся в таблицах 2 – 4.

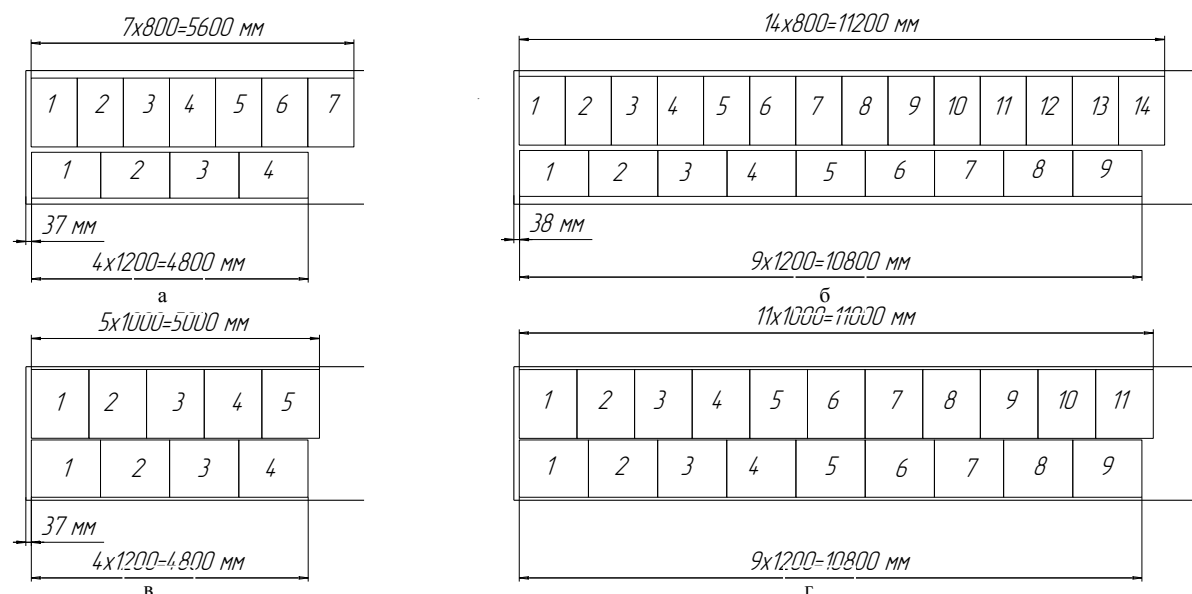


Рисунок 2 – Размещение транспортных пакетов на поддонах размером 1200 × 800 мм в 20-футовом контейнере (а), в 40-футовом контейнере (б), на поддонах размером 1200 × 1000 мм в 20-футовом контейнере (в) и в 40-футовом контейнере (г)

Таблица 2 – Сравнение вместимости крытого вагона с различными параметрами транспортной тары (фрагмент таблицы)

Параметры груза (длина, ширина и высота)			Параметры поддона: 1200 × 1000 мм		Параметры поддона: 1200 × 800 мм	
α, мм	β, мм	δ, мм	общее количество единиц, шт.	общая масса, т	общее количество единиц, шт.	общая масса, т
720	280	120	960	24,0	1280	32,0
600	285	133	1344	33,6	1536	38,4
500	266	250	960	24,0	960	24,0
600	424	100	1440	36,0	1536	38,4
600	333	150	1152	28,8	1024	25,6
1000	424	150	576	14,4	480	12,0
311	285	266	1152	28,8	1536	38,4
333	532	400	432	10,8	384	9,60
720	300	200	576	14,4	768	19,2
800	250	200	720	18,0	960	24,0

Таблица 3 – Сравнение вместимости 20-футового контейнера с различными параметрами транспортной тары (фрагмент таблицы)

Параметры груза (длина, ширина и высота)			Параметры поддона: 1200 × 1000 мм		Параметры поддона: 1200 × 800 мм	
α, мм	β, мм	δ, мм	общее количество единиц, шт.	общая масса, т	общее количество единиц, шт.	общая масса, т
720	280	120	360	9,00	440	11,0
600	285	133	504	12,6	528	13,2
500	266	250	360	9,00	330	8,25
600	424	100	540	13,5	528	13,2
600	333	150	432	10,8	352	8,80
1000	424	150	216	5,40	165	4,12
311	285	266	432	10,8	528	13,2
333	532	400	162	4,05	132	3,30
720	300	200	216	5,40	264	6,60
800	250	200	270	6,75	330	8,25

Таблица 4 – Сравнение вместимости 40-футового контейнера с различными параметрами транспортной тары (фрагмент таблицы)

Параметры груза (длина, ширина и высота)			Параметры поддона: 1200 × 1000 мм		Параметры поддона: 1200 × 800 мм	
α, мм	β, мм	δ, мм	общее количество единиц, шт.	общая масса, т	общее количество единиц, шт.	общая масса, т
720	280	120	800	20,0	920	23,0
600	285	133	1120	28,0	1104	27,6
500	266	250	800	20,0	690	17,2
600	424	100	1200	30,0	1104	27,6
600	333	150	960	24,0	736	18,4
1000	424	150	480	12,0	345	8,62
311	285	266	960	24,0	1104	27,6
333	532	400	360	9,00	276	6,90
720	300	200	480	12,0	552	13,8
800	250	200	600	15,0	690	17,2

Сравнение вместимости крытого вагона с различными параметрами транспортной тары показывает, что вместимость общих грузовых единиц и, соответственно, грузоподъемность обеспечиваются при использовании поддонов с размерами 1200 × 800 мм.

По данным таблиц 3 и 4 видно, что вместимость общих грузовых единиц в контейнеры обеспечивается при использовании поддонов с размерами 1200 × 1000 мм.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Анализ параметров тары, контейнеров, вагонов и отдельных штучных грузов позволяет правильно проанализировать и разработать технологию перегрузочного процесса и складских работ, а также выбрать наиболее подходящие варианты в организации перевозок.

2. Расчеты по выбору рациональной тары достаточно просты, однако эти расчеты позволяют быстро рассматривать различные варианты в зависимости от всех параметров, влияющих на условия перевозок.

3. В дальнейшем необходимо разработать алгоритм выбора поддонов. Это позволит без лишней потери времени определить рациональную транспортную тару.

Список литературы

1. Илесалиев, Д. И. Перевозка экспортно-импортных грузов в Республике Узбекистан [Текст] / Д. И. Илесалиев, Е. К. Коровяковский, О. Б. Маликов // Известия Петербургского университета путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – СПб. – 2014. – № 3 (39). – С. 11 – 17.

2. Коровяковский, Е. К. Взаимодействие транспортных систем и применение комплексного подхода к решению основных проблем смешанных перевозок [Текст] / Е. К. Коровяковский, А. М. Симушков // Известия Петербургского университета путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – СПб. – 2012. – № 4 (34). – С. 5 – 10.

3. Маликов, О. Б. Анализ способов доставки грузов железнодорожным транспортом [Текст] / О. Б. Маликов, И. Ю. Согрин // Известия Петербургского университета путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – СПб. – 2014. – № 2 (39). – С. 53 – 58.

4. Маликов, О. Б. Логистика пакетных перевозок штучных грузов [Текст] / О. Б. Маликов, Е. К. Коровяковский, Д. И. Илесалиев // Известия Петербургского университета путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – СПб. – 2014. – № 4 (41). – С. 51 – 57.

5. Илесалиев, Д. И. Анализ существующих методов перегрузки тарно-штучных грузов на железнодорожном транспорте [Текст] / Д. И. Илесалиев, Е. К. Коровяковский // Современные проблемы транспортного комплекса России. – СПб. – 2015. – № 1 (6). – С. 38 – 42.

6. Тиверовский, В. И. Инновации в логистике за рубежом [Текст] / В. И. Тиверовский // Вестник транспорта. – М. – 2011. – № 10. – С. 33 – 38.
7. Островский, А. М. Факторы, влияющие на выбор способа перевозки груза [Текст] / А. М. Островский, Е. М. Бондаренко, Е. В. Бондаренко // Новая наука: от идеи к результату / Агентство международных исследований. – Sterlitaмак. – 2016. – № 11-2. – С. 134 – 137.
8. Барсук, И. В. Стандартизация тары и алгоритм укладки посылок в контейнер при кратной высоте посылок [Текст] / И. В. Барсук // Т-COMM: Телекоммуникация и транспорт. – М.: Медиапаблишер, 2013. – Т. 7. – № 10. – С. 14 – 16.
9. Фирсова, С. Ю. Снижение транспортных затрат за счет выбора оптимального типа поддона при перевозке строительных грузов [Текст] / С. Ю. Фирсова, А. В. Куликова // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт / Волгоградский гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2013. – Т. 6. – № 10 (113). – С. 86 – 88.
10. Фирсова, С. Ю. Технология выбора оптимального типа подвижного состава при перевозке плодово-овощной продукции от мест сбора на перерабатывающее предприятия [Текст] / С. Ю. Фирсова, А. В. Куликов, Б. С. Советбеков // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета / Кыргызско-Российский Славянский ун-т. – Бишкек. – 2014. – Т. 14. – № 12. – С. 199 – 201.
11. Сухова, И. А. Пакетирование как фактор повышения качества транспортировки скоропортящихся грузов [Текст] / И. А. Сухова, Д. А. Красникова // Научная мысль. – М.: Наука образования, 2015. – № 2. – С. 39 – 41.
12. Маликов, О. Б. Развития пакетных перевозок на поддонах [Текст] / О. Б. Маликов // Технические науки: теория и практика: Сборник материалов междунар. науч. конф. / Международный центр научно-исследовательских проектов. – М., 2014. – С. 79 – 86.

References

1. Ilesaliev D. I., Korovjakovskij E. K., Malikov O. B. Transportation of export-import cargoes in the Republic of Uzbekistan [Perevozka jeksportno-importnyh грузов v Respublike Uzbekistan]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*, 2014, no 3 (39), pp. 11 – 17.
2. Korovjakovskij E. K., Simushkov A. M. Interaction of transport systems and application of an integrated approach to solving the main problems of multimodal transport [Vzaimodejstvie transportnyh sistem i primenenie kompleksnogo podhoda k resheniju osnovnyh problem smeshannyh перевозок]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*, 2012, no 4 (34), pp. 5 – 10.
3. Malikov O. B., Sogrin I. Ju. Analysis of methods of delivery of goods by rail [Analiz sposobov dostavki грузов zheleznodorozhnym transportom]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*, 2014, no 2 (39), pp. 53 – 58.
4. Malikov O. B., Korovyakovskij E. K., Ilesaliev D. I. Logistics of package shipments of piece cargo [Logistika paketnyh перевозок shtuchnyh грузов]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*, 2014, no. 4 (41), pp. 51 – 57.
5. Ilesaliev D. I., Koroviakovskij E. K. Analysis of existing methods of reloading packaged-piece cargo in railway transport [Analiz sushhestvujushhih metodov peregruzki tarно-shtuchnyh грузов na zheleznodorozhnom transporte]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii*, 2015, no 1 (6), pp. 38 – 42.
6. Tiverovskij V. I. Innovations in logistics abroad [Innovacii v logistike za rubezhom]. *Vestnik transporta*, 2011, no 10, pp. 33 – 38.
7. Ostrovskij A. M., Bondarenko E. M., Bondarenko E. V. Factors influencing the choice of the way of transportation of cargo [Faktory, vlijajushhie na vybor sposoba перевозки груза]. *Novaja nauka: ot idei k rezul'tatu*, 2016, no 11-2, pp. 134 – 137.
8. Barsuk I. V. Standardization of packaging and the algorithm for packing packages into a container at a multiple parcel height [Standartizacija tary i algoritm ukladki posylok v kontejner pri kratnoj vysote posylok]. *T-COMM: Telekommunikacija i transport*, 2013, no 10, pp. 14 – 16.

9. Firsova S. Ju., Kulikova A. V. Reduction of transportation costs due to the choice of the optimal type of pallet for the transport of construction materials [Snizhenie transportnyh zatrat za schjot vybora optimal'nogo tipa poddona pri perevozke stroitel'nyh грузов]. *Jenergo- i resursos-berezhenie: promyshlennost' i transport*, 2013, № 10 (113), pp. 86 – 88.

10. Firsova S. Ju., Kulikov A. V., Sovetbekov B. S. The technology of choosing the optimal type of rolling stock for transportation of fruit and vegetable products from harvesting sites to a processing plant [Tehnologija vybora optimal'nogo tipa podvizhnogo sostava pri perevozke plodovo-ovoshhnoj produkcii ot mest sbora na pererabatyvajushhee predpriyatija]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossijskogo Slavjanskogo universiteta*, 2014, № 12, pp. 199 – 201.

11. Suhova I. A., Krasnikova D. A. Packaging as a factor in improving the quality of transportation of perishable goods [Paketirovanie kak faktor povyshenija kachestva transportirovki skoroportjashhihsja грузов]. *Nauchnaya mysl'*, 2015, no № 2, pp. 39 – 41.

12. Malikov O. B. Development of package transportations on pallets [Razvitija paketnyh perevozok na poddonah]. *Tehnicheskie nauki: teorija i praktika. Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Mezhdunarodnyj centr nauchno-issledovatel'skih projektov.* – Moscow, 2014, pp. 79 – 86.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Илесалиев Дауренбек Ихтиярович

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

Одылходжаева ул., д. 1, г. Ташкент, 100067, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, кафедра «Транспортная логистика и сервис», ТашИИТ.

Тел.: (+99897) 754-41-99.

E-mail: ilesaliev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ilesaliev Daurenbek Ihtiyarovich

Tashkent institute of railway engineering (TIRE).

1, Odilkhodjaev st., Tashkent, 100067, Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, department «Transport logistics and service» (TIRE).

Phone: (+99897) 754-41-99.

E-mail: ilesaliev@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Илесалиев, Д. И. Увеличение массы партии грузов за счет рационального выбора транспортной тары [Текст] / Д. И. Илесалиев // Известие Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 21 – 29.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ilesaliev D. I. Increasing the mass of the cargo party for the account of a rational choice of the transportation tack. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 1, no 33, pp. 21 – 29 (In Russian).

УДК 629.488

Ю. А. Кольцов, А. В. Скребков

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы возможности оптимизации производства технического обслуживания и ремонта электровозов. Одной из главных задач оптимизации периодичности технического обслуживания и ремонта является получение экономического эффекта с сохранением высокой надежности оборудования подвижного состава. Для получения экономического эффекта необходимо исследовать все возможные факторы, влияющие на работу подвижного состава в конкретных условиях эксплуатации. Их воздействие оказывает прямое влияние на надежность подвижного состава.

Ключевые слова: железная дорога, надежность, электровоз ЭП20, межремонтный пробег, эксплуатационные показатели.

Yuriy A. Koltsov, Alexey V. Skrebkov

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

ASSESSMENT OF OBSERVED RELIABILITY MEASURES OF LOCOMOTIVE EQUIPMENTS

Annotation. *One of the main tasks of optimizing the periodicity of maintenance operation and repairs is to obtain an economic effect with the preservation of high reliability of rolling stock equipment. To obtain an economic effect, it is necessary to conduct an investigation all possible factors affecting the operation of rolling stock under specific operating conditions. Their influence has a direct impact on the reliability of rolling stock.*

Keywords: *railway, reliability, electric EP20 locomotive, repair interval, operating standards.*

Для решения задачи оценки эксплуатационных показателей безотказности оборудования электровозов серии ЭП20 с целью дальнейшей оптимизации периодичности технического обслуживания и ремонтов была рассмотрена информация об отказах данных локомотивов, приписанных к депо Москва-Сортировочная Московской дирекции тяги, эксплуатирующихся преимущественно в европейской части России. Электровоз ЭП20 является технически сложным видом подвижного состава, ввиду чего подходить к оптимизации технического обслуживания и ремонта необходимо, опираясь только на достоверную информацию о его отказах.

Мониторинг состояния подвижного состава – это наблюдение за техническим состоянием оборудования для установления и прогнозирования момента его перехода в неработоспособное состояние. Это возможно посредством регулярного диагностирования в определенных временных интервалах, которые значительно меньше интервала работоспособного состояния.

Результатом мониторинга свойств эксплуатируемых электровозов являются нормативно-технические документы, которые содержат технологические нормативы для электровозов согласно аспектам конструктивной безопасности. Создание данных нормативно-технических документов выполняется на базе сбора информации о безотказности транспортных средств при разных обстоятельствах эксплуатации. Сбор и обработка этой информации в процессе выполнения мониторинга технического уровня, безопасности и иных потребительских свойств производится на протяжении всего периода эксплуатации.

В процессе эксплуатации информация о техническом состоянии оборудования электровозов накапливается в первичной учетной документации, что позволяет использовать ее для расчетов эксплуатационных показателей надежности. В качестве же исходных данных используются наработки между отказами оборудования, зафиксированные в книге формы ТУ-29 – «Книга повреждений и неисправностей локомотивов, моторвагонного подвижного состава и их оборудования». Наиболее подходящим показателем безотказности для анализа надежности в этом случае является параметр потока отказов $\omega(t)$ [1].

Согласно ГОСТ Р 54461-2011 параметр потока отказов составной части единицы тягового подвижного состава – отношение числа отказов совокупности одноименных составных частей единиц тягового подвижного состава за определенный достаточно малый интервал наработки к суммарной величине их наработки в этом интервале.

Данный показатель безотказности характеризует количество отказов одноименного оборудования, приходящееся на один его экземпляр в единицу (или интервал) наработки. Так как объем информации о наработках оборудования между отказами ограничен моментом проведения очередного планового ремонта, целесообразно для более точной оценки параметра потока отказов использовать группирование числа отказов в интервалах наработки. Это позволяет исключить ошибки в расчетах, связанные с конечным объемом выборки наработок до отказа.

Оценка величины параметра потока отказов $\omega^*(\Delta L)$ в интервале наработки ΔL осуществляется по формуле:

$$\omega^*(\Delta L) = \frac{\Delta m}{N(l)\Delta L},$$

где Δm – количество отказов одноименного оборудования в интервале наработки ΔL ;

$N(l)$ – общее количество одноименного оборудования, находящееся в эксплуатации в интервале наработки ΔL .

На практике величина $N(l)$ является функцией наработки, т. е. в каждом интервале она может быть различна, так как исходная информация имеет усечение и слева и справа.

Указанное замечание существенно влияет на достоверность получаемого результата. Так, например, резкое увеличение параметра потока отказов в последнем интервале может быть вызвано не только значительным увеличением количества отказов, но и резким уменьшением количества эксплуатируемого оборудования из-за его выбывания на плановые ремонты.

Оценив величину параметра потока отказов в различных интервалах наработки, можно построить диаграмму параметра потока отказов, характер которой позволит сделать вывод об изменении надежности рассматриваемого в расчете оборудования.

Для большей части оборудования электровозов невозможно определить контролируемые параметры, в связи с этим показатели безотказности такого оборудования оценивают по информации о наработках до отказа. Информация о случившихся отказах накапливается в рамках принятой системы ремонта и обслуживания подвижного состава, поэтому возможно реализовать план испытаний на надежность N , U , L_0 , когда наблюдение за N экземплярами оборудования одной классификации осуществляется в течение межремонтной наработки L_0 , а отказавшее оборудование необходимо исключить из наблюдения.

Реализованные межремонтные пробеги L_0 электровозов – величина случайная, поскольку допускается их отклонение от установленного значения на $\pm 20\%$ для равномерной загрузки ремонтных предприятий, а также исключения локомотивов из инвентарного парка [2].

Для оборудования электровозов ЭП20 локомотивного депо Москва-Сортировочная были получены диаграммы потока отказов, представленные на рисунках 1 – 6.

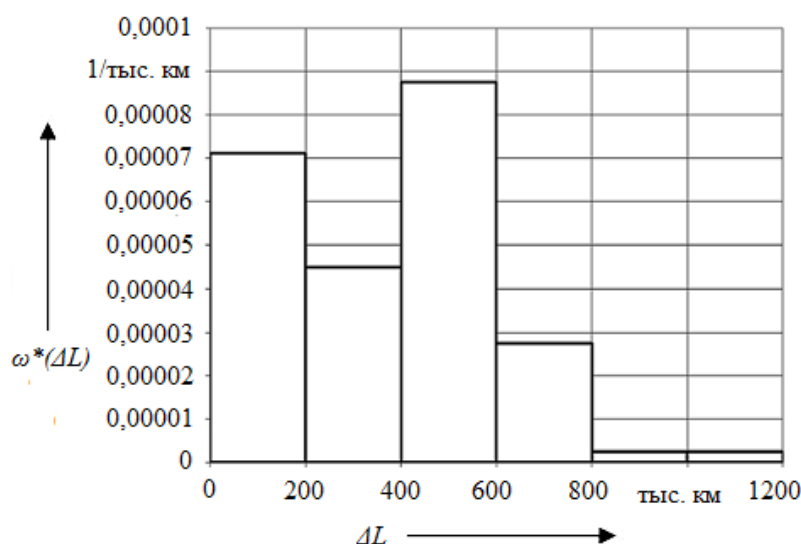


Рисунок 1 – Диаграмма параметра потока отказов антивилятельных гасителей колебаний

Анализируя полученную диаграмму, можно заметить тенденцию к уменьшению отказов антивилятельных гасителей колебаний, следовательно, их надежность при существующих нормах межремонтных пробегов не ухудшается и, соответственно, проведение плановых ремонтов этого вида оборудования нецелесообразно.

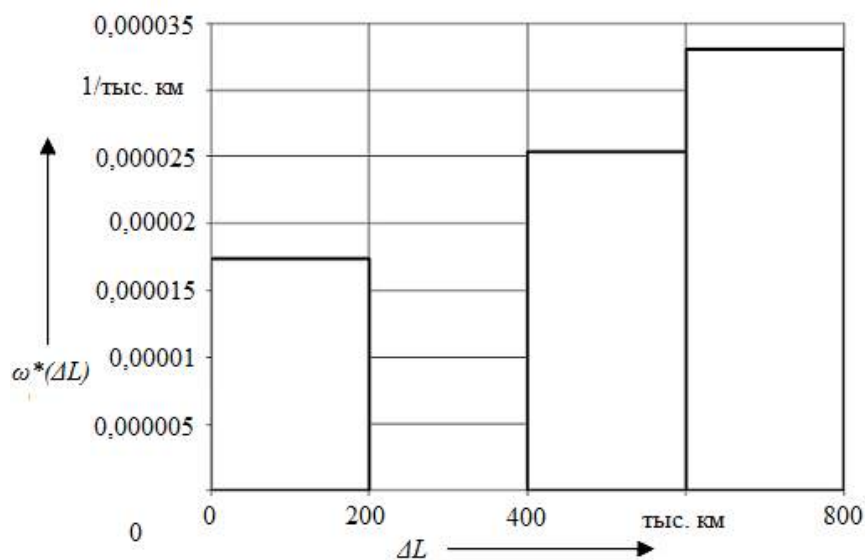


Рисунок 2 – Диаграмма параметра потока отказов буксовых гасителей колебаний

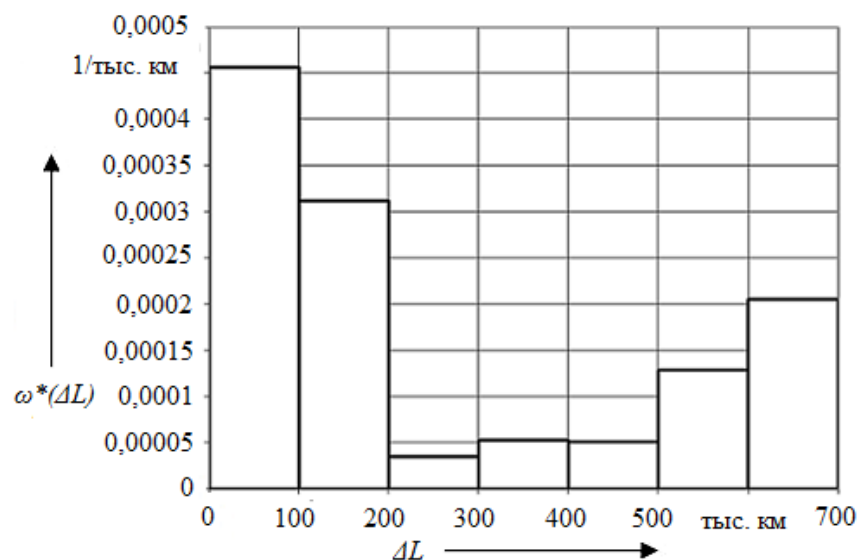


Рисунок 3 – Диаграмма параметра потока отказов кузовных гасителей колебаний

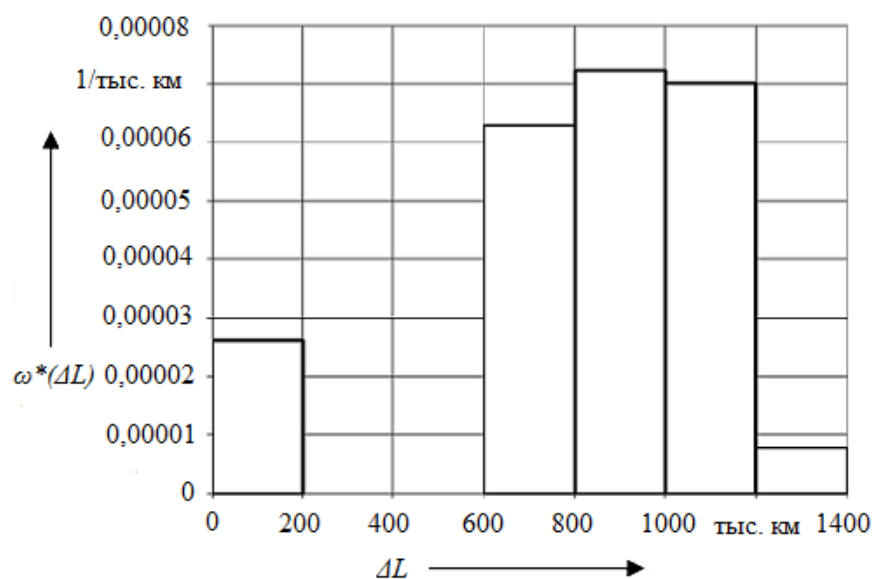


Рисунок 4 – Диаграмма параметра потока отказов буксовых подшипников

Полученная диаграмма параметра потока отказов для буксовых гасителей колебаний имеет тенденцию к возрастанию, поэтому имеет смысл в проведении плановых ремонтов при установленных нормах межремонтных пробегов.

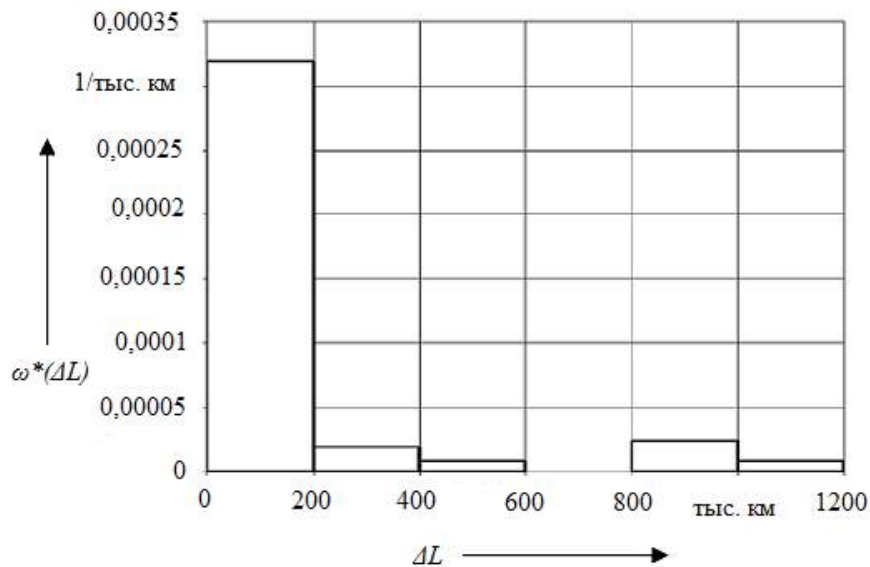


Рисунок 5 – Диаграмма параметра потока отказов колесных пар по причине выщербин на поверхности катания

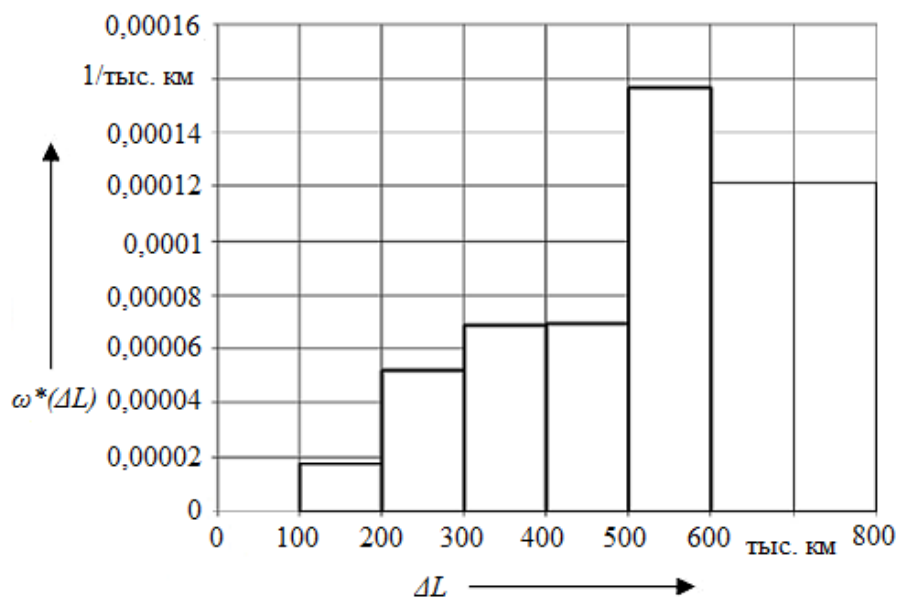


Рисунок 6 – Диаграмма параметра потока отказов стопорных планок

Диаграмма параметра потока отказов кузовных гасителей колебаний позволяет сделать вывод об ухудшении их технического состояния к моменту проведения очередного планового ремонта, следовательно, его момент проведения выбран обоснованно. Однако резкое увеличение параметра потока отказов в последнем интервале может быть вызвано не только значительным увеличением количества отказов, но и резким уменьшением количества эксплуатируемого оборудования из-за его выбывания на плановые ремонты.

Зависимость параметра потока отказов буксовых подшипников, представленная на рисунке 4, также имеет тенденцию к возрастанию с увеличением наработки. При этом резкий спад зависимости в последнем интервале обусловлен недостаточным количеством информации об отказах при такой наработке из-за того, что ее еще не достигли большинство рассматриваемых электропоездов. Таким образом, можно заключить, что норма межремонтного пробега для буксовых подшипников соответствует их фактической надежности.

Из диаграммы параметра потока отказов колесных пар по причине выщербин на поверхности катания, приведенной на рисунке 5, видно, что после начала эксплуатации или проведения очередного ремонта параметр потока отказов увеличивается скачком, а затем довольно быстро снижается до определенного уровня. Такой характер зависимости $\omega(l)$ обусловлен наличием скрытых дефектов в узлах и деталях или нарушением технологии изготовления и ремонта.

На диаграмме параметра потока отказов стопорных планок, приведенной на рисунке 6, четко прослеживается увеличение параметра потока отказов, что влечет за собой ухудшение технического состояния этих планок, усиление их вибрации с последующим изломом болтов, возникновение ударов, увеличение динамических усилий, а также вероятность того, что пиковые нагрузки превысят предел прочности, снизившийся вследствие старения элемента.

Исходя из полученных результатов можно заключить, что для таких узлов механической части электровозов серии ЭП20, как буксовые и кузовные гасители колебаний, буксовые подшипники, стопорные планки, межремонтные пробеги соответствуют их эксплуатационной надежности.

В то же время в рамках установленной системы технического обслуживания и ремонта не ухудшается техническое состояние антивилятельных гасителей колебаний. Следовательно, для них возможно увеличение межремонтного пробега, но его величина может быть достоверно установлена при условии дальнейшего сбора и анализа информации о возникающих отказах.

Применительно к колесным парам сделанный ранее вывод следует обязательно учитывать с целью повышения качества изготовления или ремонта цельнокатаных колес, а срок их смены целесообразно устанавливать на основе анализа процесса изнашивания поверхности катания.

Список литературы

1. Скребков, А. В. Определение оптимальной структуры ремонтного цикла электровозов в конкретных условиях эксплуатации [Текст] / А. В. Скребков: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07. – М., 2003. – 137 с.
2. Воробьев, А. А. Оценка ресурса оборудования ТПС [Текст] / А. А. Воробьев, А. В. Скребков // Мир транспорта / МИИТ. – М. – 2012. – № 5. – С. 38 – 42.
3. Воробьев, А. А. Рационализация системы ремонта ТПС [Текст] / А. А. Воробьев, А. В. Горский, А. В. Скребков // Мир транспорта / МИИТ. – М. – 2011. – № 5. – С. 64 – 68.
4. Гапанович, В. А. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава [Текст] / В. А. Гапанович, В. И. Киселев, И. К. Лакин. – М.: Ирис-групп, 2012. – 576 с.
5. Данковцев, В. Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов: Учебник [Текст] / В. Т. Данковцев, В. И. Киселев, В. А. Четвергов / УМЦ ЖДТ. – М., 2007. – 557 с.
6. Воробьев, А. А. Надежность подвижного состава: Учебник [Текст] / А. А. Воробьев / УМЦ ЖДТ. – М., 2017. – 301 с.
7. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика [Текст] / К. В. Липа, А. А. Белинский и др. / ООО «Локомотивные технологии». – М., 2015. – 212 с.
8. Хасин, Л. Ф. Экономика, организация и управление локомотивным хозяйством: Учебник [Текст] / Л. Ф. Хасин, В. Н. Матвеев. – М.: Желдориздат, 2002. – 452 с.
9. Галкин, В. Г. Надежность тягового подвижного состава: Учебное пособие [Текст] / В. Г. Галкин, В. П. Парамзин, В. А. Четвергов. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
10. Шантаренко, С. Г. Технологический аудит как инструмент обеспечения эксплуатационной надежности локомотивов [Текст] / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустян // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 4. – С. 63 – 69.

References

1. Skrebkov A. V. *Opredelenie optimal'noj struktury remontnogo cikla jelektrovozov v konkretnyh usloviyah jekspluatatsii* (Determination the optimal structure of the repair cycle of electric locomotives in specific service conditions). PhD thesis, Moscow, 2003, 137 p.
2. Vorobiev A. A., Skrebkov A. V. Assessment of life capacity of equipment of traction rolling stock [Ocenka resursa oborudovaniya TPS]. *Mir transporta – World of transport*, 2012, no. 5, pp. 38 – 42.
3. Vorobiev A. A., Gorskiy A. V., Skrebkov A. V. Rationalization of the System of Traction Rolling Stock Repairing [Racionalizacija sistemy remonta TPS]. *Mir transporta – World of transport*, 2011, no. 5, pp. 64 – 68.
4. Gapanovich V. A., Kiselev V. I., Lakin I. K. *Ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava* (Operation and maintenance of rolling stock). Moscow: «Iris group», 2012, 576 p.
5. Dankovtsev V. T., Kiselev V. I., Chetvergova V. A. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont lokomotivov* (Maintenance and repair of locomotives). Moscow, 2007, 557 p.
6. Vorobiev A. A. *Nadezhnost' podvizhnogo sostava* (Reliability of rolling stock). Moscow, 2017, 301 p.
7. Lipa K. V. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov. Teoriya i praktika* (Monitoring the technical condition and operation modes Locomotive Islands. Theory and practice). Moscow: ООО «Локомотив-TECHNOLOGIES», 2015, 212 p.
8. Hasin L. F., Matveev V. N. *Ekonomika, organizatsiya i upravlenie lokomotivnym hozyajstvom* (Economics, organization and management of locomotive economy). Moscow: Zheldorizdat, 2002, 452 p.
9. Galkin V. G., Paramzin V. R., Chetvergova V. A. *Nadezhnost' tiazhovo podvizhnogo sostava* (Dependability of locomotives). Moscow: Transport, 1981, 184 p.
10. Shantarenko S. G., Kapust'jan M. F. *Technology audit as a tool to ensure the operational reliability of locomotives* [Tehnologicheskij audit kak instrument obespecheniya jekspluatatsionnoy nadezhnosti lokomotivov]. *Izvestiya Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2011, no. 4, pp. 63 – 69.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кольцов Юрий Александрович

Российский университет транспорта (МИИТ).

Образцова ул., д. 9, строение 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: (495) 684-22-31.

E-mail: yuriy_koltsov@mail.ru

Скребков Алексей Валентинович

Российский университет транспорта (МИИТ).

Образцова ул., д. 9, строение 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: (495) 684-22-31.

E-mail: skrebkov_av@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кольцов, Ю. А. Оценка эксплуатационных показателей безотказности оборудования электропоездов [Текст] / Ю. А. Кольцов, А. В. Скребков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 29 – 35.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Koltsov Yuriy Alexandrovich

Russian University of Transport (MIIT).

Obraztsova street, 9, building 9, Moscow, 127994, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Electric trains and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: (495) 684-22-31.

E-mail: yuriy_koltsov@mail.ru

Skrebkov Alexey Valentinovich

Russian University of Transport (MIIT).

Obraztsova street, 9, building 9, Moscow, 127994, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Electric trains and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: (495) 684-22-31.

E-mail: skrebkov_av@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Koltsov Y. A., Skrebkov A. V. Assessment of observed reliability measures of locomotive equipments. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 1, no 33, pp. 29 – 35 (In Russian).

УДК 629.4.012.5:629.463:629.4.018

В. П. Клюка, И. С. Лексutow, А. А. Рауба

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

ИССЛЕДОВАНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО ДАЛЬНОМЕРА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЦЕЛЯХ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНА

Аннотация. В статье содержатся результаты исследования параметров лазерного триангуляционного датчика в контексте его применения для контроля технического состояния деталей вагона. Основной целью исследования является экспериментальное определение границ применимости датчика для контроля реальных образцов деталей грузового вагона новой конструкции на примере деталей тележки 18-9855. Экспериментальными методами установлены некоторые границы применимости датчика, его свойства и особенности применения для размерного контроля. Установлены предельно возможные углы наклона поверхности объекта при измерении расстояния на максимальных настройках быстродействия датчика, фактическая точка фокусировки излучателя. Проведен анализ полученных данных и показан пример их использования для определения оптимальных параметров портала при проектировании измерительной машины. Результаты работы можно использовать при проектировании автоматизированных систем и стендов размерного контроля деталей при производстве, ремонте и техническом обслуживании вагонов и другой техники, техническое состояние которой определяется размерами деталей.

Ключевые слова: лазерный триангуляционный датчик, размерный контроль, бесконтактные измерения.

Vladislav P. Kluka, Ilya S. Leksutov, Alexander A. Rauba

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

THE STUDY OF THE KEY PARAMETERS OF LASER TRIANGULATION RANGEFINDER FOR USE IN TECHNICAL CONTROL OF PARTS OF THE RAILWAY CAR

Abstract. This article contains results of a preliminary study of the parameters of the laser triangulation sensor in the context of its application to control of a technical condition of details of the car. The main aim of the study is the experimental determination of the limits of applicability of the sensor to monitor the real sample detail of the new design freight car on the example of 18-9855 bogie parts. By the experimental methods where established the threshold limits of applicability of the given sensor, its properties and application features for dimensional control. Also where established limit angles of the distance measurement at the maximum setting of the speed sensor, the actual focal point of the transducer. The analysis of the obtained data allowed authors to make an optimal scheme of automated measurement machine of portal type for control of the size and shape of parts of the car. The results of the work is possible to use when designing automated systems and equipment for dimensional inspection of parts during manufacture, repair and maintenance of railroad cars and other vehicles.

Keywords: laser triangulation sensor, dimensional inspection, non-contact measurement.

Многие ответственные узлы и детали вагонов для своего надежного и безаварийного использования требуют малых допусков на размеры для обеспечения требуемых зазоров в подвижных сопряжениях. От этого во многом зависят положительные улучшения по динамическим и эксплуатационным характеристикам ходовой части вагона. В условиях реализации мероприятий по повышению веса и длины грузовых поездов, увеличения скоростей движения, реализуемых для увеличения пропускной способности дороги, обеспечение надежной эксплуатации инновационных вагонов является актуальной задачей. Перспективным способом обеспечения производства ремонта вагонов качественными комплектующими является повышение эффективности технических измерений путем использования оптических бесконтактных методов автоматизированного контроля размеров деталей с записью результатов контроля в компьютерную базу данных.

Примерами успешной реализации бесконтактных методик измерений в железнодорожной отрасли могут служить разнообразные стенды для контроля размеров колесных пар и осей, оборудование с числовым программным управлением для напрессовки колесных пар на оси с применением лазерной системы контроля положения запрессовываемых деталей, лазерные профилометры стационарного и переносимого типа для контроля профиля колесной пары, стенды для контроля пружин тележки вагона. Дальномеры подобного класса используются в современной системе диагностики вагонов: «Комплекс-2» – для бесконтактного измерения геометрических параметров колесных пар на ходу поезда, подсистема комплекса «Букса» – для обнаружения сдвига буксы и многие другие технические комплексы контроля [1 – 4].

Использование оптических датчиков связано с известными трудностями, проявляющимися в зависимости получаемых результатов от характеристик поверхности объекта измерения. Исследованию этой проблемы посвящено большое количество работ. Например, в работе [5] производится оценка влияния размеров и формы объекта измерения на точность получаемых результатов. В работе [6] делается анализ применимости сканирующей бесконтактной системы на основе триангуляционного сенсора для измерения размеров и допусков для деталей с разнообразными формами поверхностей. Оптический сенсор применяется совместно с датчиком касания на координатной измерительной машине. Такой метод сравнения и анализа показаний датчика представляется наиболее точным, однако напрямую сравнивать показания контактного датчика касания и бесконтактного датчика нельзя, так как существует принципиальное отличие в физической природе двух видов измерений и методик обработки результатов. Кроме того, координатная измерительная машина является редким и дорогим инструментом, и методика исследований, построенная на ее использовании, будет слабовоспроизводимой. Поэтому для построения широко применимой методики исследования требуется предусмотреть использование только необходимого оборудования – самого оптического датчика и доступных средств измерений и регистрации.

Физической основой бесконтактных измерений триангуляционными датчиками является отражение света от поверхности тела и регистрация отраженного света датчиками с зарядовой связью. Особенностью конструкции таких регистрирующих приборов является подверженность их воздействию разнообразных по природе источников помех, что влияет на применимость и точность измерений. Исследованию этой проблемы также уделяется большое внимание учеными. Результатом научной работы [7] стало повышение точности измерений триангуляционным датчиком до 40 % путем учета свойств отражающей поверхности объекта и построения согласно этим свойствам схемы самого датчика. В работе [8] проведено исследование по применению различных типов алгоритмов фильтрации при обработке полученного сигнала с ПЗС-матрицы. Однако проектирование самого датчика следует рассматривать отдельно от вопросов его применения на практике. В обычных условиях современный триангуляционный датчик приобретает как модуль с цифровым интерфейсом, в котором уже реализован алгоритм фильтрации и обработки сигнала. С этой позиции следует рассматривать датчик с применением подхода «черный ящик», который оценивает объект только по множеству входных параметров – настроек и установок датчика, входных команд управления, и выходных параметров – результатов измерений. Из исследования нужно исключить не только программное обеспечение обработки сигнала внутри датчика, но и конструкцию самого датчика. Объектом исследования разрабатываемой методики должна стать конкретная модель датчика с определенными составом комплектации, версией программного обеспечения и конфигурацией.

Одной из особенностей оптического триангуляционного датчика является его малая чувствительность к взаимному расположению измерительного прибора и контролируемого объекта. Это свойство нужно использовать для упрощения конструкции измерительных машин, создаваемых на основе таких датчиков. Поэтому важно установить пределы примене-

ния определенного типа датчика для реализации контроля деталей с конкретными оптическими характеристиками в определенных условиях.

Задачей проводимого исследования, таким образом, является экспериментальное установление ключевых характеристик лазерного триангуляционного датчика для размерного контроля основного перечня деталей, используемых при текущем ремонте грузовых вагонов актуальной конструкции. Для установления этих параметров требуется разработать и опробовать достаточно простую и доступную методику измерения и обработки полученных данных.

Рассмотрим определение свойств датчика с использованием конкретного образца детали, применяемой при ремонте вагона. Все большее распространение на сети дорог получают вагоны инновационной конструкции на тележках модели 18-9855. Детали этой тележки имеют достаточно небольшие допуски по размерам и зазоры между движущимися деталями. Так как предлагаемый к использованию метод автоматизированного измерения основан на отражении луча от поверхности детали, важно подобрать в первую очередь наиболее трудные для оптического датчика поверхности и вместе с тем наиболее типичные по своим характеристикам для этих деталей. Рассмотрим достаточно важную деталь тележки – пружину скользуна постоянного контакта (рисунок 1, а). При установке на вагон данной детали важно убедиться в ее исправности, так как ее непосредственный контроль при техническом осмотре затруднен. Колпак скользуна закрывает эту деталь, а при эксплуатации с неисправными пружинами сам колпак приходит в негодность.

Цилиндрическая пружина изготавливается из стали марки 60С2ХФА и имеет гладкую поверхность. После окраски черной краской фактура детали – глянцевая с волнами шагрени. Такая поверхность считается сложной для работы с оптическими датчиками, так как темные шероховатые поверхности слабо отражают падающий на них свет. Другую деталь (колпак скользуна) изготавливают из износостойкого чугуна марки ВЧ-120 или марки 175/125/4 [9], в отличие от пружины деталь не окрашивают. Верхняя, нижняя поверхности и выступ торцевой поверхности механически обработаны после термообработки и имеют гладкую блестящую металлическую поверхность с видимыми следами от фрезы (позиции 2 – 3 на рисунке 1, б). Необработанные поверхности имеют типичную фактуру для деталей, полученных литьем. Часто эти поверхности покрыты слоем окалина. На обработанной поверхности встречаются пятна ржавчины.

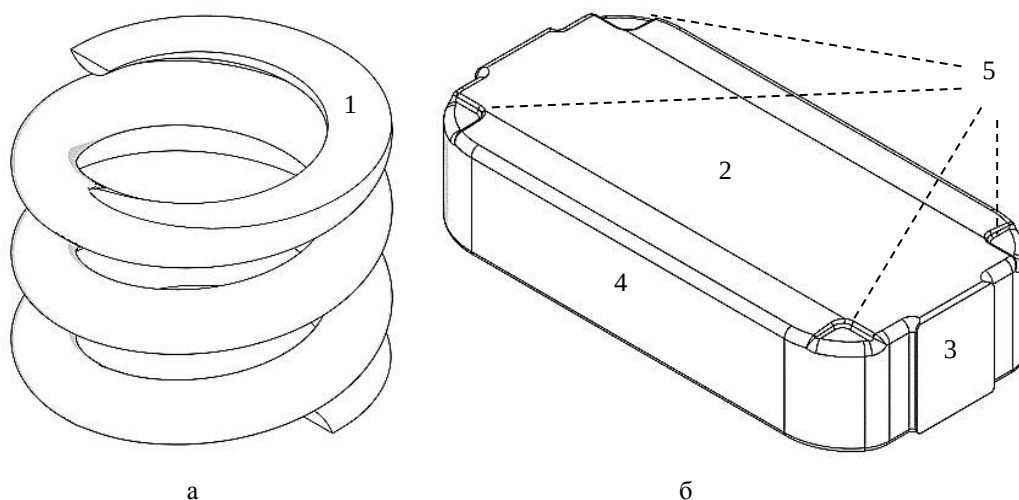


Рисунок 1 – Характерные поверхности деталей тележки для исследования (без соблюдения масштаба): а – внешняя пружина скользуна; б – колпак скользуна

Методика проведения измерений при помощи оптического датчика и программное обеспечение были рассмотрены в работе [10], где было показано, что характеристики исследуемого датчика LS5-HF-200/400 позволяют получать такие результаты измерения, которые аналогичны проводимым измерениям по регламентированным методикам при использова-

нии мерительного инструмента [11]. Однако этих сведений недостаточно, например, для начала проектирования стенда, реализующего бесконтактный метод измерений конкретной детали, поэтому исследования датчика были продолжены.

Одной из ключевых характеристик оптического датчика можно считать величину предельного угла по отношению к нормали поверхности, под которым возможно проводить измерения. Этот параметр влияет на расположение регистрирующих приборов относительно детали, кинематику относительного движения датчика относительно поверхности детали, а также точность и достоверность получаемых результатов. Для определения этой характеристики датчиков как основной были проведены экспериментальные исследования.

На рисунке 2 показана схема лабораторной установки для исследования. Работа с установкой производится в следующем порядке. Дальномер устанавливается на расстоянии, соответствующем дальней границе диапазона. В случае с исследуемым датчиком – максимальное расстояние составляет 600 мм. В ходе исследования датчик перемещается на величину x к объекту в пределах своего диапазона (400 мм). При фиксированной величине дальности измерялся угол падения лазерного луча α на исследуемую поверхность. На такой установке были исследованы показания датчика для трех наиболее характерных для деталей тележки 18-9855 поверхностей (по своим оптическим свойствам), приведенные на рисунке 1 (позиции 1, 3 и 4).

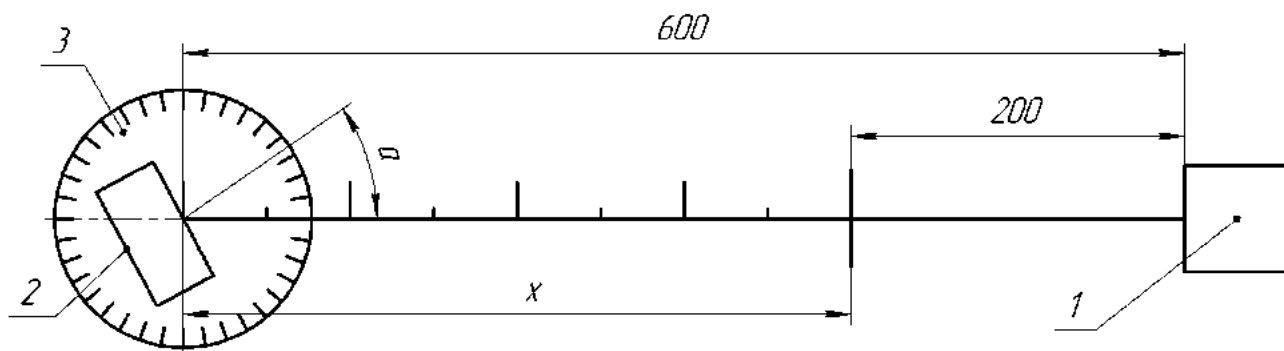


Рисунок 2 – Схема установки для исследования зависимости чувствительности датчика от угла падения лазерного луча (вид сверху): 1 – оптический датчик; 2 – объект исследования (колпак скользуна); 3 – поворотный столик

На рисунке 3 приведены экспериментальные данные и аппроксимирующая кривая, являющаяся полиномом шестой степени, показывающие зависимость пороговой чувствительности датчика от угла падения лазерного луча на горизонтальную поверхность пружины (позиция 1 на рисунке 1, а). В ходе эксперимента при фиксированном расстоянии от датчика до объекта варьировался угол взаимного расположения вертикальной поверхности пружины и продольной оси датчика. При варьировании угла отмечался момент устойчивого приема отраженного сигнала, при котором в потоке данных, поступающих по линии связи, нет пропусков, говорящих о внутренней ошибке датчика в ходе реализации цикла измерения.

Уравнение аппроксимирующей кривой зависимости предельного значения угла α от расстояния до объекта контроля x является полиномом шестой степени и имеет вид:

$$\alpha = 7 \cdot 10^{-13} x^6 - 2 \cdot 10^{-9} x^5 + 2 \cdot 10^{-6} x^4 - 8 \cdot 10^{-4} x^3 + 0,2238 x^2 - 30,929 x + 1711. \quad (1)$$

Вид кривой, на которой видны два максимума, говорит о достаточно сложном процессе взаимодействия источника и приемника излучения с поверхностью детали. Интерпретируем полученные данные исходя из того, что внутреннее устройство датчика недоступно для анализа. Как уже было сказано, горизонтальная поверхность пружины окрашена и имеет волны, размер которых больше либо равен диаметру светового пятна излучателя. Как видно из графика на рисунке 3, минимум зарегистрированной чувствительности выпадает на среднюю часть диапазона измерения датчика. Можно предположить, что это связано с особенностями

светодиодного источника излучения, применяемого в таких приборах. Размер светового пятна, проецируемого источником, заметно изменяется в пределах интересующего нас диапазона измерения и зависит от настройки и конструкции прибора. Известно о проводимых исследованиях подобных зависимостей в контексте получения оптимальных характеристик проектируемого датчика [5]. Исходя из сказанного можно сделать предположение о связи полученной кривой, характеризующей чувствительность имеющегося датчика, с настройками его источника излучения.

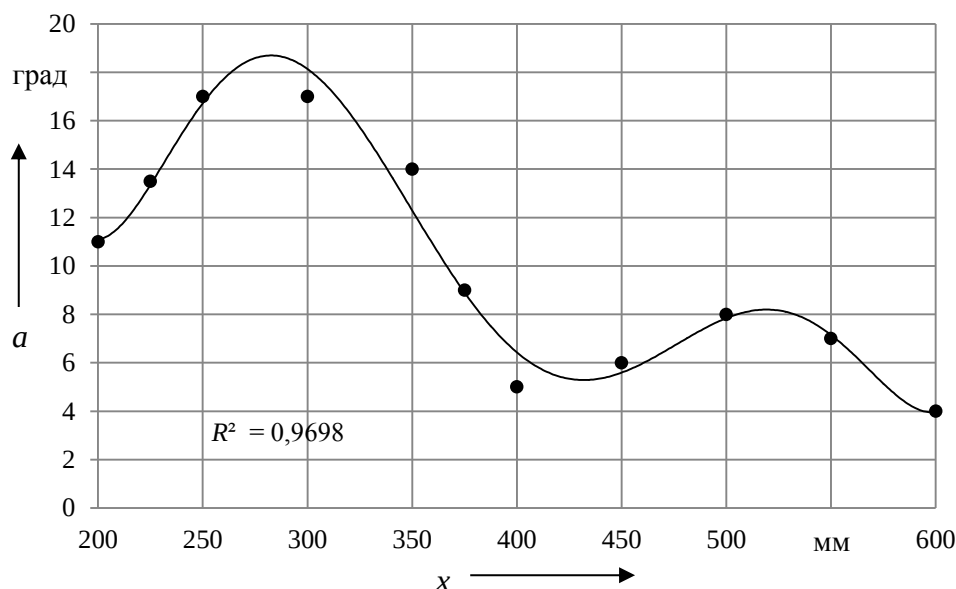


Рисунок 3 – Зависимость порога чувствительности датчика от угла падения луча к нормали поверхности

Диаметр светового пятна лазерного датчика на определенном расстоянии зависит от фокусировки коллимирующей линзы светодиодного источника излучения. Для подтверждения предполагаемой связи размеров пятна и кривой чувствительности необходимо определить реальные параметры фокусировки лазерного пучка. По имеющимся данным размер пятна для используемого датчика составляет примерно 1 мм для всего диапазона. Непосредственно измерить размеры такого пятна и их изменение в рабочем диапазоне, по мнению авторов, не представляется возможным без привлечения специального оборудования. Поэтому для косвенной оценки следует воспользоваться расчетной методикой, основанной на базовых физических принципах геометрической оптики. Результаты оценки показаны на рисунке 4, а сама методика будет описана ниже.

Продолжим интерпретацию полученных данных. Как уже было показано, локальный минимум полученной кривой чувствительности датчика находится примерно в предполагаемой точке фокуса лазерного пучка. Спад чувствительности датчика наблюдается ближе к границам диапазона, что объясняется дефектами неподвижного объектива камеры датчика (виньетирование), когда отраженный сигнал попадает на границы поля зрения объектива. Эффект падения интенсивности излучения по границам поля зрения камеры накладывается на снижение интенсивности излучения в зависимости от расстояния до объекта, что хорошо заметно по убывающей характеристике экспериментальной кривой. Для проверки предположения о связи локального минимума графика предельного угла от положения точки расположения фокуса оптики излучателя датчика была проведена еще одна серия опытов и получены данные, которые будут приведены ниже. Следует заметить, что данные получены в основном вне границ рабочего диапазона датчика, так как с использованием имеющихся средств измерения можно произвести только на большом удалении от источника излучения, а затем экстраполировать эти результаты в область, недоступную для непосредственных измерений.

Экспериментальные данные для определения фактической точки фокуса излучателя датчика показаны на рисунке 4. В ходе эксперимента измерялся диаметр светового пятна излучателя в зависимости от расстояния отдельно по горизонтальной и вертикальной осям, так как пятно имело форму эллипса. Измерения производились путем пошагового перемещения мишени-экрана от датчика фазовым лазерным дальномером с погрешностью прибора $\pm 1,5$ мм, диаметр пятна излучателя измерялся линейкой с ценой деления 1 мм. По результатам измерений построена аппроксимирующая линия по вертикальному и горизонтальному направлениям измерений.

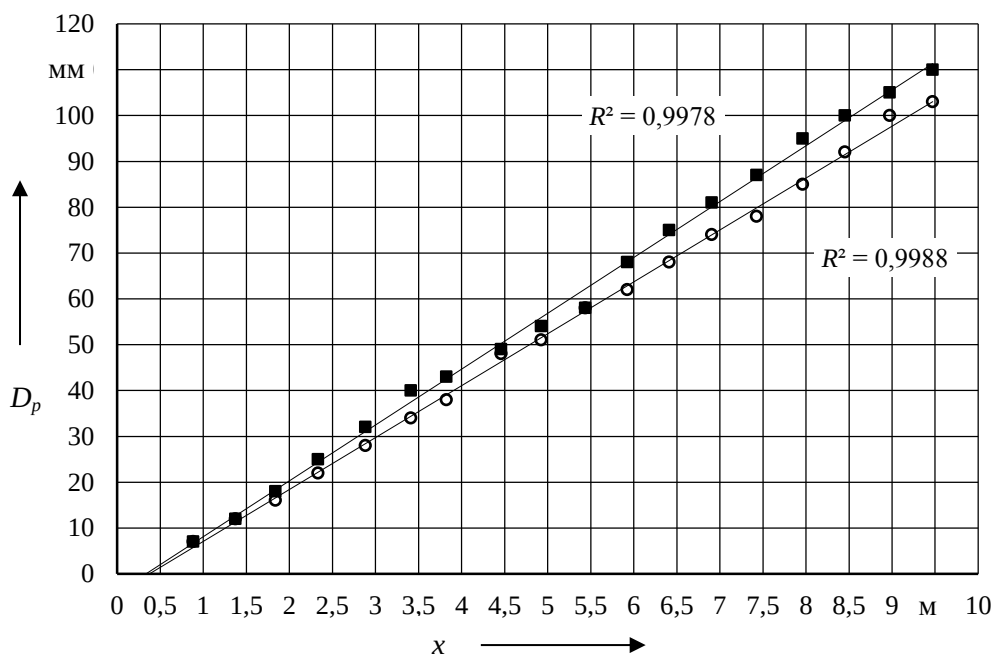


Рисунок 4 – Зависимость диаметра светового пятна излучателя датчика D_p (мм) от расстояния до объекта x (м)

Поиск точки пересечения аппроксимирующей линии с горизонтальной линией, соответствующей нулевому диаметру светового пучка, дает следующие результаты. Теоретический фокус пучка по горизонтали находится в 335 мм от датчика, этот же параметр по вертикали равен 376 мм. Среднее расстояние по двум измерениям до точки фокуса получается 356 мм. Таким образом, по экспериментальным данным теоретическая точка фокуса ненамного сдвинута к ближней границе диапазона измерения датчика. Этот факт нужно учитывать при расположении такого датчика относительно измеряемых поверхностей, так как надежность и точность измерений больше в области фокуса луча. Если при помощи такого датчика производится сканирование какой-либо поверхности с фактурой, то разрешение в области фокуса повышается, так как световое пятно может высветить более мелкие детали, не затрагивая близлежащие области.

Проанализируем полученный график предельного угла (см. рисунок 3) и соотнесем положение локального минимума с результатами определения положения точки фокуса. Когда сфокусированный луч падает на волнистую поверхность с малыми коэффициентом отражения и диффузией, определяющим становится условие – на какую из двух – восходящую или ниспадающую сторону выпуклости – упал луч либо же на горизонтальный участок поверхности между соседними волнами на поверхности, так как при одном и том же угле падения на деталь одна часть поверхности отражает в направлении приемника больше света, а другая, наоборот, меньше, вследствие чего прием сигнала становится неустойчивым. Если же луч имеет больший продольный размер, то в его поле попадает несколько впадин (выпуклостей) поверхности и сигнал становится более устойчивым (рисунок 5) благодаря получению при-

емником зеркальной части отраженного света. Так как задача эксперимента состоит в поиске условий для максимального раскрытия потенциала датчика, фиксация предельного угла происходила только при условии отсутствия пропусков в цикле измерений.

Приведем теперь результаты экспериментов для других типов поверхности детали. В качестве образца для следующей серии измерений служил колпак скользуна, у которого имеются как достаточно гладкие, блестящие, механически обработанные поверхности, так и шероховатые, серые поверхности, получающиеся после литья и термообработки. На рисунке 6 показан график зависимости предельного угла от расстояния для одной из механически обработанных поверхностей скользуна (позиция 3 на рисунке 1, б).

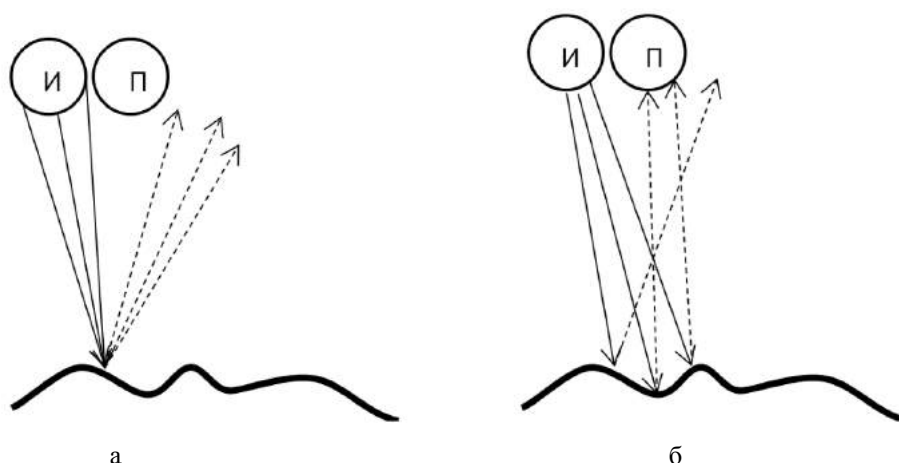


Рисунок 5 – Варианты условий падения лазерного луча оптического датчика на волнистую поверхность детали (И – источник, П – приемник излучения): а – луч сфокусирован в точке падения; б – луч расфокусирован

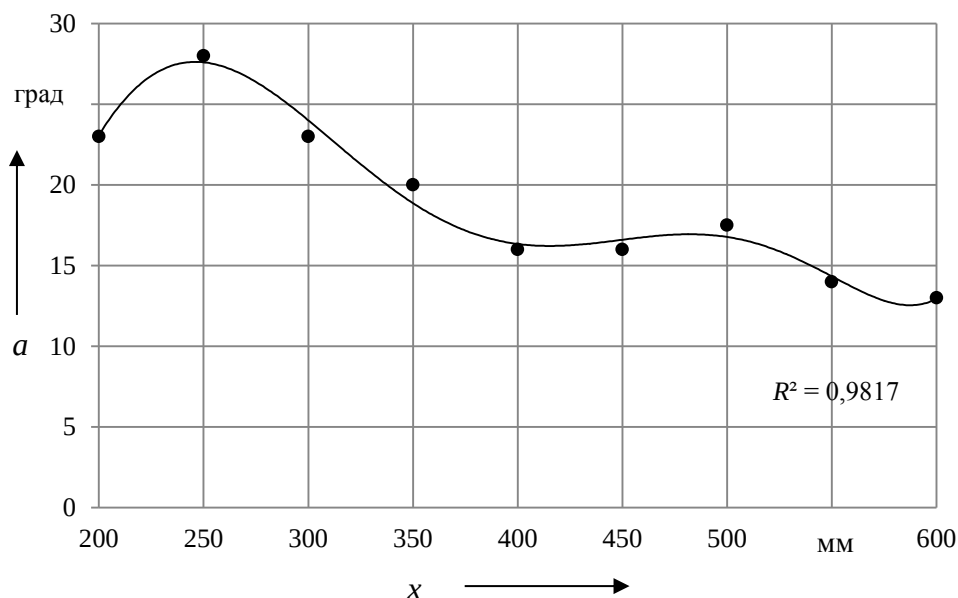


Рисунок 6 – Зависимость порога чувствительности датчика от угла падения луча к нормали поверхности 3

В случае обработанной поверхности скользуна уравнение аппроксимирующей кривой зависимости предельного значения угла a от расстояния до объекта контроля x является полиномом шестой степени и имеет вид:

$$a = 2 \cdot 10^{-13} x^6 - 5 \cdot 10^{-10} x^5 + 4 \cdot 10^{-7} x^4 - 2 \cdot 10^{-4} x^3 + 0,0289 x^2 - 1,9273 x + 1,3475. \quad (2)$$

Экспериментальный график по своему характеру практически полностью повторяет результаты, полученные для темной глянцевой поверхности, но имеет и свои особенности. Предельный угол становится в среднем больше по величине, минимумы и максимумы менее выражены. Локальный минимум предельного угла в точке фокуса сглажен. Этот факт объясняется тем, что отражательная способность блестящей поверхности выше, а величина среднего шага неровностей и местных выступов профиля шероховатой поверхности здесь меньше, чем на окрашенной поверхности пружины. Предельный угол, при том что поверхность имеет яркий металлический блеск, ненамного больше. Это объясняется тем, что относительно подавляющей зеркальной составляющей, характерной для такой поверхности индикатрисы, диффузная составляющая мала. Так как коэффициент отражения у такой поверхности велик относительно черной составляющей, то это компенсирует дисбаланс зеркальной и диффузной составляющих и незначительно повышает чувствительность датчика относительно угла падения луча.

Следующей характерной поверхностью для исследования стала боковая необработанная поверхность колпака скользуна (позиция 4 на рисунке 1, б). На рисунке 7 приведены экспериментальные данные и аппроксимирующая их кривая.

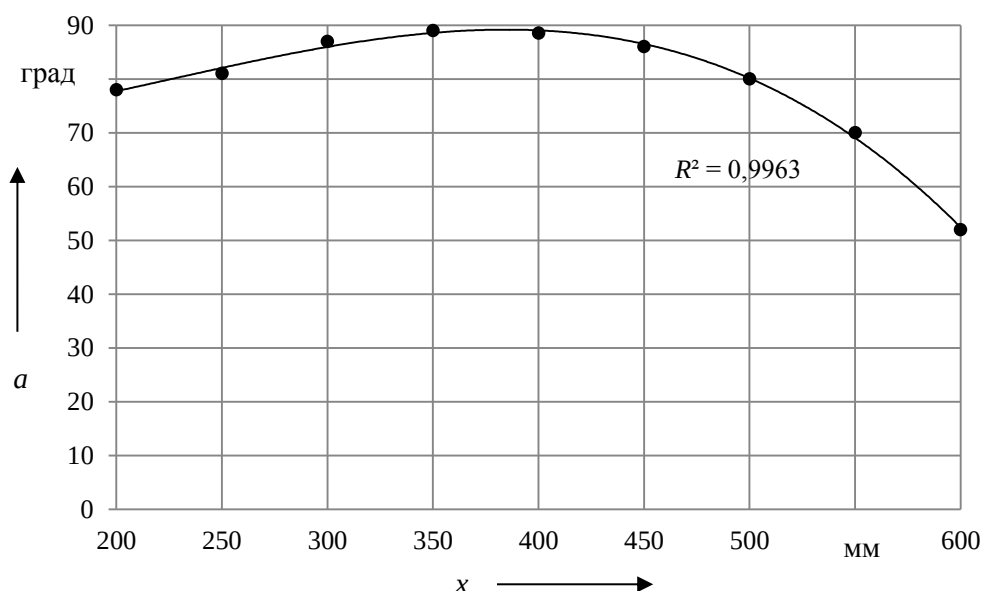


Рисунок 7 – Зависимость порога чувствительности датчика от угла падения луча к нормали поверхности 4

Для аппроксимации полученных данных достаточно полинома третьей степени:

$$a = -10^{-6}x^3 + 8 \cdot 10^{-4}x^2 - 8,47 \cdot 10^{-2}x + 73,119. \quad (3)$$

Полученные в ходе последнего исследования данные для необработанной поверхности качественно отличаются от двух предыдущих. Величина предельного угла варьируется от 50 до 88,5 градуса от нормали. Эти результаты объясняются различиями в фактуре поверхности, которая имеет высокие показатели шероховатости. Главными причинами получения таких результатов служат высота и острота выступов неровностей, их случайный характер распределения. Все это приводит к относительно небольшой зеркальной составляющей индикатрисы отражения и высокой диффузной. Как известно, идеальное диффузное отражение излучения от поверхности по интенсивности одинаково во всех направлениях относительно угла падения луча. Поэтому фактически оказалось, что для регистрирующего датчика достаточно излучения даже в случае почти параллельного направления луча источника света на поверхность. Убывающий характер кривой со сглаженным максимумом в средней части, как и в других экспериментах, предположительно показывает наложение дефекта виньетирования

оптики регистратора и падение интенсивности потока излучения с увеличением расстояния от источника.

Но имеют ли измерения под такими большими углами какой-либо практический смысл? На рисунке 8 показан вид светового пятна лазерного излучателя на необработанной поверхности скользуна для углов 81 и 88 градусов. В первом случае в вертикальном направлении размеры пятна характерны для дальнего края диапазона, но в горизонтальном направлении наблюдается сильное размытие. Для второго случая, где угол падения максимально близок к 90° , пятно дробится на несколько источников отраженного излучения разной интенсивности. При этом, хотя и нет однозначной точки падения луча, датчик продолжает измерения и бесперебойную выдачу результатов по линии связи. Этот пример показывает характерные особенности и коренные отличия бесконтактных оптических методов размерного контроля от традиционных контактных методик с использованием мерительного инструмента.

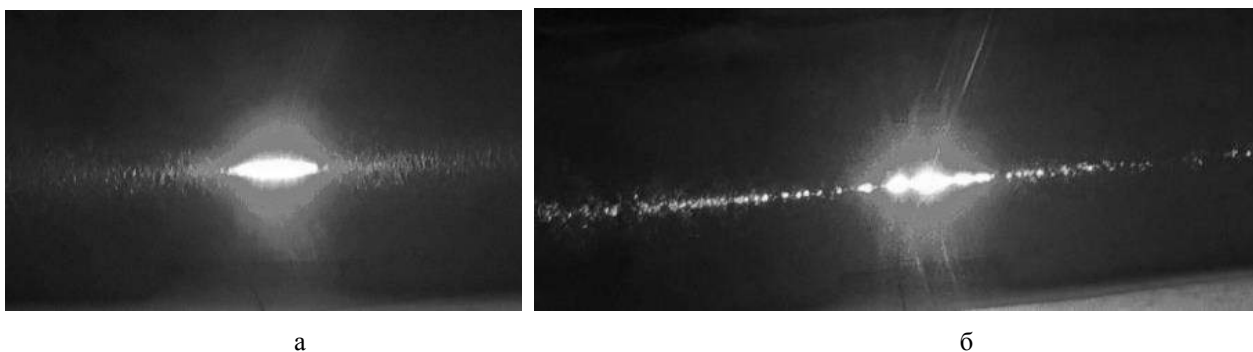


Рисунок 8 – Световое пятно излучателя датчика для углов падения к нормали 81° (а) и 88° (б)

Для подчеркивания практической значимости темы исследования рассмотрим стратегию проектирования бесконтактной измерительной машины с использованием полученных результатов и преимуществ автоматизации этого процесса. Одной из особенностей и преимуществом оптического датчика является возможность получения «облака» точек, по которому можно, например, восстановить форму поверхности детали, а для целей измерения геометрии – оценить форму и отклонения от регламентированных параметров. Получение массива точек достигается сканированием определенного объема или области пространства, где находится деталь. Известны несколько вариантов реализации сканирующего движения, заключающихся в сочетании периодических изменений координат сканирующего луча. В зависимости от решаемых задач при измерениях нужно выбрать наиболее оптимальный способ, сочетающий в себе простоту конструкции сканирующего устройства и минимальную длину следа, оставляемого лазерной меткой на поверхности детали, которая определяет производительность цикла сканирования.

Рассмотрим применение полученных в ходе исследования результатов на примере определения в ходе проектирования оптимальных параметров портальной измерительной машины, которая предназначена для контроля колпака и пружин скользуна. Согласно руководящим документам в выбранных деталях контролю подлежат высота пружин в свободном состоянии (высота наружной пружины $98^{+3,5}_{-1}$, высота внутренней пружины $110^{+3,5}_{-1}$ мм), глубина четырех индикаторных канавок на колпаке скользуна, показанных на позиции 5 рисунка 1 ($3^{+0,5}_{-0,5}$ мм). Измерения производятся штангенглубиномером, шкала которого имеет цену деления 0,1 мм. Все измерения делаются на верхней поверхности рассматриваемых деталей. С учетом этого становится возможным реализовать кинематическую схему сканирующей головки, имеющую только две степени свободы. Так как колпак скользуна вытянут вдоль своей продольной оси, одно из движений сканирующей головки следует выбрать поступательным вдоль оси во избежание больших значений углов относительно нормали к измеряемой поверхности. Поперечные размеры как скользуна, так и пружин невелики, поэтому можно ограничиться более простой в реализации схемой вращательного отклонения сканирующей головки на небольшой угол. Предложенная схема измерительной установки позволяет еще

больше упростить кинематическую схему применением другого, более дорогого лазерного датчика, в котором вращательное сканирующее движение заменено электронным сканированием. Такие приборы называют лазерными 2D-сканерами. Описание их применения выходит за рамки данной статьи.

Таким образом, исходя из требований руководящих документов и методики измерений для реализации автоматизированной измерительной машины можно воспользоваться простейшей схемой сканирующего устройства. Это устройство состоит из качающейся измерительной головки, которая перемещается вдоль своей оси поворота, сканируя расстояния до верхней поверхности деталей. Датчик захватывает дополнительно к поверхности детали поверхность предметного стола (рисунок 9) с целью получения базового расстояния для расчета размеров детали. Полученной при этом информации достаточно для оценки технического состояния объектов контроля и автоматической калибровки прибора при каждом акте сканирования, так как вместе с размерами деталей оценивается и положение датчика относительно предметного стола, на котором располагают деталь.

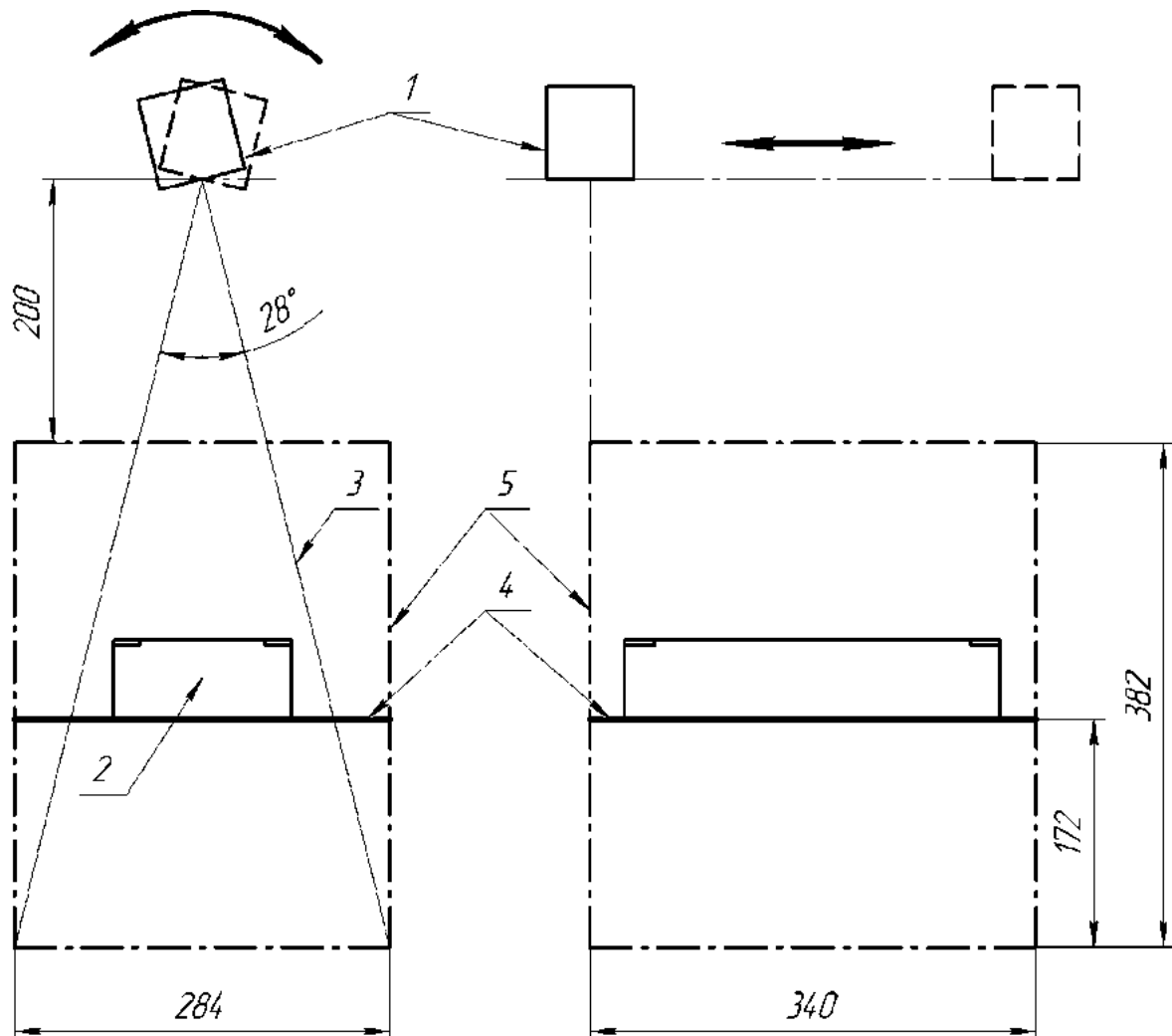


Рисунок 9 – Схема установки для бесконтактных измерений деталей скользуна: 1 – лазерный датчик (в начальном и конечном положении сканирующего движения); 2 – измеряемая деталь (колпак скользуна); 3 – крайние положения (раствор) качания сканирующего луча; 4 – поверхность предметного стола; 5 – границы портала машины (с размерами)

Согласно проведенным исследованиям предельный угол падения луча лазера для поверхности колпака скользуна составляет 28° , это определяет размеры внутреннего простран-

ства портала измерительной машины и параметры диапазона используемого датчика и объекта измерения. Для обеспечения наивысшей точности измерений сканируемые поверхности объекта располагают в области середины диапазона датчика.

Вместо предложенного поступательного движения датчика при реализации конструкции машины можно использовать движение предметного стола. Такой вариант увеличивает габариты машины за счет выдвигающегося за пределы портала стола и, кроме того, увеличивает нагрузку на опоры стола. При этом загрузка детали в машину становится более удобной. Выбор конкретного варианта реализации машины определяется конструктором. В приведенном примере предполагается проводить измерения одной детали за цикл. Если жекратно увеличить длину портала, то станет возможным измерение нескольких деталей за один цикл.

Проверим выполнение условия максимальной производительности измерений с использованием результатов, полученных ранее. На рисунке 10 показаны несколько точек (расположенных с угловым шагом $b = 1^\circ$), расстояние L до которых машина вычисляет в ходе цикла измерений при определении положения поверхностей индикаторов износа колпака скользящего. На рисунке показаны результаты проверки для одной половины симметричной детали (для оценки достаточно представленных 14 точек).

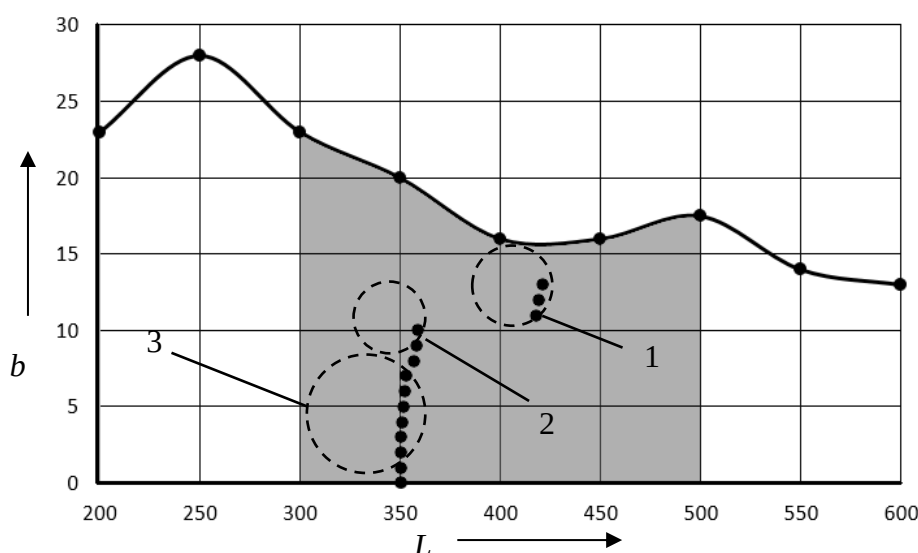


Рисунок 10 – Проверка выполнения условия максимальной производительности измерений:
1 – точки на базовой поверхности предметного стола машины; 2 – точки на поверхности индикатора износа; 3 – точки на рабочей поверхности скользящего

Согласно рисунку 10 все точки, полученные графическим способом на схеме портала, расположены в области максимальной точности и скорости измерений. Аналогично произведенным расчетам проводится оценка параметров измерительной машины для других деталей с использованием представленных экспериментальных данных. В зависимости от приоритетов при проектировании машины можно пожертвовать точностью для повышения производительности. Так, например, можно сдвинуть положение ожидаемого облака точек в сторону ближней границы диапазона, где возможно сканирование поверхности под большими углами. При проектировании машины большое значение имеют и оптические свойства поверхности предметного стола. В рассмотренном примере для стола приняты свойства, аналогичные поверхности детали. Аналогичные оценки параметров портала для целей измерения высоты пружин тоже дают приемлемые результаты без изменения положения базовой поверхности.

В рассмотренном примере при определении размеров портала учитывалась возможность измерений других деталей с использованием всего измерительного диапазона датчика, для чего предполагается настраивать высоту предметного стола в границах всей высоты портала. Еще одной важной особенностью предложенной схемы машины является

избыточность получаемой информации. Облако координат точек поверхности скользуна затрагивает области, которые не подлежат измерениям согласно действующей документации. В случае изменения этих норм машина может быть перенастроена под новые требования путем изменения программного обеспечения, без модернизации механической части. Кроме этого машина предлагаемой конструкции может быть использована для сбора информации о результатах эксплуатации деталей и анализа причин расходования их ресурса, при этом полезно анализировать изменение формы всей верхней поверхности скользуна, подверженной износу.

Таким образом, в ходе проделанной работы были исследованы свойства лазерного дальномера, не нашедшие отражения в списке его технических характеристик. Показано, что для использования одной из полезнейших особенностей датчика, возможности проведения измерений без соблюдения условий точного относительного позиционирования осей датчика относительно исследуемой поверхности образца, нужно знать численные характеристики предела наклона луча лазера относительно исследуемой поверхности. На основе выявленных предпосылок был определен один из ключевых параметров датчиков рассматриваемого класса, который позволит использовать его при проектировании автоматизированных систем размерного контроля деталей машин. Для исследования этого параметра разработана методика, позволяющая определить его как количественную и качественную характеристику для конкретной модели датчика. Выявлено, что оптический датчик сохраняет работоспособность в широком диапазоне углов падения зондирующего луча. Было установлено, что в области наибольшей точности измерений датчика (центральная часть его диапазона) в значительной мере сказывается снижение интенсивности отраженного излучения, регистрируемого в точке расположения приемника, что обусловлено природой поверхности объекта, используемого для измерений. Так как считывание сигнала в определенных условиях делается неустойчивым, снижаются скорость и точность измерений, достоверность результата вычислений размеров контролируемой детали. Несомненно, бесконтактный способ измерения имеет ряд преимуществ, но при проектировании специализированных измерительных машин и систем контроля следует учитывать выявленные особенности лазерных датчиков. В ходе исследования была разработана и опробована методика для оценки параметров фокусировки оптических триангуляционных датчиков, позволяющая установить особенности конкретных моделей и экземпляров. С использованием полученных с помощью разработанных методик результатов были определены параметры портала измерительной машины и оптимальный способ реализации сканирующего действия.

Список литературы

1. Комиссаров, А. В. Автоматизированный диагностический комплекс для измерения геометрических параметров колесных пар [Текст] / А. В. Комиссаров, К. В. Григорьев // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2011. – № 3. – С. 14, 15.
2. Лазерные триангуляционные датчики положения в промышленных системах контроля и диагностики [Текст] / А. Н. Байбаков, В. И. Ладыгин и др. // Автометрия. – 2004. – № 2. – С. 105 – 113.
3. Лазерный диагностический комплекс для контроля колесных пар вагонов на ходу поезда [Текст] / С. В. Плотников, А. Н. Байбаков и др. // Гео-Сибирь. – Новосибирск. – 2005. – Т. 6. – С. 64 – 70.
4. Современное состояние и перспективы развития измерительно-диагностических систем на железнодорожном транспорте [Текст] / А. 3. Венедиктов, О. В. Пальчик и др. // Наука и техника транспорта. – 2005. – № 4. – С. 18 – 27.
5. Вертопрахов, В. В. Влияние формы объекта и ориентации его поверхности на точность лазерных триангуляционных измерений [Текст] / В. В. Вертопрахов // Автометрия. – 1995. – № 6. – С. 64.

6. Martínez, S. Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control / S. Martínez, E. Cuesta, J. et al. Barreiro. The international journal of advanced manufacturing technology, 2010. – № 46. – p. 621 – 629.

7. Венедиктов, А. З. Методика проектирования триангуляционных измерительных систем для промышленного контроля и дефектации изношенных деталей [Текст]: Автореферат дис... канд. техн. наук: 05.11.16 / Анатолий Захарович Венедиктов. – Рязань, 2006. – 16 с.

8. Kai, L. Research on Image processing in laser triangulation system / L. Kai, W. et al. Qianqian. Journal of Physics: Conference Series. – № 1. – P. 1 – 7.

9. Руководящий документ РД 32 ЦВ 117-2011 «Тележка для грузовых вагонов колеи 1520 мм с осевой нагрузкой 245 КН (25 ТС) модели 18-9855. Руководство по плановым видам ремонта» [Текст] / ПКБ ЦВ ОАО «РЖД». – М., 2011. – 84 с.

10. Лексутов, И. С. Изучение возможности использования триангуляционных оптических датчиков для входного контроля размеров запасных частей при текущем ремонте вагонов / И. С. Лексутов, Ю. А. Гольнева, О. А. Евдокимова // Материалы III междунар. науч.-практ. конф. «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта» / Донецкий национальный университет. – Донецк, 2017. – С. 43 – 47.

11. Руководящий документ РД 32 ЦВ 119-2011 «Методика выполнения измерений параметров узлов и деталей при проведении ремонта тележек модели 18-9855» [Текст] / ПКБ ЦВ ОАО «РЖД». – М., 2011. – 17 с.

References

1. Komissarov A. V., Grigoriev K. V. Automated diagnostic complex for measuring geometrical parameters of wheel sets [Avtomatizirovannyi diagnosticheskiy kompleks dlya izmereniya geometricheskikh parametrov kolesnykh par]. *Wagons and wagon facilities*, 2011, no. 3, pp. 14 – 15.

2. Baibakov A. N., Baibakov A. N., Ladygin V.I., et al. Laser triangulation position sensors in industrial control and diagnostic systems [Lazernyye triangulyatsionnyye datchiki polozheniya v promyshlennykh sistemakh kontrolya i diagnostiki]. *Avtometriya*, 2004, v. 40, no. 2, pp. 105 – 113.

3. Plotnikov S. V., Baibakov A. N. and others. Laser diagnostic complex for monitoring wheel-set pairs of cars on the move of the train [Lazernyy diagnosticheskiy kompleks dlya kontrolya kolesnykh par vagonov na khodu poyezda]. *Geo-Siberia*, 2005, v. 6, pp. 64 – 70.

4. Venediktov A. Z., Palchik O. V., et al. Current state and prospects for the development of measuring and diagnostic systems in railway transport [Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya izmeritelno-diagnosticheskikh sistem na zheleznodorozhnom transporte]. *Science and technology of transport*, 2005. no 4, pp. 18 – 27.

5. Vertoprahov V. V. Influence of the shape of an object and the orientation of its surface on the accuracy of laser triangulation measurements [Vliyaniye formy obyekta i oriyentatsii ego poverkhnosti na tochnost lazernykh triangulyatsionnykh izmereniy]. *Avtometriya*, 1995, no 6, p. 64.

6. Martínez, S., Cuesta, E., Barreiro, J. et al. Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control Int J Adv Manuf Technol (2010) 46:621–629 DOI 10.1007/s00170-009-2106-8.

7. Venediktov A. Z. *Metodika proyektirovaniya triangulyatsionnykh izmeritelnykh sistem dlya promyshlennogo kontrolya i defektatsii iznoshennykh detaley* (Methodology of designing triangulation measuring systems for industrial control and defect of worn parts). Doctor's thesis, Ryazan, 2006, 120 p.

8. Kai Liu et al 2011 Research on Image processing in laser triangulation system J. Phys.: Conf. Ser. 276 012025 DOI 10.1088/1742-6596/276/1/012025.

9. *Telezhka dlya gruzovykh vagonov kolei 1520 mm s osevoy nagruzkoy 245 KN (25 TS) modeli 18-9855 Rukovodstvo po planovym vidam remonta* (Guidance document RD 32 CV 117-2011

«Railroad bogey for freight wagons of 1520 mm with axle load of 245 KN (25 t) model 18-9855 Guide to planned repairs»). Moscow, PCBCV, 2011, 84 p.

10. Leksutov I. S., Golneva U. A., Evdokimova O. A. Study of the possibility for using optical triangulation sensors in input control of sizes of spares in current repair of wagons [Izucheniye vozmozhnosti ispolzovaniya triangulyatsionnykh opticheskikh datchikov dlya vkhodnogo kontrolya razmerov zapasnykh chastey pri tekushchem remonte vagonov]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi konferentsii «Nauchno-tekhnicheskiye aspekty kompleksnogo razvitiya zheleznodorozhnogo transporta»* (Abstracts of the Int. conference «Scientific and technical aspects of railway transport development»). Donetsk, 2017, pp. 43 – 47.

11. *Metodika vypolneniya izmereniy parametrov uzlov i detaley pri provedenii remonta telezhek modeli 18-9855* (Guidance document «Technique for measuring the parameters of assemblies and parts when repairing trolleys of model 18-9855»). Moscow, PCBCV, 2011, 17 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клюка Владислав Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-06-72.

E-mail: vklyuka@mail.ru

Лексutow Илья Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-06-72.

E-mail: Leksutov@mail.ru

Рауба Александр Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

E-mail: aleksandr_rauba@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Клюка, В. П. Исследование ключевых параметров лазерного триангуляционного дальномера для использования в целях технического контроля деталей вагона [Текст] / В. П. Клюка, И. С. Лексutow, А. А. Рауба // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 36 – 49.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kluka Vladislav Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: +7 (3812) 37-06-72.

E-mail: vklyuka@mail.ru

Leksutov Ilya Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: +7 (3812) 37-06-72.

E-mail: Leksutov@mail.ru

Rauba Alexander Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Tech. Sci., professor of the department «Technology of transport engineering and repair rolling stock», OSTU.

E-mail: aleksandr_rauba@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kluka V. P., Leksutov I. S. Rauba A. A. The study of the key parameters of laser triangulation rangefinder for use in technical control of parts of the railway car. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 2, no 34, pp. 39 – 49 (In Russian).

УДК 621.331.3.024

Б. А. Аржанников, И. А. Баева

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ СОЕДИНЕННЫХ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ НА ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКОВ, ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Аннотация. Проведен анализ влияния организации формирования соединенных грузовых поездов на пропускную способность участков железных дорог. Представлены результаты электрических расчетов системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ трех участков Свердловской и Южно-Уральской железных дорог при регулировании скорости движения поездов от 50 до 100 км/ч с различными локомотивами при пропуске двух одиночных и одного соединенного грузовых поездов с применением системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения в контактной сети, позволяющих дать оценку пропускной способности трех участков. В ходе проведения расчетов применялась разработанная уточняющая методика с применением поправочных токовых коэффициентов K_{Ixx} и $K_{Iст}$. Доказана необходимость их применения в электрических расчетах.

Ключевые слова: пропускная способность, электрифицированные участки, постоянный ток, электровазы, расчетный комплекс тягового электроснабжения «КОРТЭС», скорость движения поездов, потери и расход электрической энергии.

Boris A. Arzhannikov, Irina A. Baeva

Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, the Russian Federation,

INFLUENCE OF THE ORGANIZATION OF THE MOVEMENT OF THE UNITED FREIGHT TRAINS ON THE INCREASING OF THE CAPACITY OF THE PLOTS ELECTRIFIED ON A DC

Abstract. The analysis of the influence of the organization of the formation of United freight trains on the throughput capacity of railway sections has been carried out. The results of electrical calculations of the 3.0 kV dc power supply system of 3 sections of the Sverdlovsk and South Ural railways are presented when controlling the speed of trains from 50 km / h to 100 km / h with various locomotives while passing two single and one connected cargo trains using the system of contactless automatic voltage regulation in the contact network, allowing to assess the throughput capacity of the three sections. In the course of the calculations, the developed refinement method was applied using the correction current factors K_{Ixx} and K_{Ist} . Proved the need for their use in electrical calculations.

Keywords: carrying capacity, electrified areas, direct current, electric locomotives, KORTES traction power distribution system, train speed, losses and electric power consumption.

Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины (ПМД) на железнодорожных путях общего пользования ОАО «РЖД» (утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 1799р от 1 сентября 2016 г.) устанавливает порядок и правила обращения ПМД и соединенных поездов (СП). Организация обращения поездов СП и ПМД направлена на повышение пропускной и провозной способности [1].

В статье рассматривается влияние соединенных поездов на введенное утверждение о «повышении пропускной и провозной способности участков и направлений...».

С учетом технических и технико-экономических оценок движения поездов РФ в 2002 г. МПС приняло решение о введении унифицированных массы грузовых поездов 6000 т и длины – 71 условный вагон. Длина станционных путей некоторых станций может не разместить СП, поэтому СП может выходить на перегон за пределы выходного светофора. 25.05.2015 г. утверждена технология вождения СП на Свердловской железной дороге [2]. СП формируется с выходом за выходной светофор станции Седельниково с временем формирования 41 мин и на станции Курган перед выходным светофором с временем формирования 33 мин.

На рисунке 1 представлены фрагменты формирования СП на станции Курган. Штриховой линией показан условный обходной путь, по которому отправляются со станции на перегон одиночные поезда (ОП). Фрагмент на рисунке 1, а соответствует установке поезда 1С (первого из СП) перед выходным светофором (момент занятости перегона – начало формирования СП и момент отправления первого одиночного поезда 1ОП по обходному пути).

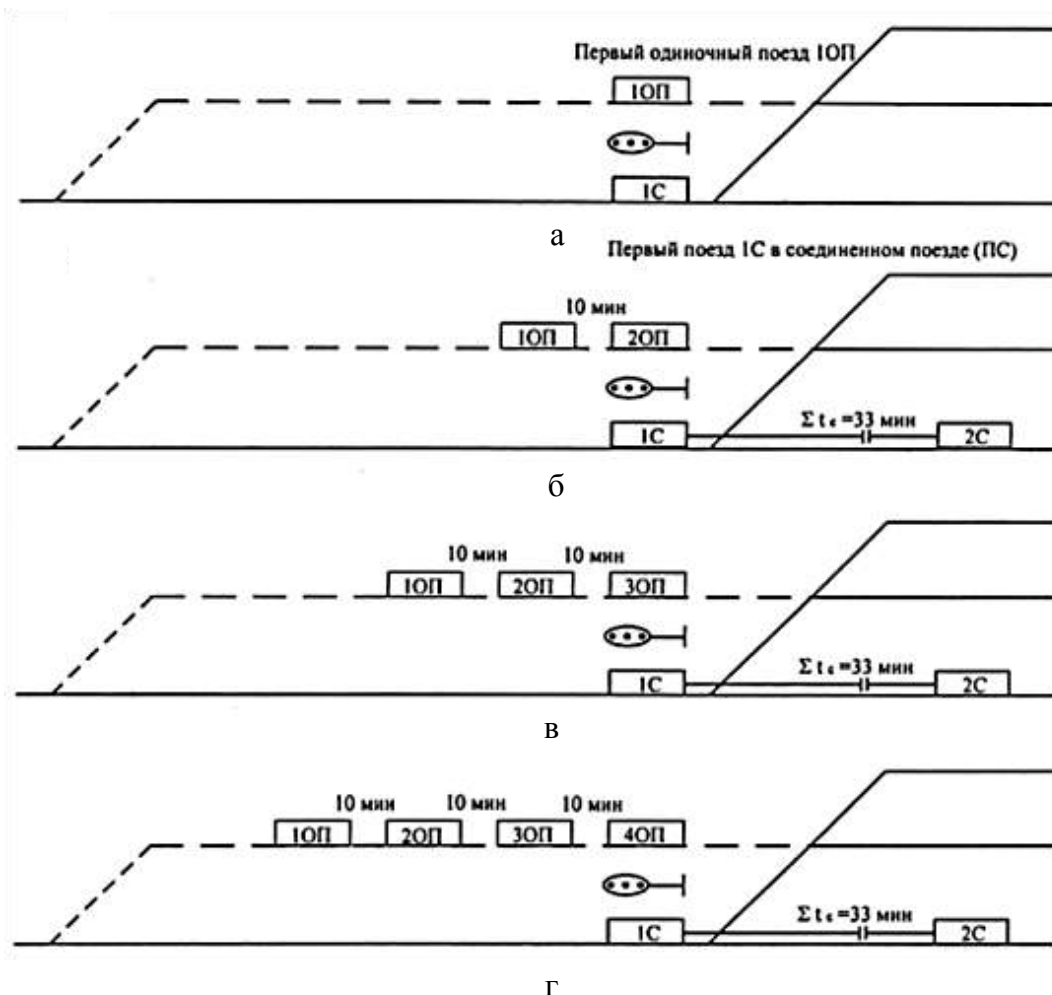


Рисунок 1 – Схемы фрагментов формирования соединенного поезда и одиночных поездов с заданным межпоездным интервалом

На рисунке 1, б по обходному пути через 10 мин после первого одиночного поезда 1ОП отправился второй одиночный поезд 2ОП. Через 30 мин формирования соединенного поезда со станции по обходному пути (рисунок 1, г) отправился 4-й одиночный поезд 4ОП, откуда сумма трех времен межпоездного интервала по 10 мин и сумма времен хода трех поездов практически соответствует времени 33 мин.

Таким образом, за время формирования и отправления одного соединенного поезда может быть отправлено четыре одиночных поезда, т. е. пропускная способность участка снижается в два раза.

Для проведения электрического расчета системы тягового электроснабжения (СТЭ) постоянного тока 3,0 кВ [3] при организации движения двух ОП с заданным межпоездным интервалом и одного СП используется программный комплекс «КОРТЭС» (комплекс расчетов тягового электроснабжения), основанный на методе имитационного моделирования и разработанный ВНИИЖТом.

В таблице 1 приведены исходные данные для проведения электрических расчетов на различных участках железных дорог (ж. д.) по профилю пути с использованием различных локомотивов и скорости движения грузовых поездов.

Таблица 1 – Условия электрического расчета СТЭ участков

Условия расчета	Участки движения поездов		
	Подволошная – Вогулка	Войновка – Богданович	Курган – Колчедан
Тип локомотива	2ЭС10	2ЭС6	2хВЛ10
Масса состава, т	6000		
Скорость движения, км/ч	50; 60; 70; 80; 90; 100		
Напряжение в контактной сети для тяговых расчетов, В	3000		
Напряжение на шинах тяговых подстанций, В	$U_{х.х} = 3500$ В (естественные характеристики при отсутствии устройств регулирования напряжения)		
	$U_{ст} = 3700$ В (стабилизированные характеристики с устройствами регулирования напряжения)		

На рисунках 2 – 4 представлены профиль пути, силовое оборудование для участков Подволошная – Вогулка Свердловской ж.д., Войновка – Богданович Свердловской ж. д. и Курган – Колчедан Южно-Уральской ж. д.

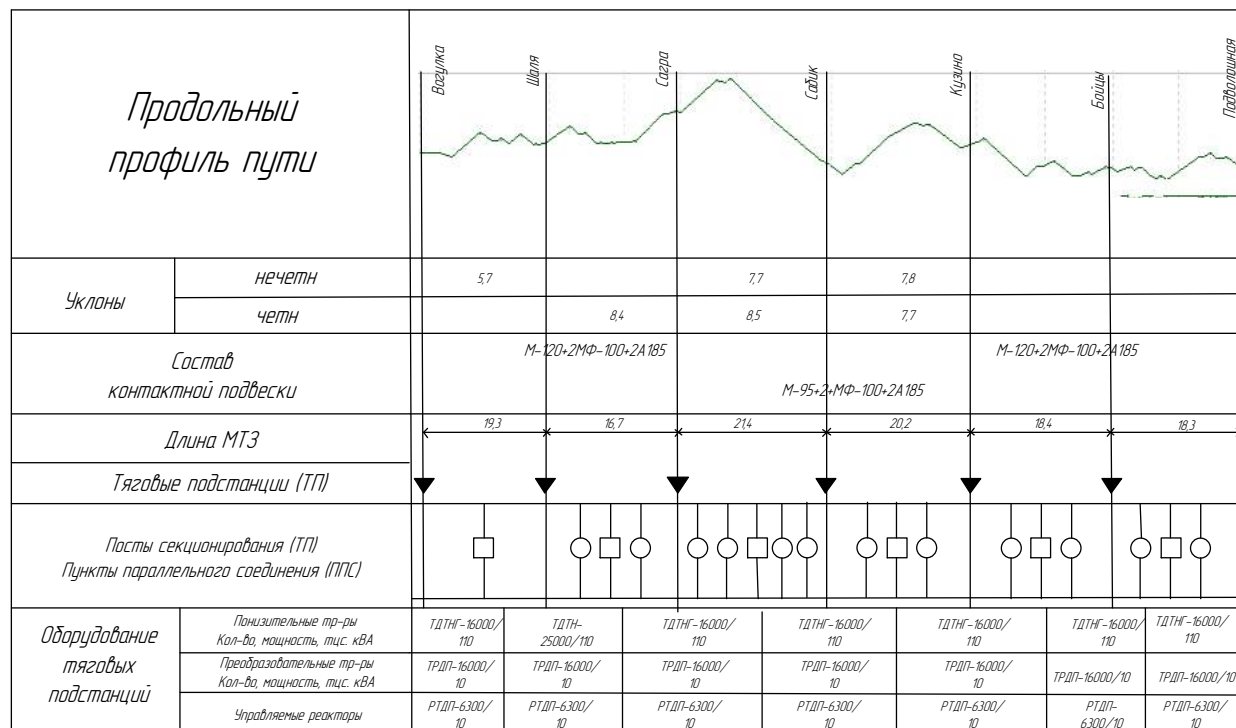


Рисунок 2 – Продольный профиль пути участка Подволошная – Вогулка

Установка на тяговых подстанциях электрифицированных участков железных дорог постоянного тока 3,0 кВ системой бесконтактного автоматического регулирования напряжения (БАРН) допустимого [4 – 6] уровня стабилизации напряжения 3700 В позволяет снизить потери электрической энергии в тяговой сети, что приводит к снижению расхода электрической энергии на тягу.

В таблицах 2 – 4 представлены результаты электрического расчета СТЭ на указанных выше участках с отсутствием движения в четном направлении и с движением в нечетном направлении двух ОП массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин и двух соединенных между собой одиночных грузовых поездов массой по 6000 т [6000 т + 6000 т] – СП. Тя-

говые подстанции участков работают по естественным внешним характеристикам с напряжением холостого хода $U_{х.х} = 3500$ В.

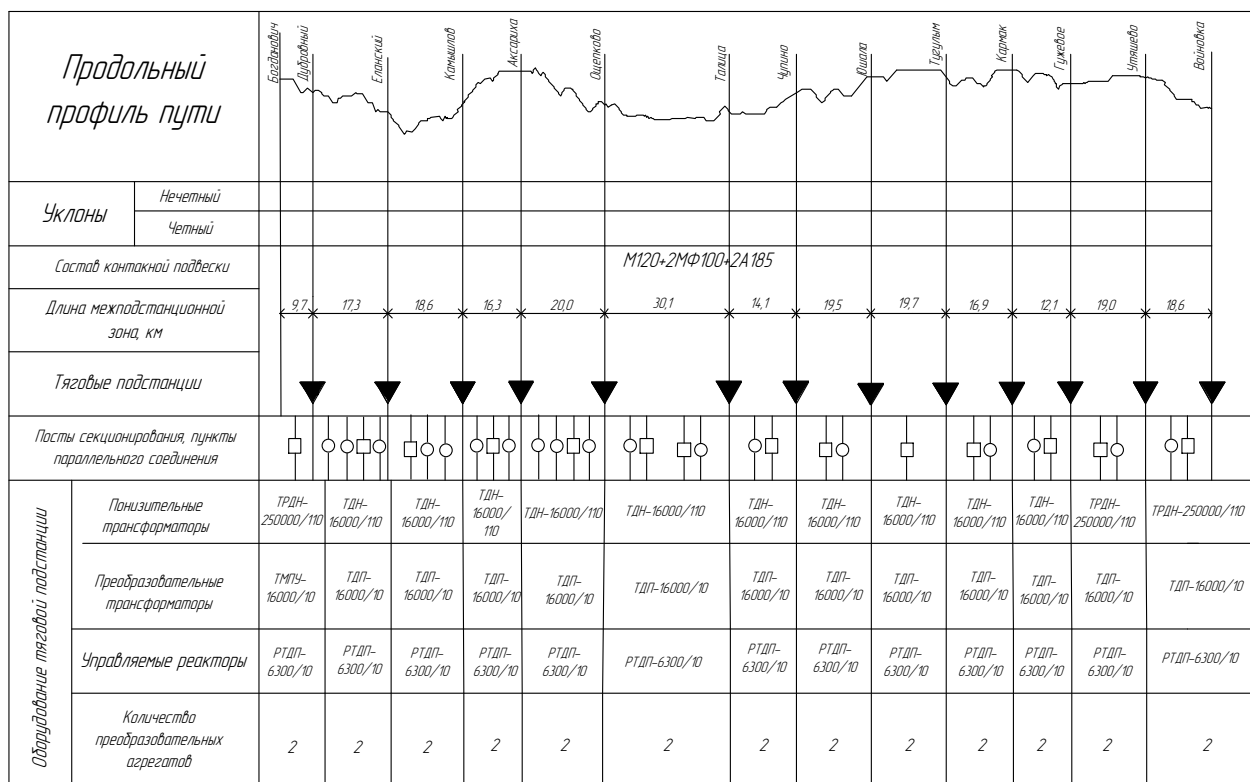


Рисунок 3 – Продольный профиль пути участка Войновка – Богданович

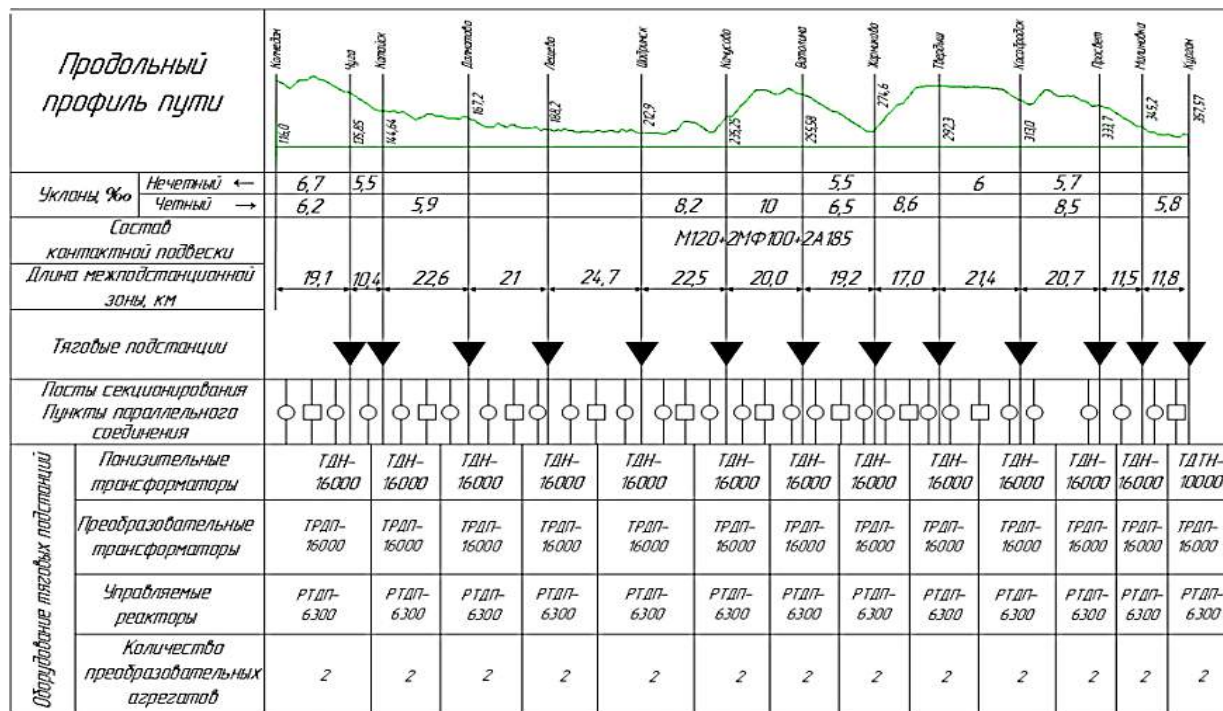


Рисунок 4 – Продольный профиль пути участка Курган – Колчедан

В таблицах приведены расходы электрической энергии на тягу A_t по счетчикам электроподвижного состава $A_{ЭПС}$ и тяговых подстанций $A_{ТП}$; потери электроэнергии (ЭЭ) в тяговой сети $\Delta A_{ТС}$ и трансформаторах $\Delta A_{тр}$ ($\Delta A_{тр.нагр} + \Delta A_{тр.х.х}$).

Таблица 2 – Результаты электрического расчета СТЭ на участке Подволошная – Вогулка с отсутствием движения в четном направлении и с движением с электровозами 2ЭС10 в нечетном направлении двух ОП массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин и двух соединенных между собой ОП массой по 6000 т [6000 т + 6000 т] – соединенный поезд

V, км/ч	Название поезда, масса, тыс. т	Напряжение ТП U_d , кВ	Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{элс} + \Delta A_{тс}$, кВт·ч	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$, кВт·ч	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{элс}$, кВт·ч	$\Delta A_{тс} / A_T \cdot 100$ %, %	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{тр}$ нагр./х.х., кВт·ч	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{ТП} = A_T + \Delta A_{тр}$, кВт·ч	Количество МПЗ менее 2700 В, шт.	Увеличение $A_{ТП}$ после введения СП, %
50	ОП 6 – 6	3,5 х.х	17401	1430	15971	8,2	66/1375	18842	–	– 1,29
	СП [6 + 6]		17214	2132	15082	12,4	84/1301	18599	3	
60	ОП 6 – 6		18481	1711	16770	9,3	79/1153	19713	–	– 1,44
	СП [6 + 6]		18239	2616	15623	14,3	104/1087	19430	3	
70	ОП 6 – 6		18995	1946	17049	10,2	91/1021	20107	–	– 1,74
	СП [6 + 6]		18699	3029	15670	16,2	120/939	19758	3	
80	ОП 6 – 6		20007	2065	17942	10,3	99/922	21028	–	– 1,82
	СП [6 + 6]		19673	3259	16414	16,6	132/840	20645	4	
90	ОП 6 – 6		20343	2145	18198	10,5	103/840	21286	–	– 1,82
	СП [6 + 6]		19986	3409	16577	17,1	139/774	20899	5	
100	ОП 6 – 6		19701	2109	17592	10,7	97/790	20588	–	– 2,09
	СП [6 + 6]		19313	3356	15957	17,4	136/708	20157	4	

Таблица 3 – Результаты электрического расчета СТЭ на участке Войновка – Богданович с отсутствием движения в четном направлении и с движением с электровозами 2ЭС6 в нечетном направлении двух ОП массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин и двух соединенных между собой ОП массой по 6000 т [6000 т + 6000 т] – СП

V, км/ч	Название поезда, масса, тыс. т	Напряжение ТП U_d , кВ	Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{элс} + \Delta A_{тс}$, кВт·ч	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$, кВт·ч	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{элс}$, кВт·ч	$\Delta A_{тс} / A_T \cdot 100$ %, %	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{тр}$ нагр./х.х., кВт·ч	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{ТП} = A_T + \Delta A_{тр}$, кВт·ч	Количество МПЗ менее 2700 В, шт.	Увеличение $A_{ТП}$ после введения СП, %
50	ОП 6 – 6	3,5 х.х	25704	1119	24585	4,4	48/4754	30506	–	–
	СП [6 + 6]		25589	1716	23873	6,7	59/4623	30271	–	0,77
60	ОП 6 – 6		26495	1582	24913	6,0	68/3835	30398	–	–
	СП [6 + 6]		26316	2422	23894	9,2	85/3704	30105	1	0,96
70	ОП 6 – 6		26520	1712	24808	6,5	75/3325	29920	–	–
	СП [6 + 6]		26262	2720	23542	10,4	99/3194	29555	3	1,22
80	ОП 6 – 6		29061	2209	26852	7,6	91/2931	32083	–	–
	СП [6 + 6]		28685	3512	25173	12,2	126/2800	31611	4	1,47
90	ОП 6 – 6		30933	2457	28476	7,9	104/2640	33677	–	–
	СП [6 + 6]		30486	3950	26536	13,0	146/2508	33140	5	1,59
100	ОП 6 – 6		32935	2675	30260	8,1	116/2421	35472	–	–
	СП [6 + 6]		32479	4362	28117	13,4	158/2290	34927	5	1,54

Таблица 4 – Результаты электрического расчета СТЭ на участке Курган – Колчедан с отсутствием движения в четном направлении и с движением с электровозами 2хВЛ10 в нечетном направлении двух ОП массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин и двух соединенных между собой ОП массой по 6000 т [6000 т + 6000 т] – СП

V, км/ч	Название поезда, масса, тыс. т	Напряжение ТП $U_{\text{д}}$, кВ	Расход ЭЭ на тягу $A_{\text{т}} = A_{\text{элс}} + \Delta A_{\text{тс}}$, кВт·ч	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{\text{тс}}$, кВт·ч	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{\text{элс}}$, кВт·ч	$\Delta A_{\text{тс}} / A_{\text{т}} \cdot 100$ %, %	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{\text{тр нагр./х.х.}}$, кВт·ч	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{\text{тп}} = A_{\text{т}} + \Delta A_{\text{тр}}$, кВт·ч	Количество МПЗ менее 2700 В, шт.	Увеличение $A_{\text{тп}}$ после введения СП, %
50	ОП 6 – 6	3,5 х.х	27888	1172	26716	4,2	59/8222	32769	–	–
	СП [6 + 6]		27774	1748	26026	6,3	70/4689	32533	–	0,72
60	ОП 6 – 6		29939	1529	28410	5,1	81/4013	34033	–	–
	СП [6 + 6]		29786	2248	27538	7,5	96/3881	33763	–	0,79
70	ОП 6 – 6		31511	1976	29535	6,3	106/3455	35072	–	–
	СП [6 + 6]		31283	2968	28315	9,5	130/3322	34735	–	0,96
80	ОП 6 – 6		33566	2297	31269	6,8	125/3043	36734	–	–
	СП [6 + 6]		33226	3591	29635	10,8	160/2911	36297	2	1,19
90	ОП 6 – 6		34046	2790	31256	8,2	144/2705	36895	–	–
	СП [6 + 6]		33573	4341	29232	12,9	193/2573	36339	4	1,51
100	ОП 6 – 6		37839	3242	34597	8,6	170/2470	40479	–	–
	СП [6 + 6]		37237	5262	31975	14,1	233/2337	39807	10	1,66

Общим требованием при оценке технико-энергетических показателей работы электровозов (при пропуске двух ОП и одного СП) является обеспечение при заданной технической скорости равенства времени хода по участку и одинаковой тонно-километровой работы.

При равных тонно-километровой работе и заданной технической скорости движения поездов затрачивается одинаковая механическая работа, поэтому расходы электрической энергии по счетчикам электровозов будут одинаковыми.

Из анализа данных таблиц 2 – 4 следует, что повышенный при СП ток двух электровозов по сравнению с токами при ОП вызывает увеличение потерь ЭЭ в тяговой сети ($\Delta A_{\text{тс}}$), уменьшение напряжения на токоприемнике электровозов, вызывающее снижение скорости движения и, соответственно, снижение расхода электрической энергии на тягу ($A_{\text{т}}$) и на тяговой подстанции ($A_{\text{тп}}$). Снижение $A_{\text{тп}}$ после введения СП на участке Подволошная – Вогулка составляет от 1,29 до 2,09 %; Войновка – Богданович – 0,77 – 1,59 %; Курган – Колчедан – 0,72 – 1,66 %. При этом увеличивается количество межподстанционных зон, непроходимых согласно утверждению работы [7] по уровню напряжения 2700 В: например, при скорости движения поездов 100 км/ч при организации движения СП на участках Подволошная – Вогулка – 4 зоны, Войновка – Богданович – 5 зон, Курган – Колчедан – 10 зон. Снижение скорости движения поездов вызывает снижение пропускной способности участка.

Для повышения скорости движения и соответственно пропускной способности необходимо повысить силу тяги двигателей электровоза за счет увеличения тока якоря $I_{\text{я}}$, тем самым увеличивается ток электровоза $I_{\text{э}}$. Для этого в электрическом расчете СТЭ участка с движением СП при нерегулируемом напряжении тяговых подстанций $U_{\text{х.х}} = 3,5$ кВ для повышения расхода электрической энергии $A_{\text{элс}}$ до базового расхода ЭЭ $A_{\text{элс б}}$ вводятся поправочные токовые коэффициенты $K_{\text{Iх.х}} > 1$, увеличивающие токи электровозов $I_{\text{э}}$ СП. За базовую величину $A_{\text{элс б}}$ принимается расход ЭЭ по счетчикам ЭПС при пропуске ОП. Значение $K_{\text{Iх.х}}$ определяется с помощью метода итерации [8].

Таким образом, расход $A_{\text{элс}}$ сохраняется практически неизменным (с заданной погрешностью, например, 1 %), что дает возможность выполнить оценку технико-энергетических показателей при пропуске ОП и СП.

В таблицах 5 – 7 представлены результаты электрического расчета СТЭ при введении в электрический расчет поправочных токовых коэффициентов $K_{\text{Iх.х}} > 1$ с отсутствием движения

в четном направлении и с движением в нечетном направлении двух ОП массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин и двух соединенных между собой одиночных грузовых поездов массой по 6000 т [6000 т + 6000 т] – СП.

Таблица 5 – Результаты электрического расчета СТЭ на участке Подволошная – Вогулка с введением поправочных коэффициентов $K_{\text{Л.х}} > 1$ и $K_{\text{Л.ст}} < 1$

V, км/ч	Название поезда, масса, тыс. т	Напряжение ТП $U_{\text{д}}$, кВ	Поправочные токовые коэффициенты K_i		Расход ЭЭ на тягу $A_{\text{т}} = A_{\text{элс}} + \Delta A_{\text{тс}}$, кВт·ч	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{\text{тс}}$, кВт·ч	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{\text{элс}}$, кВт·ч	$\Delta A_{\text{тс}} / A_{\text{т}} \cdot 100$ %, %	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{\text{тр}}$ нагр./х.х., кВт·ч	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{\text{ТП}} = A_{\text{т}} + \Delta A_{\text{тр}}$, кВт·ч	Количество МПЗ менее 2700 В, шт.	Увеличение $A_{\text{ТП}}$ после введения СП, % при $U_{\text{д}}$, кВ	
			х.х	ст.								3,5 х.х	3,7 ст.
50	ОП 6 – 6	3,5хх	1		17401	1430	15971	8,2	66/1375	18842	–	5,7	3,43
		3,7ст		0,9	17082	1069	16013	6,3	91/1492	18665	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,08		18517	2487	16030	13,4	98/1301	19916	3		
		3,7ст		0,87	17767	1758	16009	9,9	127/1411	19305	–		
60	ОП 6 – 6	3,5хх	1		18481	1711	16770	9,3	79/1153	19713	1	7,34	4,08
		3,7ст		0,89	18021	1254	16767	7	106/1251	19375	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,1		19948	3166	16782	15,9	125/1087	21160	3		
		3,7ст		0,85	18833	2145	16688	11,4	153/1179	20165	–		
70	ОП 6 – 6	3,5хх	1		18995	1946	17049	10,2	91/1021	20107	1	9,64	6,37
		3,7ст		0,88	18395	1402	16993	7,6	118/1108	19621	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,13		20953	3867	17086	18,5	154/939	22046	5		
		3,7ст		0,84	19673	2568	17105	13,1	180/1018	20871	–		
80	ОП 6 – 6	3,5хх	1		20007	2065	17942	10,3	99/922	21028	1	10,45	6,01
		3,7ст		0,88	19405	1489	17916	7,7	127/1001	20533	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,14		22213	4235	17978	19,1	172/840	23225	5		
		3,7ст		0,83	20661	2745	17916	13,3	196/911	21768	–		
90	ОП 6 – 6	3,5хх	1		20343	2145	18198	10,5	103/840	21286	1	11,35	5,84
		3,7ст		0,88	19754	1554	18200	7,9	130/911	20795	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,15		22745	4508	18237	19,8	183/774	23702	5		
		3,7ст		0,82	20966	2856	18110	13,6	204/840	22010	–		
100	ОП 6 – 6	3,5хх	1		19701	2109	17592	10,7	97/790	20588	–	11,9	6,51
		3,7ст		0,88	19121	1531	17590	8	124/849	20094	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,16		22148	4515	17633	20,4	183/708	23039	4		
		3,7ст		0,82	20433	2863	17570	14	202/768	21403	–		

В таблицах 5 – 7 представлены также результаты электрического расчета СТЭ при введении устройств регулирования напряжения системой БАРН до уровня 3700 В. В расчетах применялась новая методика [9, 10] с использованием поправочных токовых коэффициентов $K_{\text{Л.ст}} < 1$.

При увеличении тока электровоза I_e в электрических расчетах повышаются скорость движения и пропускная способность участка. При пропуске СП увеличиваются расход ЭЭ в ЭПС $A_{\text{ЭПС}}$, потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{\text{ТС}}$ и расход ЭЭ на тягу ТП $A_{\text{ТП}}$.

При нерегулируемом на тяговых подстанциях напряжении $U_{\text{х.х}} = 3500$ В происходит повышение $A_{\text{ТП}}$ при движении СП по сравнению с движением ОП и составляет на участках: Подволошная – Вогулка – от 5,70 до 11,90 %, Войновка – Богданович – 1,68 – 7,18 %; Курган – Колчедан – 1,76 – 7,92 %. При этом количество межподстанционных зон, не проходимых согласно выводам работы [7] по уровню напряжения 2700 В например, при скорости движения поездов 100 км/ч при организации движения СП на участках Подволошная – Вогулка – 4 зоны, Войновка – Богданович – 6 зон, Курган – Колчедан – 10 зон, при пропуске ОП все МПЗ проходят.

Таблица 6 – Результаты электрического расчета СТЭ на участке Войновка – Богданович с введением поправочных коэффициентов $K_{\text{х.х}} > 1$ и $K_{\text{СТ}} < 1$

V , км/ч	Название поезда, масса, тыс. т	Напряжение ТП U_d , кВ	Поправочные токовые коэффициенты K_j		Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{\text{ЭПС}} + \Delta A_{\text{ТС}}$, кВт·ч	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{\text{ТС}}$, кВт·ч	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{\text{ЭПС}}$, кВт·ч	$\Delta A_{\text{ТС}} / A_T \cdot 100$ %	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{\text{ТР}}$ нагр./х.х, кВт·ч	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{\text{ТП}} = A_T + \Delta A_{\text{ТР}}$, кВт·ч	Количество МПЗ менее 2700 В, шт.	Увеличение $A_{\text{ТП}}$ после введения СП, % при U_d , кВ	
			х.х	ст.								3,5 х.х	3,7 ст.
50	ОП 6 – 6	3,5хх	1		25704	1119	24585	4,4	48/4754	30506	–	1,68	1,98
		3,7ст		0,91	25142	855	24287	3,4	67/5211	30420	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,03		26334	1821	24513	6,9	62/4623	31019	–		
		3,7ст		0,91	25866	1406	24460	5,4	90/5067	31023	–		
60	ОП 6 – 6	3,5хх	1		26495	1582	24913	6	68/3835	30398	–	3,24	1,81
		3,7ст		0,91	26083	1211	24872	4,6	96/4204	30383	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,05		27584	2670	24914	9,7	94/3704	31382	2		
		3,7ст		0,89	26743	1969	24774	7,4	131/4060	30934	–		
70	ОП 6 – 6	3,5хх	1		26520	1712	24808	6,5	75/3325	29920	–	4,71	3,47
		3,7ст		0,9	25888	1284	24604	5	102/3644	29634	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,07		28021	3114	24907	11,1	114/3194	31329	3		
		3,7ст		0,88	27008	2245	24763	8,3	154/3500	30662	–		
80	ОП 6 – 6	3,5хх	1		29061	2209	26852	7,6	91/2931	32083	–	6,24	4,12
		3,7ст		0,9	28446	1667	26779	5,9	123/3213	31782	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,09		31135	4172	26963	13,4	150/2800	34085	4		
		3,7ст		0,87	29827	2952	26875	9,9	195/3069	33091	–		
90	ОП 6 – 6	3,5хх	1		30933	2457	28476	7,9	104/2640	33677	–	7,04	5,06
		3,7ст		0,89	30011	1817	28194	6,1	136/2893	33040	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,1		33362	4780	28582	14,3	177/2508	36047	6		
		3,7ст		0,86	31737	3299	28438	10,4	226/2749	34712	–		
100	ОП 6 – 6	3,5хх	1		32935	2675	30260	8,1	116/2421	35472	–	7,18	4,1
		3,7ст		0,89	32007	1985	30022	6,2	148/2653	34808	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,1		35538	5279	30259	14,9	192/2290	38020	6		
		3,7ст		0,85	33484	3552	29932	10,6	242/2509	36235	–		

Таблица 7 – Результаты электрического расчета СТЭ на участке Курган – Колчедан с введением поправочных коэффициентов $K_{I,x} > 1$ и $K_{I,ст} < 1$.

V, км/ч	Название поезда, масса, тыс. т	Напряжение ТП U_d , кВ	Поправочные токовые коэффициенты K_I		Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{ЭПС} + \Delta A_{ТС}$, кВт·ч	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{ТС}$, кВт·ч	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{ЭПС}$, кВт·ч	$\Delta A_{ТС} / A_T \cdot 100$ %, %	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{ТР}$ нагр./х.х., кВт·ч	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{ТП} = A_T + \Delta A_{ТР}$, кВт·ч	Количество МПЗ менее 2700 В, шт.	Увеличение $A_{ТП}$ после введения СП, % при U_d , кВ	
			х.х	ст.								3,5 х.х	3,7 ст.
50	ОП 6 – 6	3,5хх	1		27888	1172	26716	4,2	59/4822	32769	–	1,76	2,01
		3,7ст		0,91	27282	898	26384	3,3	79/5281	32642	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,03		28582	1855	26727	6,5	74/4689	33345	–		
		3,7ст		0,91	28059	1433	26626	5,1	104/5136	33299	–		
60	ОП 6 – 6	3,5хх	1		29939	1529	28410	5,1	81/4013	34033	–	2,61	2,00
		3,7ст		0,91	29426	1172	28254	4	108/4395	33929	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,04		30936	2436	28500	7,9	104/3881	34921	–		
		3,7ст		0,9	30216	1833	28383	6,1	142/4250	34608	–		
70	ОП 6 – 6	3,5хх	1		31511	1976	29535	6,3	106/3455	35072	–	3,34	1,91
		3,7ст		0,9	30799	1482	29317	4,8	140/3784	34723	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,05		32780	3272	29508	10	143/3322	36245	–		
		3,7ст		0,88	31550	2356	29194	7,5	189/3639	35387	–		
80	ОП 6 – 6	3,5хх	1		33566	2297	31269	6,8	125/3043	36734	–	4,89	3,64
		3,7ст		0,9	32898	1731	31167	5,3	162/3333	36393	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,07		35437	4112	31325	11,6	184/2911	38532	4		
		3,7ст		0,88	34287	2963	31324	8,6	242/3188	37717	–		
90	ОП 6 – 6	3,5хх	1		34046	2790	31256	8,2	144/2705	36895	–	6,29	4,2
		3,7ст		0,88	32762	2023	30739	6,2	178/2962	35902	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,09		36412	5157	31255	14,2	229/2573	39214	6		
		3,7ст		0,85	34310	3473	30837	10,1	283/2818	37411	–		
100	ОП 6 – 6	3,5хх	1		37839	3242	34597	8,6	170/2470	40479	–	7,92	3,81
		3,7ст		0,89	36901	2412	34489	6,5	213/2705	39819	–		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,11		41060	6483	34577	15,8	287/2337	43684	10		
		3,7ст		0,84	38432	4267	34165	11,1	346/2560	41338	–		

Доказано [9], что при сохранении неизменными массы и скорости движения поездов, т. е. мощности электровоза в каждой точке пути и, соответственно, расхода ЭЭ на тягу, с повышением напряжения на тяговых подстанциях (и в контактной сети) снижается ток электровоза и, естественно, снижаются потери ЭЭ в контактной сети $\Delta A_{ТС}$ и удельный расход ЭЭ на тягу a_T . По данным таблиц 5 – 7 можно заключить, что при введении устройств регулирования напряжения системой БАРН на уровне $U_{ст} = 3700$ В (при введении коэффициентов $K_{I,ст} < 1$) потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{ТС}$ снижаются по сравнению с режимом без стабилизации напряжения на шинах ТП с $U_{х.х} = 3500$ В: например, при пропуске ОП на участках Подволошная – Вогулка – от 25,2 до 27,4 %, Войновка – Богданович – 23,6 – 25,8 %, Курган – Колчедан – 23,4 – 25,6 %.

На рисунках 5 – 10 обозначено: пунктирная линия – движение двух ОП; сплошная линия – СП; расход ЭЭ по счетчикам ЭПС $A_{ЭПС}$ (1), с учетом потерь ЭЭ в тяговой сети $A_{ЭПС} + \Delta A_{ТС}$ (2) и в трансформаторах $A_{ТП} = A_{ЭПС} + \Delta A_{ТС} + \Delta A_{ТР}$ (3).

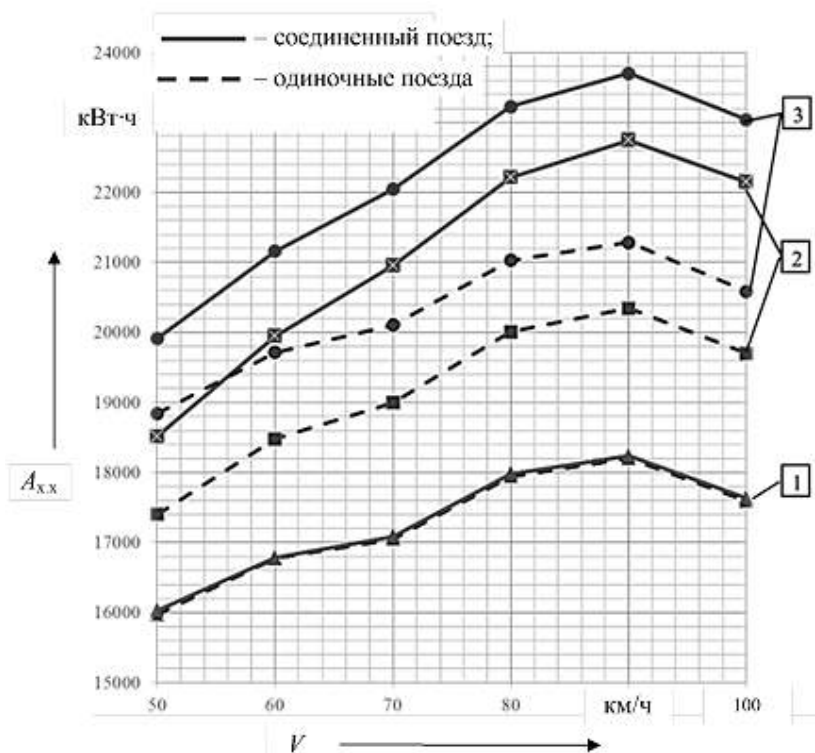


Рисунок 5 – Зависимость расхода ЭЭ на участке Подволошная – Вогулка от скорости движения поездов при естественных внешних характеристиках с $U_{x,x} = 3500$ В с движением только в нечетном направлении двух ОП с межпоездным интервалом 10 мин и одного СП

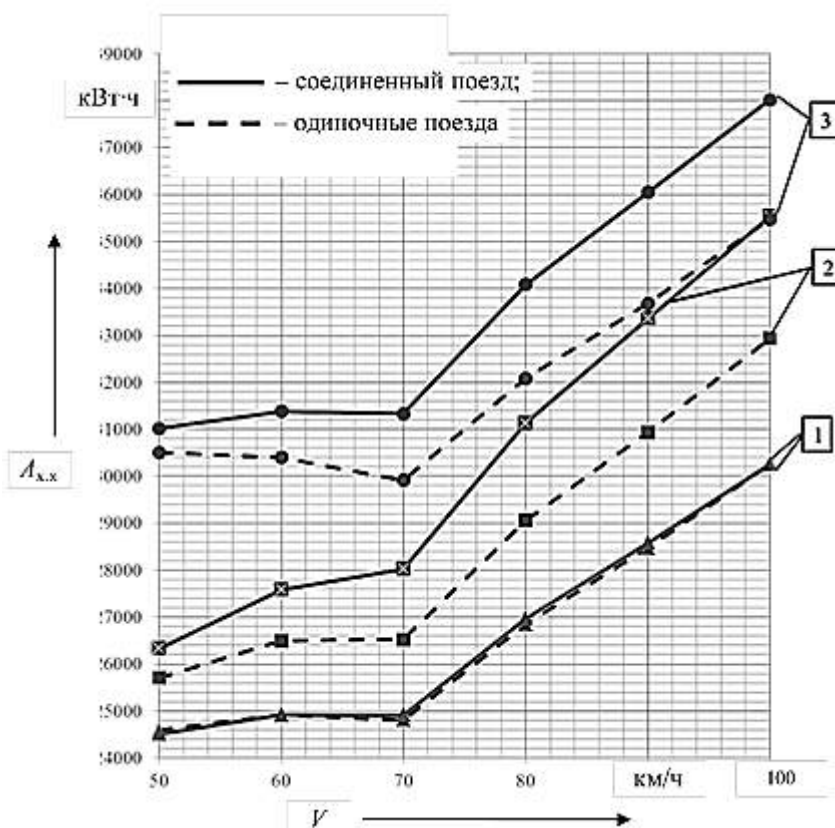


Рисунок 6 – Зависимость расхода ЭЭ на участке Войновка – Богданович от скорости движения поездов при естественных внешних характеристиках с $U_{x,x} = 3500$ В с движением только в нечетном направлении двух ОП с межпоездным интервалом 10 мин и одного СП

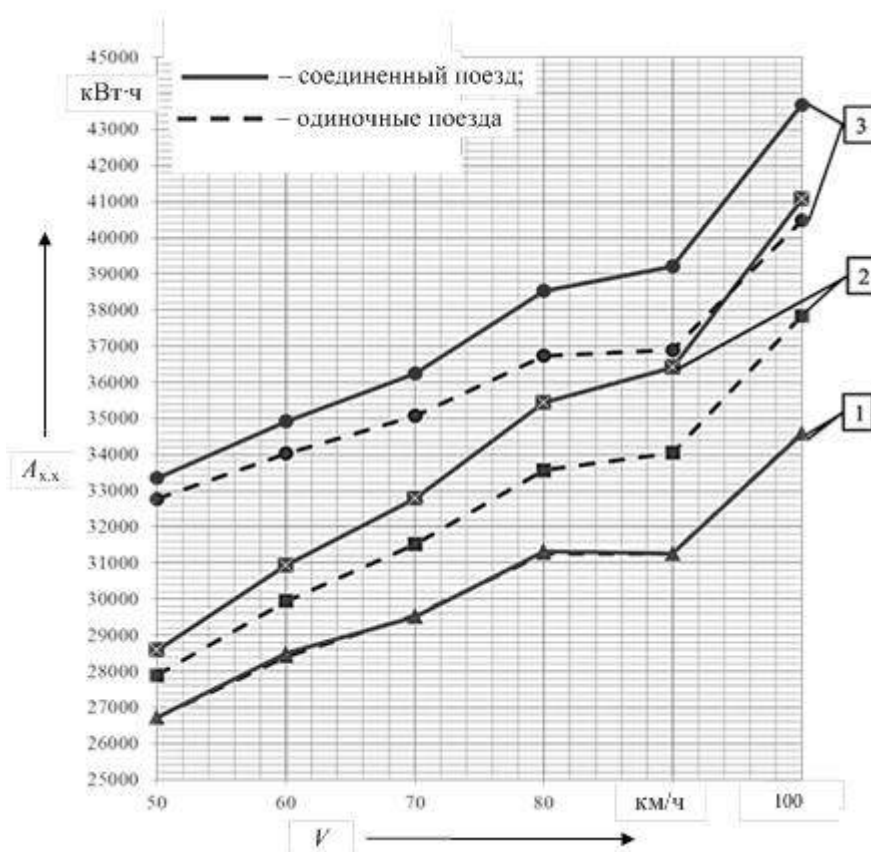


Рисунок 7 – Зависимость расхода ЭЭ на участке Курган – Колчедан от скорости движения поездов при естественных внешних характеристиках с $U_{к.к.} = 3500$ В с движением только в нечетном направлении двух ОП с межпоездным интервалом 10 мин и одного СП

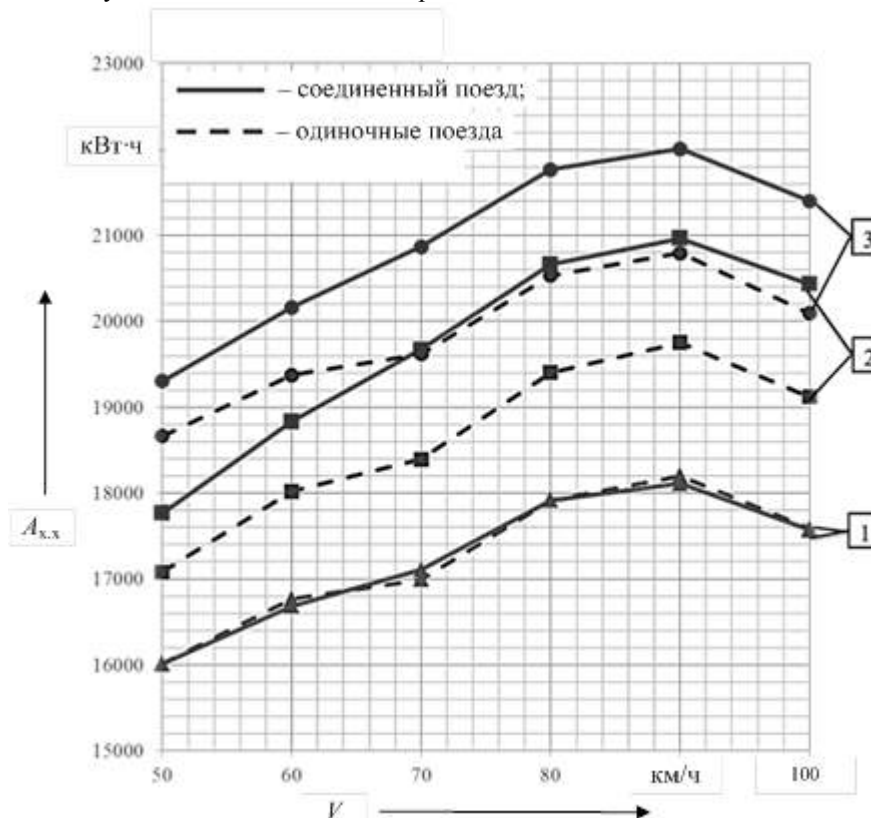


Рисунок 8 – Зависимость расхода ЭЭ на участке Подволошная – Вогулка от скорости движения поездов со стабилизацией напряжения на тяговых подстанциях на уровне 3700 В с движением только в нечетном направлении двух ОП с межпоездным интервалом 10 мин и одного СП

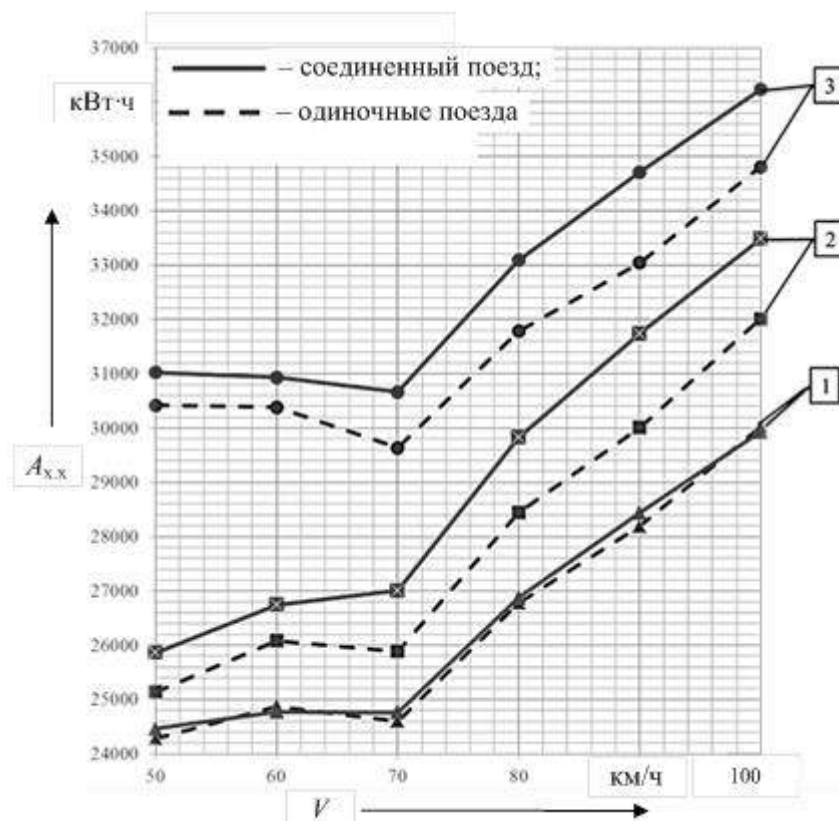


Рисунок 9 – Зависимость расхода ЭЭ на участке Войновка – Богданович от скорости движения поездов со стабилизацией напряжения на тяговых подстанциях на уровне 3700 В с движением только в нечетном направлении двух ОП с межпоездным интервалом 10 мин и одного СП

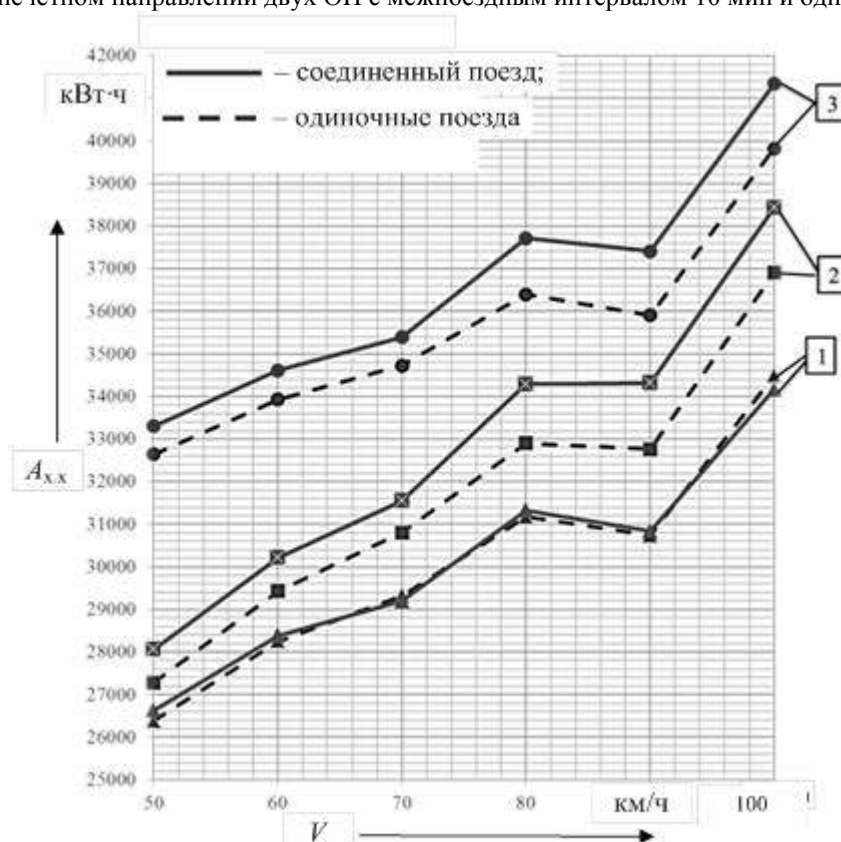


Рисунок 10 – Зависимость расхода ЭЭ на участке Курган – Колчедан от скорости движения поездов со стабилизацией напряжения на тяговых подстанциях на уровне 3700 В с движением только в нечетном направлении двух ОП с межпоездным интервалом 10 мин и одного СП

Результаты электрических расчетов СТЭ при естественных внешних характеристиках с $U_{х.х} = 3500$ В представлены на участках Подволошная – Вогулка (см. рисунок 5), Войновка – Богданович (см. рисунок 6), Курган – Колчедан (см. рисунок 7) с отсутствием движения в четном направлении и с движением в нечетном направлении двух ОП массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин; одного СП – двух соединенных между собой ОП массой по 6000 т [6000 т + 6000 т] – СП.

Результаты электрических расчетов СТЭ при введении регулирования напряжения на уровне 3700 В представлены на участках Подволошная – Вогулка (см. рисунок 8), Войновка – Богданович (см. рисунок 9), Курган – Колчедан (см. рисунок 10) с отсутствием движения в четном направлении и с движением в нечетном направлении двух ОП массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин; одного СП – двух соединенных между собой ОП массой по 6000 т [6000 т + 6000 т] – СП.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Пропуская способность направления (участка) при введении СП с учетом формирования СП по сравнению с движением ОП снижается в два раза.

Результаты электрических расчетов по программе «КОРТЭС» без устройств регулирования (см. таблицы 2 – 4 и рисунки 5 – 7) и введением устройств регулирования напряжения на уровне 3700 В (см. таблицу 5 – 7 и рисунки 8 – 10) показывают:

расход электрической энергии по счетчикам ЭПС $A_{эпс}$ практически совпадает при движении поездов по схемам ОП и СП (в среднем при скорости от 50 до 100 км/ч $A_{эпс}$ различается при $U_{х.х} = 3500$ В на участках Подволошная – Вогулка на 0,22 %, Войновка – Богданович – 0,15, Курган – Колчедан – 0,06 %; при $U_{ст} = 3700$ В: Подволошная – Вогулка – на 0,07 %, Войновка – Богданович – 0,31, Курган – Колчедан – 0,14 %);

расход $A_{эпс}$ с учетом потерь электрической энергии в тяговой сети $\Delta A_{тс}$ при пропуске СП увеличивается по сравнению с пропуском ОП (в среднем при скорости от 50 до 100 км/ч при $U_{х.х} = 3500$ В возрастает на участках Подволошная – Вогулка на 9,04 %, Войновка – Богданович – 5,49, Курган – Колчедан – 4,86 %; при $U_{ст} = 3700$ В: Подволошная – Вогулка – на 5,45 %, Войновка – Богданович – 3,98, Курган – Колчедан – 3,39 %);

расход $A_{эпс} + \Delta A_{тс} + \Delta A_{тр}$ (с учетом потерь электрической энергии в трансформаторах) при СП возрастает по сравнению с пропуском ОП (в среднем при скорости от 50 до 100 км/ч при $U_{х.х} = 3500$ В на участках Подволошная – Вогулка на 9,40 %, Войновка – Богданович – 5,02, Курган – Колчедан – 4,47 %; при $U_{ст} = 3700$ В: Подволошная – Вогулка – на 5,37 %, Войновка – Богданович – 3,42, Курган – Колчедан – 2,93 %);

удельный расход электрической энергии a_t снижается при введении устройств регулирования напряжения системой БАРН на уровне 3700 В по сравнению с режимом без регулирования напряжения с $U_{х.х} = 3500$ В (в среднем при скорости от 50 до 100 км/ч при пропуске ОП снижается на участках Подволошная – Вогулка на 2,02 %, Войновка – Богданович – 1,00, Курган – Колчедан – 1,16 %; при пропуске СП: Подволошная – Вогулка – на 5,59 %, Войновка – Богданович – 2,48, Курган – Колчедан – 2,58 %).

2. Применение уточненной методики электрического расчета СТЭ с введением устройств регулирования напряжения позволяет выполнить более точную оценку влияния организации движения соединенных грузовых поездов на пропускную способность участков, электрифицированных на постоянном токе, с точки зрения технико-энергетических показателей.

3. Применение соединенных поездов может быть оправданным при ликвидации на направлении (участке) аварийных ситуаций.

Список литературы

1. Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины на железнодорожных путях общего пользования ОАО «РЖД». Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 1 сентября 2016 г. № 1799р [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2016. – 43 с.

2. Технология вождения соединенных грузовых поездов с использованием системы ИСАВП-РТ локомотивными бригадами ТЧЭ-15 на участке Курган – Каменск-Уральский – Седельниково. Утверждена ОАО «РЖД» Свердловская дирекция тяги от 25 мая 2015 г. [Текст] / ОАО «РЖД». – Екатеринбург, 2015. – 13 с.
3. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ: Монография [Текст] / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2015. – 258 с.
4. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока [Текст] / Б. А. Аржанников, М. П. Бадер и др. // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 51 – 57.
5. Тарасовский, Т. С. Тиристорно-реакторное устройство регулирования напряжения под нагрузкой РПН преобразовательного трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1 [Текст] / Т. С. Тарасовский // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 3(54). – С. 87 – 91.
6. Аржанников, Б. А. Разработка системы и устройств тягового электроснабжения с повышенными технико-энергетическими показателями [Текст] / Б. А. Аржанников, И. А. Баева // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Интеграция образовательной, научной и воспитательной деятельности в организациях общего и профессионального образования» / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2017. – С. 20 – 26.
7. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утверждены приказом Министерства трансп. РФ от 21 декабря 2010 г. № 286 в редакции приказов Министерства трансп. РФ от 12.08.2011 № 210, от 04.06.2012 № 162, от 13.06.2012 № 164 (зарегистр. в Минюсте России 28.01.2011 № 19627; 18.06.2012 № 21758; 18.06.2012 № 24735) [Текст]. – Екатеринбург: УралЮрИздат, 2013. – 240 с.
8. Виленкин, Н. Я. Метод последовательных [Текст] / Н. Я. Виленкин. – М.: Наука, 1968. – 108 с.
9. Аржанников, Б. А. Влияние регулирования напряжения на пропускную способность электрифицированных участков постоянного тока и на расход электрической энергии на тягу поездов [Текст] / Б. А. Аржанников, И. А. Баева // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 4(55). – С. 71 – 75.
10. Аржанников, Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов: Монография [Текст] / Б. А. Аржанников / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2012. – 207 с.
11. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

References

1. *Instrukciya po organizacii obrashheniya gruzovykh poezdov povyshennoj massy i dliny na zheleznodorozhnykh putyakh obshhego polzovaniya* ОАО «РЖД». (Instructions for organizing the circulation of freight trains of increased mass and length on public railways of ОАО Russian Railways), Moscow, ОАО «РЖД», 2016, 43 p.
2. *Texnologiya vozhdeniya soedinennykh gruzovykh poezdov s ispolzovaniem sistemy isavp-rt lokomotivnymi brigadami tche-15 na uchastke Kurgan – Kamensk-Uralskij – Sedelnikovo*. (The technology of driving connected freight trains using the ISAVP-RT system by the locomotive crews of TChE-15 in the Kurgan – Kamensk-Uralsky – Sedelnikovo section. Approved by Russian Railways Sverdlovsk Directorate of Thrust), Ekaterinburg, ОАО «РЖД», 2015, 13 p.
3. Arzhannikov B. A., Nabojchenko I. O. *Koncepciya usileniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV* (The concept of amplifying the system of traction power supply of DC 3.0 kV). Ekaterinburg, 2015, 258 p.
4. Arzhannikov B. A., Bader M. P., Burkov A. T. Improvement of the basic requirements for the system and devices for direct current power supply [Sovershenstvovanie osnovnykh trebovanij k

sisteme i ustroystvam tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka]. *Elektrotexnika*, 2016, no 9, pp. 51 – 57.

5. Tarasovskij T. S. Thyristor-reactor voltage adjusting device under load tap changer converter transformer TRSZP-12500/10 ZHU1 [Tiristorno-reaktornoje ustrojstvo regulirovaniya napryazheniya pod nagruzkoy rpn preobrazovatel'nogo transformatora TRSZP-12500/10 ZHU1]. *Transport Urala*, 2017, no 3(54), pp. 87 – 91.

6. Arzhannikov B. A., Baeva I. A. *Razrabotka sistemy i ustroystv tyagovogo elektrosnabzheniya s povyshennymi texniko-energeticheskimi pokazatelyami* (Development of a traction power supply system and devices with enhanced technical and energy indicators). Ekaterinburg, 2017, p. 20.

7. *Pravila texnicheskoy ekspluatacii zheleznix dorog Rossijskoj Federacii*: (Rules of technical operation of the railways of the Russian Federation), Ekaterinburg, Ural Yur Izdat, 2013, 240 p.

8. Vilenkin N. YA. *Metod posledovatel'nykh priblizheniy* (The method of successive approximations). Moscow: Nauka Publ., 1968, 108 p.

9. Arzhannikov B. A., Baeva I. A. The effect of voltage regulation on the throughput capacity of electrified sections of direct current and on the consumption of electrical energy on train traction [Vliyanie regulirovaniya napryazheniya na propusknyuyu sposobnost' elektrificirovannykh uchastkov postoyannogo toka i na rasxod elektricheskoy energii na tyagu poezdov]. *Transport Urala*, 2017, no 4(55), pp. 71 – 75.

10. Arzhannikov B. A. *Tyagovoe elektrosnabzhenie postoyannogo toka skorostnogo i tyazhe lovesnogo dvizheniya poezdov* (Traction power supply of direct current for high-speed and heavy train movement). Ekaterinburg, 2012, 207 p.

11. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrificirovannykh zheleznix dorog* (Electric power supply of electrified railways). Moscow: Transport Publ., 1982, 528 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аржанников Борис Алексеевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7 (343) 221-24-78.

E-mail: BArzhannikov@usurt.ru

Баева Ирина Анатольевна

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7 (982) 753-64-56.

E-mail: IBaeva@usurt.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Аржанников, Б. А. Влияние организации движения соединенных грузовых поездов на повышение пропускной и провозной способности участков электрифицированных на постоянном токе [Текст] / Б. А. Аржанников, И. А. Баева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 50 – 64.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Arzhannikov Boris Alekseevich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorov st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department Power supply of transport», USURT.

Phone: +7 (343) 221-24-78.

E-mail: BArzhannikov@usurt.ru

Baeva Irina Anatolyevna

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorov st., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Power supply of transport », USURT.

Phone: +7 (982) 753-64-56.

E-mail: IBaeva@usurt.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Arzhannikov B. A., Baeva I. A. Фамилия второго автора И. О. Effect of the movement of the united freight train at in-creasing the capacity and carrying capacity land electrified DC. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 2, no 34, pp. 50 – 64 (In Russian).

К. И. Доманов, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин

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

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ЦЕЛЯХ УСТАНОВКИ НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, связанные с теоретическими и экспериментальными исследованиями режимов работы системы тягового электроснабжения. Выполнен сравнительный анализ напряжений на шинах тяговых подстанций с неуправляемыми выпрямителями и шинах тяговых подстанций с преобразовательными агрегатами, оборудованными системой бесконтактного автоматического регулирования напряжения, показаны различия между ними. Детально исследованы режимы работы активного поста секционирования с пунктом повышения напряжения. В результате исследований выявлено, что продолжительность наблюдения максимальных значений напряжения на шинах подстанции выше среднего уровня напряжения холостого хода составляет около 5 – 10 % от времени суток, на активных постах – около 7 – 8 %, на пассивных – 10 – 13 %. Максимальная мощность в активном режиме работы поста секционирования с пунктом повышения напряжения при понижении напряжения в контактной сети составляет 2,9 МВт. Средний объем электроэнергии, возвращаемый в контактную сеть пунктом повышения напряжения, за один эпизод составляет 170 кВт·ч. Средняя продолжительность работы в активном режиме для одного случая составляет 8,6 мин.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, пост секционирования, пункт повышения напряжения, накопитель электрической энергии

Kirill I. Domanov, Vladislav L. Nezevak, Andrey P. Shatokhin

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

STUDY OF OPERATION MODES OF THE ELECTRICAL POWER SUPPLY SYSTEM FOR INSTALLATION OF ELECTRIC ENERGY STORAGE DRIVERS

Abstract. The article deals with issues related to theoretical and experimental studies of operating modes of the traction power supply system. The analysis of the comparison of voltages on the tines of traction substations with uncontrolled rectifiers and tines of traction substations with converter units equipped with a system of non-contact automatic voltage regulation is shown, the differences between them are shown. The modes of operation of the active partitioning post with the point of increasing voltage have been studied in detail. As a result of research, it was found that the observation time of maximum voltage values at substation tines above the average no-load voltage level is about 5 – 10% of the time of day, about 7 – 8% at active posts, and 10 – 13% at passive posts. The maximum power in the active mode of the post sectioning with the point of increasing the voltage at lower voltage in the contact network is 2.9 MW. The average amount of electricity returned to the contact network point of increase of voltage, in one case is 170 kWh. The average duration of work in active mode for one case is 8,6 minutes.

Keywords: traction power supply system, traction substation, partition post, overvoltage point, electric energy storage

Производство и потребление различных видов энергии в мире растет быстрыми темпами, определяя прогресс во всех областях жизнедеятельности человека, усложняются также процессы преобразования энергии, расширяется многообразие установок и агрегатов энергопотребления. Помимо роста количественных показателей обеспечения электроэнергией промышленности, транспортной отрасли все большую роль начинают играть показатели качества использования энергии, что связано с рациональным использованием энергии на различных стадиях ее преобразования [1]. Значительное место в решении возникающих при этом проблем отводится накопителям энергии, являющимся важным промежуточным звеном между системами генерирования и системами распределения и потребления энергии. К таким энергосистемам предъявляются особые требования: надежности, энергоэффективности, возможности на изменение параметров, что подразумевает оперативный контроль системы в

целом. Для эффективного управления сложными энергетическими системами в последние годы активно разрабатывается концепция интеллектуальных систем управления [2, 3].

Создание интеллектуальных энергетических систем (ИЭС) актуально для городского и железнодорожного электрического транспорта, который является крупным потребителем электроэнергии. Значительным резервом в создании энергоэффективных систем электрического транспорта является включение в традиционную энергетическую инфраструктуру не традиционных источников энергии, накопителей энергии и пунктов интеллектуальной диспетчерской централизации. Применение накопителей энергии в ИЭС позволит стабилизировать напряжение в системе тягового электроснабжения (СТЭ), реализовать энергосберегающие режимы работы электроподвижного состава, снизив расход электроэнергии на тягу, в конечном итоге повысить рентабельность городских и железнодорожных перевозок. При установке накопителя электрической энергии (НЭЭ) на тяговую подстанцию (ТП) необходимо учитывать энергетические параметры с характеристиками режимов в СТЭ [4, 5].

На железнодорожном и городском транспорте используются различные варианты усиления СТЭ. В настоящее время полигон железных дорог постоянного тока составляет около половины электрифицированных линий и именно на этих участках задача повышения эффективности энергии рекуперации особенно актуальна. Обусловлено это в первую очередь необходимостью создания условий для приема энергии рекуперации путем соответствующей организации движения поездов или путем размещения специальных приемников энергии рекуперации. К основным мероприятиям по усилению железнодорожной тяговой сети постоянного тока относятся способы усиления контактной подвески путем подвеса усиливающего провода или замены несущего троса и контактного провода на провода и тросы большего сечения. Применительно к ТП – это переход на двенадцатипульсовые схемы выпрямления, внешняя характеристика которых является более пологой по сравнению с шестипульсовыми схемами [6]. В обоснованных случаях применяется также монтаж линейных устройств. Для двенадцатипульсовых выпрямителей ТП применяются преобразовательные трансформаторы марки ТРДП-12500/10ЖУ1 мощностью 10,56 кВт, для выпрямителей с регулированием напряжения – ТРДП-16000/10ЖУ1 мощностью 12,16 кВт. Среднее расстояние между тяговыми подстанциями изменяется в среднем в диапазоне 10 – 20 км.

В общем случае напряжение в контактной сети должно находиться в пределах 2,7 – 4,0 кВ. Это определяет режим напряжения на шинах 3,3 кВ ТП, напряжение преимущественно находится в диапазоне 3,30 – 3,85 кВ.

Проанализированные поездки с локомотивами серии 2ЭС10 и двухсистемным электровозом 2ЭВ120 в ходе подконтрольной эксплуатации позволили получить данные о диапазоне изменения нагрузки и напряжения на токоприемнике тяжеловесных и длинносоставных поездов в различных режимах работы ЭПС применительно к участкам эксплуатации. С целью обобщения данных о диапазонах изменения нагрузки и напряжения на токоприемнике ЭПС в различных режимах работы и получения статистически обоснованных значений были рассмотрены поездки локомотивов серий 2ЭС10 и 2ЭВ120 на полигоне прохождения тяжеловесных и длинносоставных поездов в направлении Кузбасс – Северо-Запад Западно-Сибирской, Южно-Уральской и Свердловской железных дорог. Анализ поездок локомотивов серий 2ЭС10 и 2ЭВ120 выполнен на девяти участках оборота локомотивных бригад различных железных дорог. Расчет параметров НЭЭ в режимах заряда-разряда определяет необходимость статистической обработки и анализа частотного распределения энергетических показателей в различных режимах работы локомотивов.

Анализ сравнения напряжений на шинах ТП с неуправляемыми выпрямителями и шинах ТП с преобразовательными агрегатами, оборудованными системой бесконтактного автоматического регулирования напряжения (БАРН), показал различия между ними, обусловленные стабилизацией напряжения на шинах последних ТП на уровне 3600 – 3650 В. Характерные графики распределения напряжения представлены на рисунках 1 и 2 соответственно для участков с III и IV типом профиля пути. В обоих случаях имеет место повышение напряже-

ния на шинах 3,3 кВ ТП выше уровня холостого хода. Указанное обстоятельство объясняется применением рекуперативного торможения электроподвижным составом (ЭПС), повышающим напряжение на шинах 3,3 кВ ТП до уровня 3800 – 3900 В и выше [7]. Важно отметить, что применение БАРН в СТЭ не позволяет стабилизировать напряжение на шинах 3,3 кВ на заданном уровне при применении ЭПС рекуперативного торможения. В последних случаях напряжение на шинах увеличивается до уровня 4,0 кВ и выше.

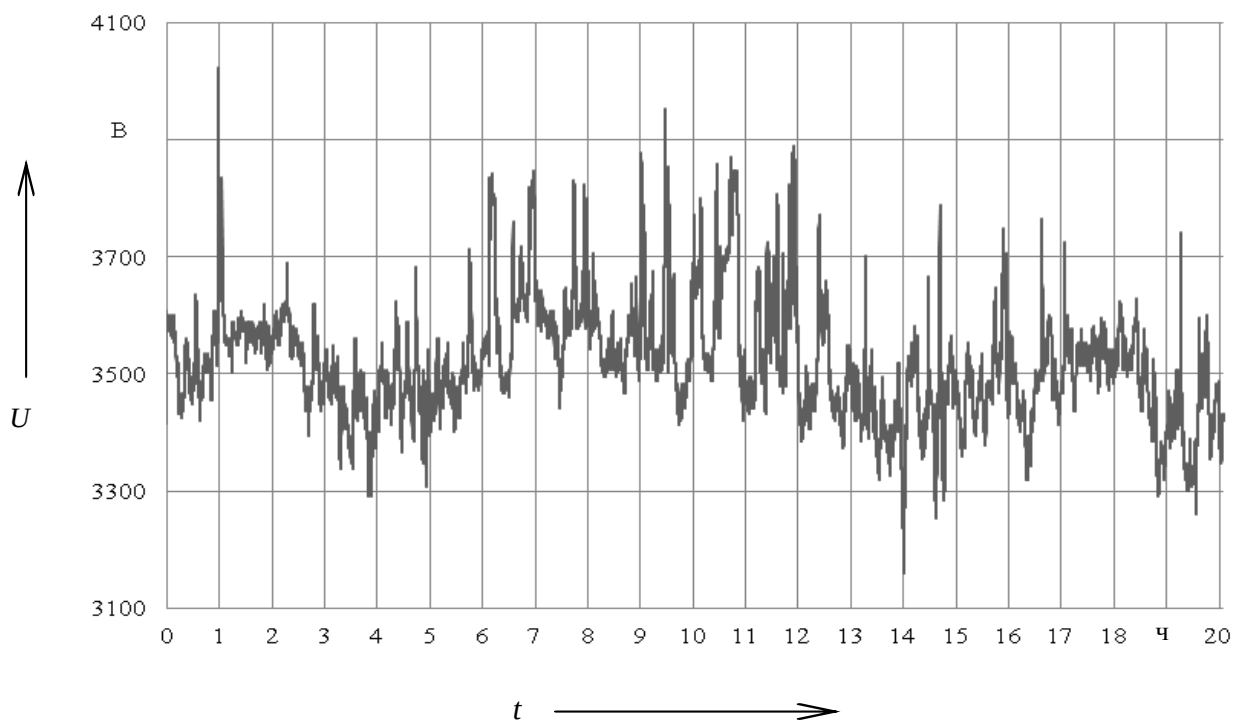


Рисунок 1 – График напряжения на шинах 3,3 кВ с неуправляемыми выпрямителями

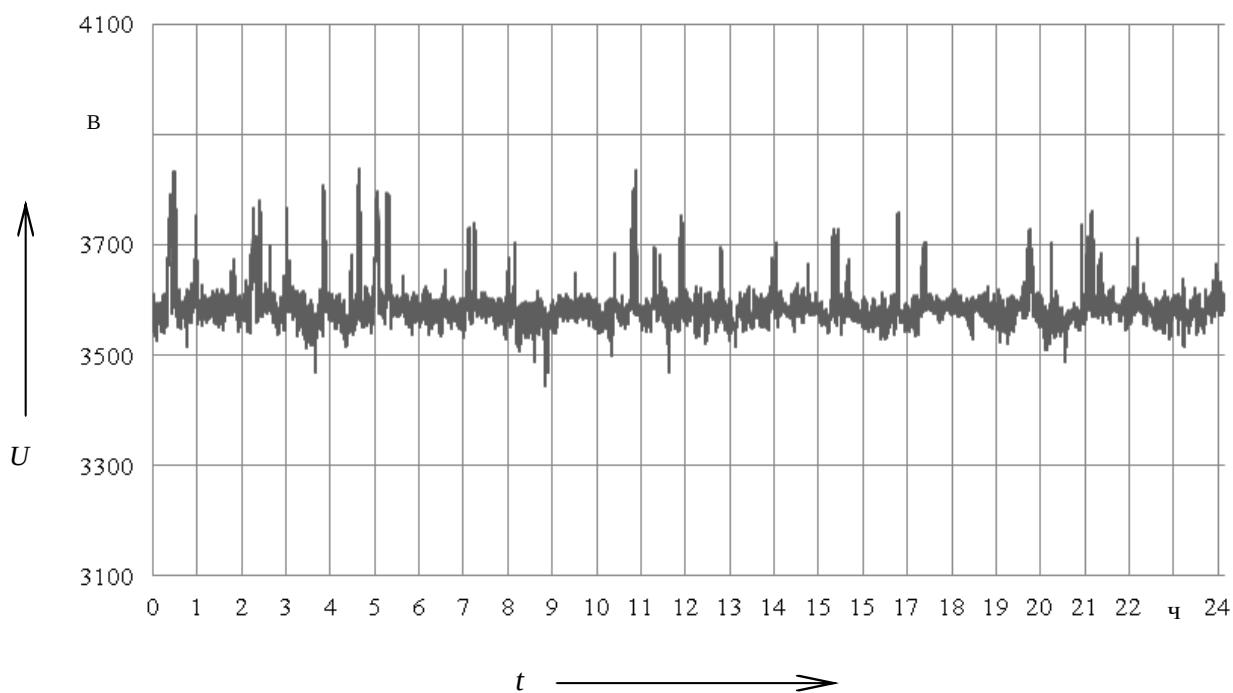


Рисунок 2 – График напряжения на шинах 3,3 кВ с системой автоматического регулирования напряжения

На активных постах секционирования (ПС) режим напряжения определяется тяговой нагрузкой и мощностью вольтодобавочного устройства, подключенного к шинам поста секционирования. К активным ПС относятся также и посты с присоединенными к их шинам пунктами повышения напряжения (ППН), связанными с распределительными устройствами подстанций линиями постоянного тока 6,6 кВ. В этом случае режим напряжения в отличие от пассивных ПС определяется внешней характеристикой ППН и уставками его включения/выключения (напряжением стабилизации).

Экспериментальные исследования проводились на участке постоянного тока Свердловской железной дороги. Полигон представляет собой часть двухпутного участка, эксплуатационная протяженность электрифицированных линий которого составляет 22 км (рисунок 3).

ТП в границах рассматриваемого участка эксплуатируются Свердловской дистанцией электроснабжения ЭЧ-3 (структурное подразделение Свердловской дирекции инфраструктуры), присоединены к ЛЭП 110 кВ «Свердловэнерго» – филиала МРСК Урала (ОАО «Россети»). По типу подключения к системе внешнего электроснабжения ТП являются транзитными. ППН присоединен к ЛЭП 6,6 кВ.

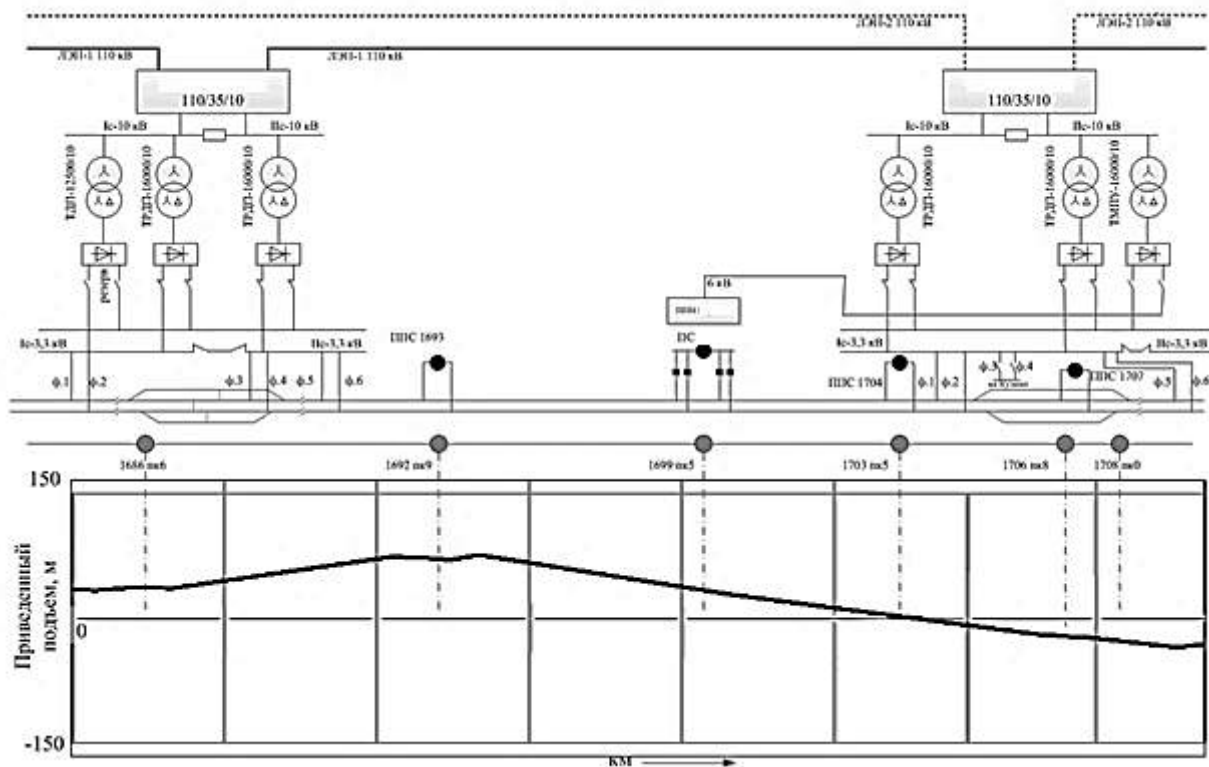


Рисунок 3 – Схема секционирования контактной сети и профиль пути исследуемого участка

Рассматриваемый участок характеризуется сложным (горным) профилем пути с уклоном до 13,7 ‰. Тип профиля по классификации ВНИИЖТа – четвертый.

Тяговая сеть четного и нечетного путей на протяжении всего участка выполнена с использованием несущего троса М-120, двух контактных проводов марки МФ-100 и двух усиливающих проводов А-185, рельс – Р65.

Среднее значение объема электроэнергии, передаваемой ППН в контактную сеть, составляет 170 кВт·ч и изменяется в диапазоне 80 – 400 кВт·ч (данные значения получены для участка с IV типом профиля).

В границах обследуемого участка смонтированы один ПС и пять пунктов параллельного соединения (ППС). Все ПС и ППС находятся в рабочем (включенном) состоянии. На участке применяется параллельный режим питания межподстанционных зон.

С целью измерений на ПС на присоединении 3,3 кВ ППН был установлен испытательный комплекс ОмГУПС, позволяющий регистрировать параметры тяговой нагрузки (ток,

напряжение, электроэнергию и т. д.) с интервалами усреднения, равными одной секунде. Результаты измерений графика тяговой нагрузки активного ПС с ППН представлены на рисунке 4 [8].

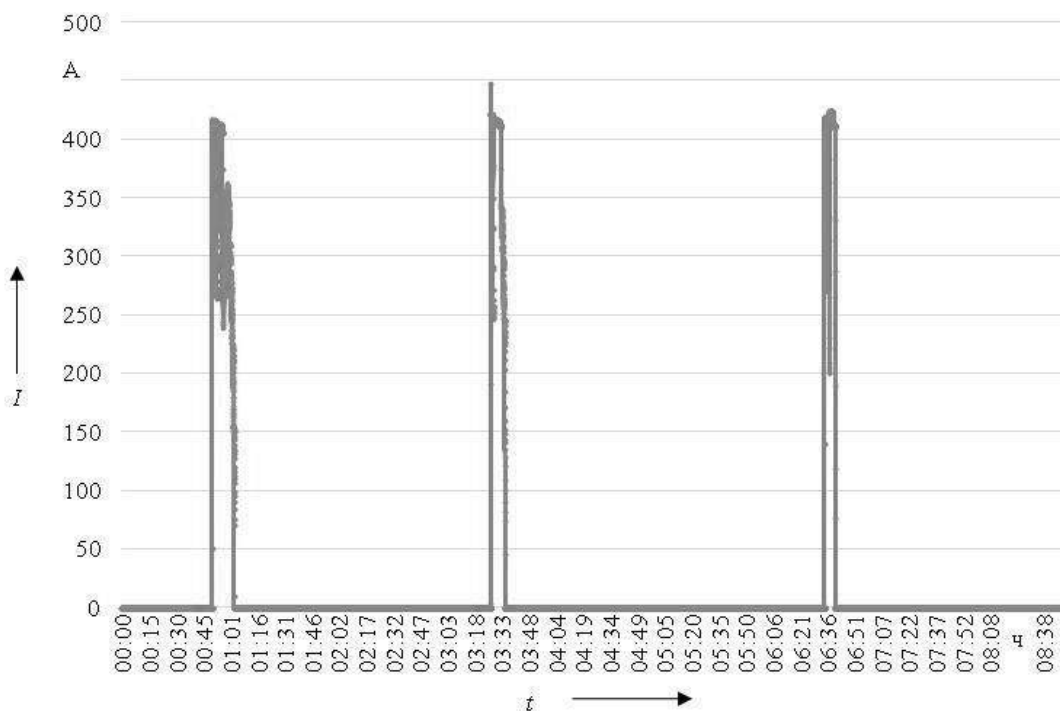


Рисунок 4 – Суточный график тяговой нагрузки на ПС ППН

Максимальная измеренная мощность ППН не превышает 2,9 МВт за период измерений. В результате измерений установлено также, что режиму работы ППН, определяемому уровнем напряжения на шинах ПС, соответствует удельный вес использования ППН на уровне 5,76 %. Результаты первичной статистической обработки полученных измерений во время работы ППН представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Основные статистические характеристики напряжения на ПС с ППН за сутки

Тип линейного элемента СТЭ	Напряжение, В		Математическое ожидание, В	СКО, В	Время работы ППН, мин
	максимальное	минимальное			
ППН	3853	3146	3524	111	83

Таблица 2 – Частоты распределения напряжения и вероятность его появления

Диапазон напряжений, В		Количество случаев попадания в интервал	Вероятность появления напряжения, %
минимальный	максимальный		
3146	3225	250	0,3
3224	3303	3956	4,7
3303	3382	9106	10,8
3382	3460	9069	10,7
3460	3539	12038	14,3
3539	3617	43088	51,2
3617	3696	4968	5,9
3696	3775	1302	1,6
3775	3853	383	0,5

Гистограмма распределения напряжения по частоте появления представлена на рисунке 5, а гистограмма распределения тяговой нагрузки по частоте появления – на рисунке 6.

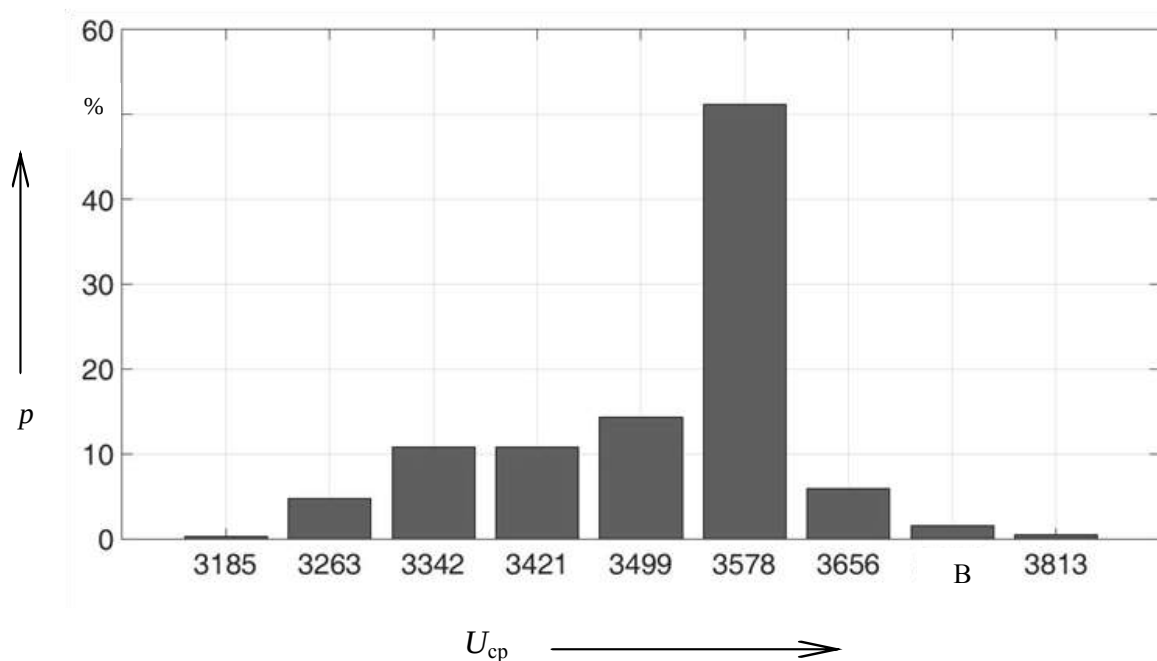


Рисунок 5 – Частотная гистограмма распределения напряжения на ПС ППН

Пост секционирования с ППН является активным ПС. Режим работы данного ПС определяется уставкой включения по напряжению. В таблице 3 представлены значения наблюдаемых частот объема электроэнергии. На рисунке 7 показана гистограмма распределения объема электроэнергии для каждого случая передачи электроэнергии ППН в контактную сеть [9].

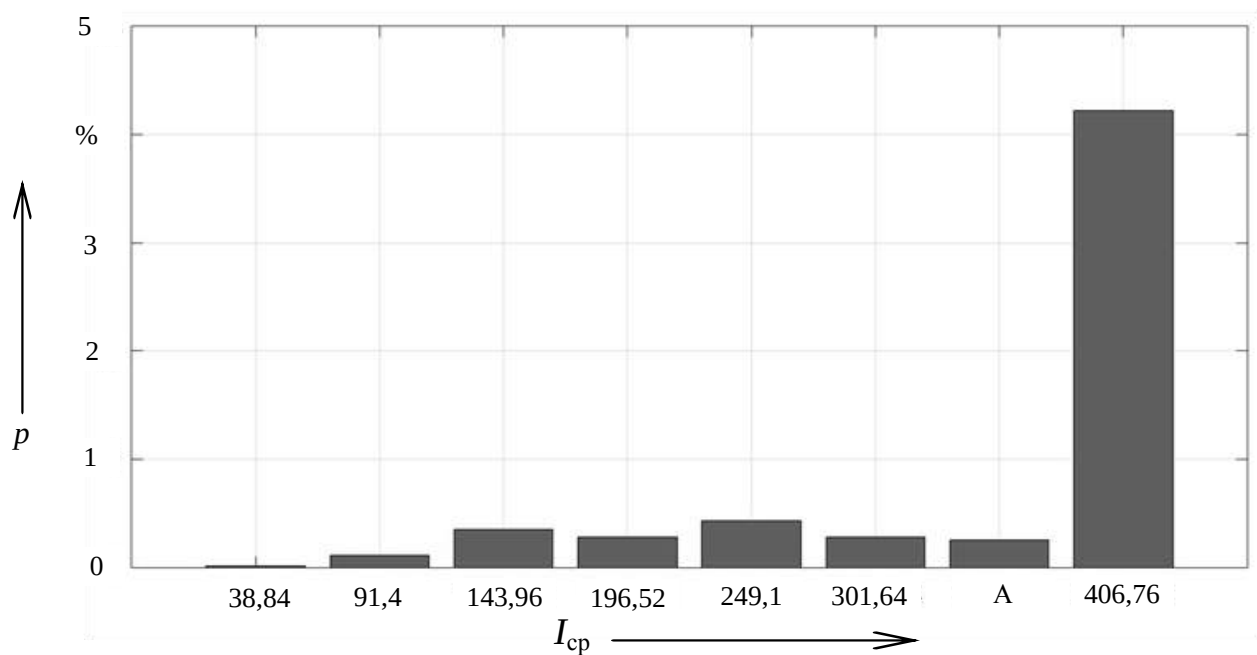


Рисунок 6 – Частотная гистограмма распределения тяговой нагрузки ППН на ПС

Таблица 3 – Электроэнергия контактной сети, полученная от пункта повышения напряжения

Диапазон наблюдений, кВт·ч	Количество наблюдений, шт.	Частота наблюдений, %	Ожидаемое количество наблюдений, шт.	Ожидаемая частота, %	Расхождение наблюдаемой и ожидаемой частот, шт.
Менее 120	0	0,0	2	13,2	-2
120	3	20,0	2	14,2	1
160	4	26,7	3	19,2	1
200	6	40,0	3	20,0	3
240	1	6,7	2	16,1	-1
280	0	0,0	2	10,0	-2
320	0	0,0	1	4,8	-1
360	0	0,0	0	1,8	0
400	0	0,0	0	0,5	0
Свыше 400	1	6,7	0	0,1	1

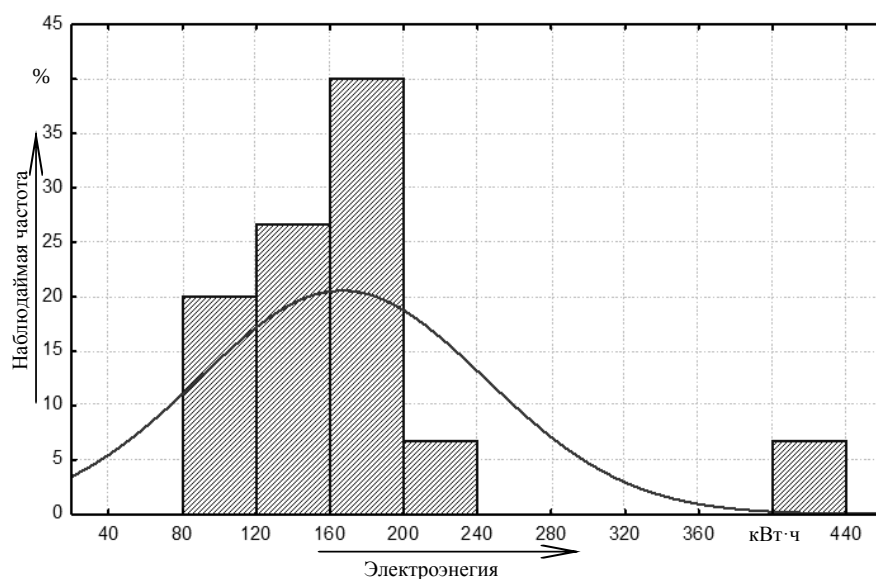


Рисунок 7 – Гистограмма распределения объема электроэнергии, передаваемой ППН в контактную сеть

Средняя продолжительность работы ППН в активном режиме (при понижении напряжения на шинах ПС ниже 3,3 кВ) составляет 8,6 мин, диапазон изменения продолжительности случая работы в активном режиме – 3,8 – 19,3 мин. Гистограмма распределения продолжительности работы ППН по случаям перехода в активный режим приведена на рисунке 8. На рисунке 9 представлена гистограмма распределения продолжительности случаев наблюдения напряжения выше 3650 В на шинах ПС с ППН [10]. В 90 % случаев продолжительность превышения напряжения носит кратковременный характер и находится в диапазоне 0 – 100 с.

Результаты измерений графика нагрузки и напряжения в различных режимах работы ЭПС, активных и пассивных ПС позволяют сделать следующие выводы:

продолжительность наблюдения максимальных значений напряжения на шинах подстанции выше среднего уровня напряжения холостого хода составляет около 5 – 10 % от времени суток;

наблюдаемые значения тока рекуперации ЭПС на участке хорошо согласуются со значениями перетоков по присоединениям ТП с неуправляемыми выпрямителями и выпрямителями с автоматическим регулированием напряжения – наблюдаемые значения перетоков достигают уровня 575 А при усредненных уровнях рекуперации 890 А;

продолжительность наблюдения повышения напряжения выше напряжения холостого хода на шинах активных постов секционирования составляет около 7 – 8 % времени суток, пассивных – 10 – 13 %;

для активных ПС в СТЭ с автоматическим регулированием напряжения на шинах ТП продолжительность времени, когда напряжение на шинах ПС превышает уровень холостого хода 3650 В ТП, составляет около 8–9 %. Продолжительность эпизодов превышения напряжения холостого хода в 90 % случаев находится в диапазоне 0–100 с, а максимальная продолжительность эпизода не превышает 500 с. Максимальная мощность в активном режиме при понижении напряжения составляет 2,9 МВт. Средний объем электроэнергии, возвращаемый в контактную сеть ППН, за один случай составляет 170 кВт·ч. Средняя продолжительность работы в активном режиме для одного случая – 8,6 мин.

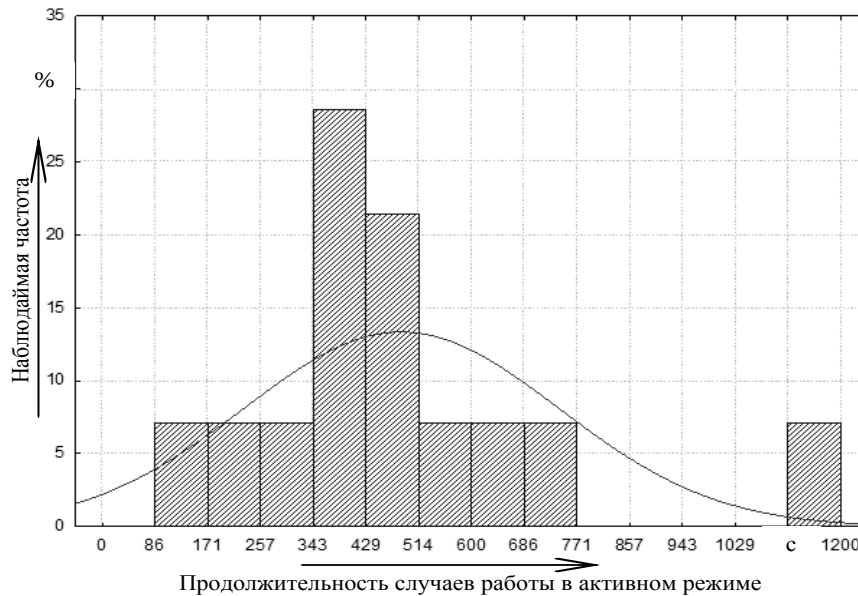


Рисунок 8 – Частотная гистограмма распределения объема электроэнергии, передаваемой от ППН в контактную сеть

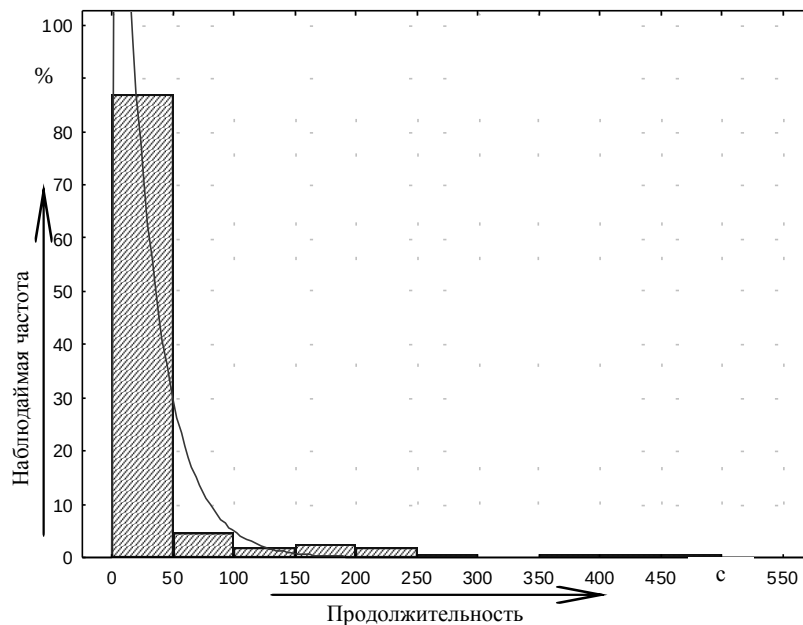


Рисунок 9 – Частотная гистограмма распределения продолжительности эпизодов превышения напряжения уровня 3650 В на шинах ПС с ППН

Результаты обработки данных поездок локомотивов серий 2ЭС10 и 2ЭВ120 с тяжеловесными и длинносоставными поездами в ходе подконтрольной эксплуатации показывают,

что напряжение на токоприемниках электровозов в режиме рекуперации находится в широком диапазоне: 3250 – 3900 В, при этом для эпизодов применения рекуперативного торможения наиболее наблюдаемый диапазон минимальных значений напряжения – 3440 – 3650 В (36 % случаев), максимальных значений напряжений – 3500 – 3900 В (64 % случаев). Наблюдаемые минимальные значения тока для эпизодов применения рекуперации близки к нулевым значениям (29 % случаев), наблюдаемые максимальные значения тока – 250 А (22 % случаев).

На основе полученных данных можно рассмотреть использование накопителя электрической энергии (НЭЭ) в качестве приемника энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения. Если размещение инверторов в системе тягового электроснабжения неразрывно связано с тяговыми подстанциями, то НЭЭ можно размещать на объектах, непосредственно не связанных с внешней системой электроснабжения, например, на ПС [11]. Это позволяет в ряде случаев приблизить приемник энергии к местам с наибольшими частотой применения рекуперативного торможения или объемом рекуперации.

Результаты проведенного в системе MatLab имитационного моделирования взаимодействия ЭПС и СТЭ на исследуемом эксплуатационном участке железной дороги постоянного тока показали, что применение накопителей энергии на посту секционирования позволяет сократить уровень электропотребления по ТП за счет повышения эффективности рекуперативного торможения на величину 1,7 %. Одновременно с этим применение накопителей позволяет увеличить средний уровень напряжения на токоприемнике ЭПС и снизить средний ток тяговой нагрузки ТП, что способствует увеличению пропускной и провозной способности участка железной дороги. Аналогичные технические решения можно применять в условиях движения городского транспорта. НЭЭ позволят выравнять токовые нагрузки на элементах СТЭ и повышать средний уровень напряжения в тяговой сети. Оценка влияния энергоемкости и режимов работы НЭЭ на энергетическую эффективность СТЭ в условиях различных профилей пути, скоростей движения и масс подвижного состава, а также в условиях построения интеллектуальных СТЭ требует проведения дополнительных исследований.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» до 2020 года и на перспективу до 2030 года: Распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2537р [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2016.
2. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2014.
3. Никифоров, М. М. Нормативно-правовое обеспечение деятельности по энергосбережению в холдинге «Российские железные дороги» и механизмы ее реализации [Текст] / М. М. Никифоров, В. Л. Незевак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 4 (24). – С. 68 – 75.
4. Штанг, А. А. Применение накопителей энергии в системах электроснабжения городского электрического транспорта [Текст] / А. А. Штанг, Е. А. Спиридонов, М. В. Ярославцев // Транспорт Российской Федерации. – СПб: Т-Пресса, 2012. – № 3-4 (40-1). – С. 68 – 70.
5. Панов, К. В. Система моделирования и управления технологическим процессом ремонта подвижного состава [Текст] / К. В. Панов // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 211 – 218.
6. Шатохин, А. П. Перспективные места установки накопителей электрической энергии на железнодорожном транспорте [Текст] / А. П. Шатохин // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 162 – 168.
7. Чудновец, С. П. Накопители электрической энергии для систем генерирования электрической энергии (аналитический обзор) [Текст] / С. П. Чудновец, С. А. Харитонов // Науч-

ный вестник Новосибирского гос. техн. ун-та / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск. – 2013. – С. 163 – 172.

8. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

9. Незевак, В. Л. Перспективы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока [Текст] / В. Л. Незевак, В. Т. Черемисин // Бюллетень результатов научных исследований / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб. – 2015. – № 1 (14). – С. 76 – 83.

10. Бирюков, В. В. К расчету параметров накопителей электрической энергии на железнодорожном транспорте [Текст] / В. В. Бирюков, А. А. Маликова // Транспорт: наука, техника, управление / Всероссийский институт научной и технической информации РАН. – М. – 2013. – № 6. – С. 43 – 46.

11. Спиридонов, Е. А. Применение накопителей энергии для выравнивания нагрузок в системе электроснабжения городского электрического транспорта [Текст] / Е. А. Спиридонов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2008. – С. 258 – 262.

References

1. *Energeticheskaya strategiya kholdinga «RZHD» do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda: Rasporyazheniye OAO «RZHD» ot 14.12.2016 № 2537r* (Energy strategy of the holding «RZD» until 2020 and for the future until 2030: Order of JSC Russian Railways of December 14, 2016 No. 2537r. Moscow, 2016.

2. *Metodika analiza i prognozirovaniya raskhoda TER na tyagu poyezdov* (Methodology for the analysis and forecasting of fuel consumption for rail traction). Moscow: OAO «RZHD», 2014.

3. Nikiforov M. M., Nezevak V. L. Normative and legal support of energy saving activities in the holding «Russian Railways» and mechanisms for its implementation [Normativno-pravovoye obespecheniye deyatelnosti po energosberezheniyu v kholdinge «Rossiyskiye zheleznyye dorogi» i mekhanizmy yeye realizatsii]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 4 (24), pp. 68 – 75.

4. Shtang A. A., Spiridonov E. A., Yaroslavtsev M. V. Use of energy storage devices in power supply systems of urban electric transport [Primeneniye nakopiteley energii v sistemakh elektrosnabzheniya gorodskogo elektricheskogo transporta]. *Transport of the Russian Federation – Science journal*, 2012, no. 3-4 (40-41), pp. 68 – 70.

5. Panov K. V. System of modeling and control of the technological process of repair of rolling stock [Sistema modelirovaniya i upravleniya tekhnologicheskim protsessom remonta podvizhnogo sostava]. *Materialy nauch.-prakt. konf. «Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials scientific-practical. conf. «Innovative projects and technologies in education, industry and transport»). – Omsk, 2016. pp. 211 – 218.

6. Shatokhin A. P. Perspective locations for the installation of electrical energy storage devices on railway transport [Perspektivnyye mesta ustanovki nakopiteley elektricheskoy energii na zheleznodorozhnom transporte]. *Materialy nauch.-prakt. konf. «Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povysheniye effektivnosti tyagi poyezdov»* (Materials scientific-practical. conf. «Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction»). – Omsk, 2014. pp. 162 – 168.

7. Chudnovets S. P., Kharitonov S. A. Electricity storage for electrical energy generation systems (analytical review) [Nakopiteli elektricheskoy energii dlya sistem generirovaniya elektricheskoy energii (analiticheskiy obzor)]. *Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University – Science journal*, 2013, pp. 163 – 172.

8. Kobzar A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* (Applied mathematical statistics. For engineers and scientists) Moscow: FIZMATLIT, 2006, 816 p.

9. Nezevak V. L., Cheremisin V. T. Prospects for the use of electrical energy storage devices in the system of direct current power supply [Perspektivy primeneniya nakopiteley elektricheskoy energii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka]. *Bulletin of the results of scientific research – Science journal*, 2015, no. 1 (14), pp. 76 – 83.

10. Biryukov V. V., Malikova A. A. To the calculation of parameters of electric energy storage devices on railway transport [K raschetu parametrov nakopiteley elektricheskoy energii na zheleznodorozhnom transporte]. *Transport: science, technology, management – Science journal*, 2013, no. 6, pp. 43 – 46.

11. Spiridonov E. A. Use of energy storage devices for leveling loads in the power supply system of urban electric transport [Primeneniye nakopiteley energii dlya vyравnivaniya nagruzok v sisteme elektrosnabzheniya gorodskogo elektricheskogo transporta]. *Scientific Problems of Transport of Siberia and the Far East – Science journal*, 2008, pp. 258 – 262.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Доманов Кирилл Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Инженер, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (923) 671-56-33.

E-mail: domanov35@gmail.com

Незевак Владислав Леонидович

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) 44-39-23.

E-mail: NezevakWL@mail.ru

Шатохин Андрей Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: Shatohin_ap@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Доманов, К. И. Исследование режимов работы системы тягового электроснабжения в целях установки накопителя электрической энергии [Текст] / К. И. Доманов, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 65 – 75.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Domanov Kirill Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Engineer, graduate student of the Department «Railway Rolling Stock», OSTU.

Phone: +7 (923) 671-56-33.

E-mail: domanov35@gmail.com

Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D., docent of the Department «Power supply of railway transport», OSTU.

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

E-mail: NezevakWL@mail.ru

Shatohin Andrei Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D., docent of the Department «Railway Rolling Stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: Shatohin_ap@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Domanov K.I., Nezevak V.L., Shatohin A.P. Study of operation modes of the electrical power supply system for installation of electric energy storage drivers. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 2, no 34, pp. 65 – 75 (In Russian).

УДК 621.31

А. А. Комяков, А. В. Пономарев, В. В. Эрбес

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

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕРВИСНЫХ ЛОКОМОТИВНЫХ ДЕПО

Аннотация. В статье проанализированы результаты оценки времени работы и потребления электроэнергии оборудования компрессорной сервисного локомотивного депо (СЛД) Москва Западно-Сибирской железной дороги. Представлены алгоритмы подготовки данных для моделирования и оценки эффективности производственного процесса. Определены основные факторы, влияющие на потребление мощности компрессорного оборудования, и представлены результаты оценки их влияния. На основе полученных зависимостей разработана математическая модель процесса электропотребления оборудования компрессорной с использованием нечетких нейронных сетей и определена ее точность. Представлен интерфейс разработанного программного комплекса при оценке влияния факторов на процесс электропотребления оборудования СЛД Москва.

Ключевые слова: энергосбережение, нерациональное потребление электроэнергии, корреляционный анализ, энергетическая эффективность, нечеткие нейронные сети.

Alexander A. Komyakov, Anton V. Ponomarev, Viktor V. Erbes

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

THE DEVELOPMENT AND APPROBATION TECHNOLOGIES OF INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF PRODUCTION PROCESSES IN SERVICE LOCOMOTIVE DEPO

Abstract. The article analyzes the results of the assessment operating time and power consumption of compressor equipment service locomotive depo Moscow West-Siberian Railway. The algorithms for data preparation for modeling and evaluating the efficiency of the production process are presented. The main factors influencing the power consumption of the compressor equipment are determined and the results of the assessment of their influence are presented. On the basis of the dependences obtained, a mathematical model of the process of power consumption of compressor equipment using fuzzy neural networks and its accuracy is determined. The interface of the developed program complex is presented at an estimation of influence of factors on process of power consumption of the equipment service locomotive depo Moscow West-Siberian Railway.

Keywords: energy saving, inefficient electricity consumption, correlation analysis, energy efficiency, fuzzy neural networks.

Потребление электроэнергии, обновление, техническое обслуживание и ремонт оборудования на предприятиях РФ являются одними из основных категорий затрат на производстве. Значительный моральный и физический износ электрооборудования на большинстве предприятий является одной из причин недостаточной энергетической эффективности в большинстве отраслей, в том числе и на железнодорожном транспорте.

Это не позволяет на должном уровне обеспечить устойчивое положение российских предприятий на внутреннем и тем более на внешнем рынке продуктов и услуг. Так, по данным Международного энергетического агентства, энергоемкость ВВП России более чем в 2,5 раза выше, чем в Германии, и в 1,5 раза выше, чем в схожей по климатическим условиям Канаде. При этом в соответствии с указом Президента РФ от 4 июня 2008 г. № 889 перед отраслью ставится задача снизить к 2020 г. энергоемкость ВВП не менее чем на 40 % от уровня 2007 г.

Одним из перспективных путей развития с рассматриваемой точки зрения является реализация концепции «умных предприятий». В России и за рубежом известны проекты «умных домов», «умных вокзалов», которые в первую очередь направлены на снижение расхода электроэнергии по условно-постоянной составляющей электропотребления (освещение, электроотопление и др.), непосредственно не связанной с производственным процессом.

В исследовании поставлена задача разработки и апробации технологии повышения энергоэффективности производственных процессов на примере сервисного локомотивного депо.

В настоящее время доля расходов на электроэнергию у энергоемких предприятий достигает до 50 % от затрат на производство продукции [1]. По этой причине предприятия внедряют современное автоматизированное электрооборудование с повышенной энергетической эффективностью и энергосберегающие устройства [2 – 4]. Однако на большинстве предприятий, в том числе и на железнодорожном транспорте, остаются производственные процессы, в которых режим эксплуатации используемого электрооборудования зависит от человеческого фактора. В некоторых случаях это является причиной нерационального использования электроэнергии, устранение которого приведет к снижению потребления электроэнергии в цехах и на производственных участках предприятий.

В зависимости от объема и сложности работ для поддержания непрерывности производственного процесса требуется содержать электрооборудование в работоспособном состоянии. Для этого необходимо выполнять непрерывный мониторинг состояния электрооборудования и на основании этого обеспечивать своевременное и качественное выполнение технического обслуживания, ремонтов и профилактических испытаний электрооборудования. За счет своевременного выполнения технического обслуживания и ремонта обеспечивается работоспособное состояние и, как следствие, продление ресурса электрооборудования [5 – 7].

Решением данных проблем являются разработка интеллектуальной системы повышения энергетической эффективности эксплуатации и продления ресурса электрооборудования предприятий (далее – интеллектуальная система) за счет устранения нерационального потребления электроэнергии и своевременного проведения технического обслуживания и ремонта электрооборудования. Авторами разработан опытный образец интеллектуальной системы (рисунок 1), включающий в себя следующие основные элементы:

- 1) бесконтактные датчики переменного магнитного поля для учета времени наработки электрооборудования в различных режимах (отключен, включен при различных нагрузках);
- 2) блок сбора и обработки данных времени наработки электрооборудования и передачи на персональный компьютер;
- 3) юлок анализа, моделирования и прогнозирования потребления электроэнергии и времени наработки электрооборудования, расчета эффективности эксплуатации электрооборудования, определения мест нерационального потребления электроэнергии, определения оборудования, требующего технического обслуживания или ремонта, и формирования отчетных форм (блок устанавливается на персональном компьютере).

Авторами получен патент на полезную модель на указанное устройство [8].



Рисунок 1 – Внешний вид опытного образца интеллектуальной системы

Для подтверждения работоспособности разработанных элементов выполнена апробация интеллектуальной системы. В качестве объекта апробации выбрана компрессорная сервисного локомотивного депо Московка, так как оборудование компрессорной имеет высокую энергоемкость. В компрессорной используется следующее оборудование: компрессор № 1 мощностью 160 кВт, компрессор № 2 мощностью 132 кВт, насос мощностью 7,5 кВт, электрическая тепловая пушка мощностью 15 кВт.

Счетчик для учета сжатого воздуха в компрессорной отсутствует.

Бесконтактные датчики переменного магнитного поля для учета времени наработки электрооборудования были подключены в распределительном щите к кабелям, питающим оборудование компрессорной (рисунки 2, 3). Для учета потребления электроэнергии использовался энерготестер ПКЭ-А.



Рисунок 2 – Внешний вид конструкции крепления датчика к кабелю

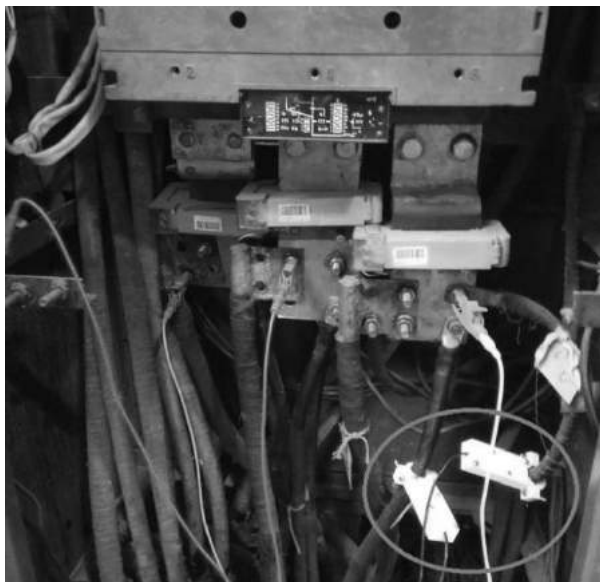


Рисунок 3 – Места подключения бесконтактных датчиков к кабелям, питающим компрессорное оборудование

Измерение времени работы и потребления электроэнергии оборудования компрессорной производилось с 9:00 14.02.2018 до 9:00 15.02.2018. В результате измерения времени работы оборудования были выявлены следующие режимы работы: компрессор № 1 работает в качестве основного; компрессор № 2 работает в качестве резервного и включается, когда давление воздуха в пневматической магистрали СЛД Московка не может поддерживать ком-

прессор № 1; насос и электрическая тепловая пушка постоянно находятся в работе. Графики включения и отключения компрессоров № 1 и № 2 представлены на рисунке 4.

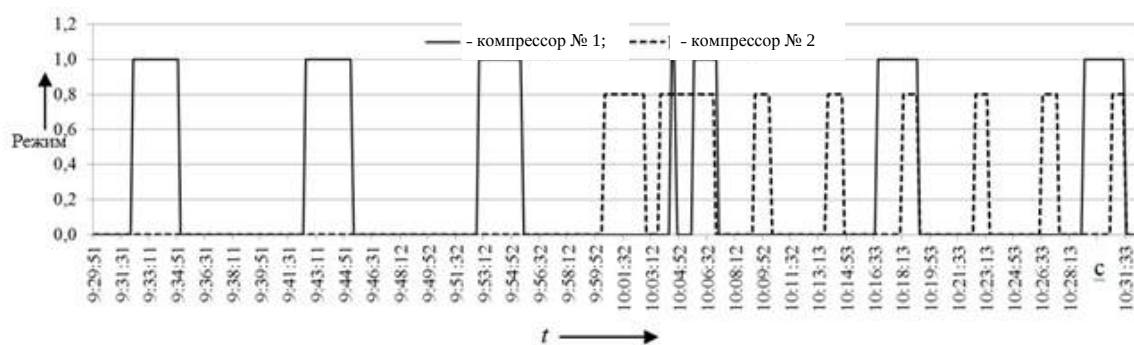


Рисунок 4 – Графики работы компрессоров № 1 и № 2 СЛД Московка

Включенное состояние компрессора № 1 на рисунке 3 представлено значением 1, а отключенное – 0. Включенное состояние компрессора № 2 на рисунке 3 представлено значением 0,8; а отключенное – 0. Графики работы компрессорных установок подтверждаются потреблением мощности оборудования компрессорной СЛД Московка (рисунок 5). Из рисунка 3 видно, что начиная с 10:00 давление воздуха в пневматической магистрали снижается до уровня, при котором периодически включается компрессор № 2. Полученные данные о времени работы компрессорных установок позволяют определить режимы работы и их эффективность; объем сжатого воздуха, произведенного компрессорами № 1 и № 2; распределение нагрузки между компрессорами; периодичность технического обслуживания и ремонта компрессорных установок в зависимости от выполненной работы и т. д. На основании выполненного анализа режимов работы составляется программа по продлению срока службы оборудования.

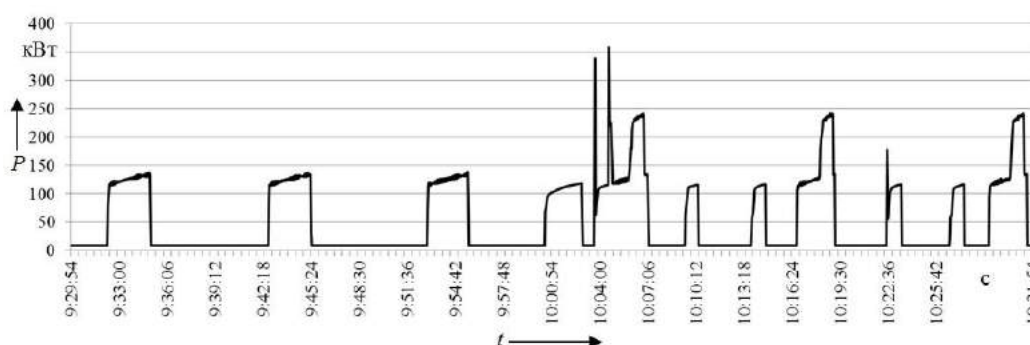


Рисунок 5 – График потребления мощности оборудования компрессорной СЛД Московка

Из графика потребления мощности оборудования компрессорной видно, что присутствует постоянное потребление мощности, обусловленное работой насоса и тепловой пушки в размере 9 кВт, а также периодическое включение компрессоров № 1 и № 2. Работа насоса и тепловой пушки приняты условно постоянными величинами, так как они работали постоянно в одном режиме на всем протяжении измерений.

Полученные данные по потребляемой мощности и времени работы оборудования компрессорной СЛД Московка обработаны блоком анализа, моделирования и прогнозирования потребления электроэнергии и времени наработки электрооборудования, который позволяет отображать процесс электропотребления производственного участка (в том числе в режиме реального времени);

определять рекомендуемый объем выборки для качественного нейросетевого моделирования производственного процесса;

выполнять анализ влияния факторов на расход электроэнергии и подготавливать с учетом результатов этого анализа данные для нейросетевого моделирования;

оценивать эффективность производственного процесса, организационно-технических мероприятий и внедряемых электроустановок.

Определение рекомендуемого объема выборки с данными для моделирования происходит после загрузки данных о реальном расходе электроэнергии с учетом допустимой погрешности и сопровождается отображением выборки в окне программы.

В блок анализа, моделирования и прогнозирования потребления электроэнергии и времени наработки электрооборудования включены два алгоритма: подготовки данных для моделирования (рисунок 5, а) и оценки эффективности производственного процесса (рисунок 6, б).

Подготовка данных для моделирования происходит с учетом результатов корреляционного анализа предоставленных данных. При этом некоторые факторы могут быть исключены из результирующей выборки, если по результатам анализа выяснено, что [9, 10]

- факторы не оказывают существенного влияния на расход электроэнергии;
- факторы имеют значительную корреляционную зависимость от других факторов (в этом случае выбирается фактор с наибольшим влиянием на расход электроэнергии).

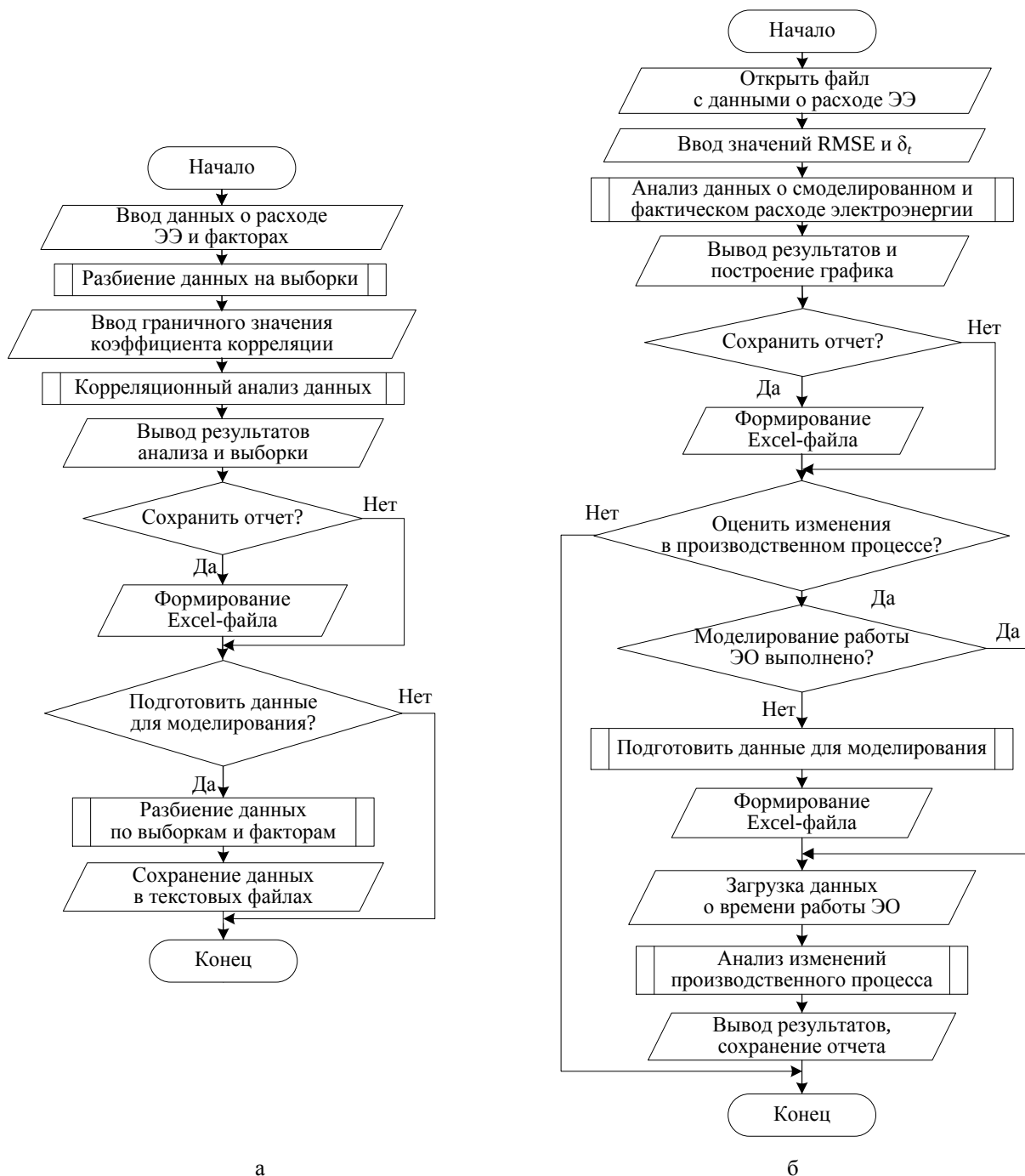


Рисунок 6 – Алгоритмы подготовки данных для моделирования (а) и оценки эффективности производственного процесса (б)

В результате обработки измеренных данных потребляемой мощности и времени работы оборудования компрессорной СЛД Московка выявлены следующие зависимости: потребляемая мощность и время работы компрессора № 1 (рисунок 7, а), потребляемая мощность и время работы компрессора № 2 (рисунок 7, б). Результаты оценки влияния факторов на потребляемую мощность представлены на рисунке 8. Частный коэффициент корреляции между потребляемой мощностью и временем работы компрессора № 1 составил 0,38, а между потребляемой мощностью и временем работы компрессора № 2 – 0,58.

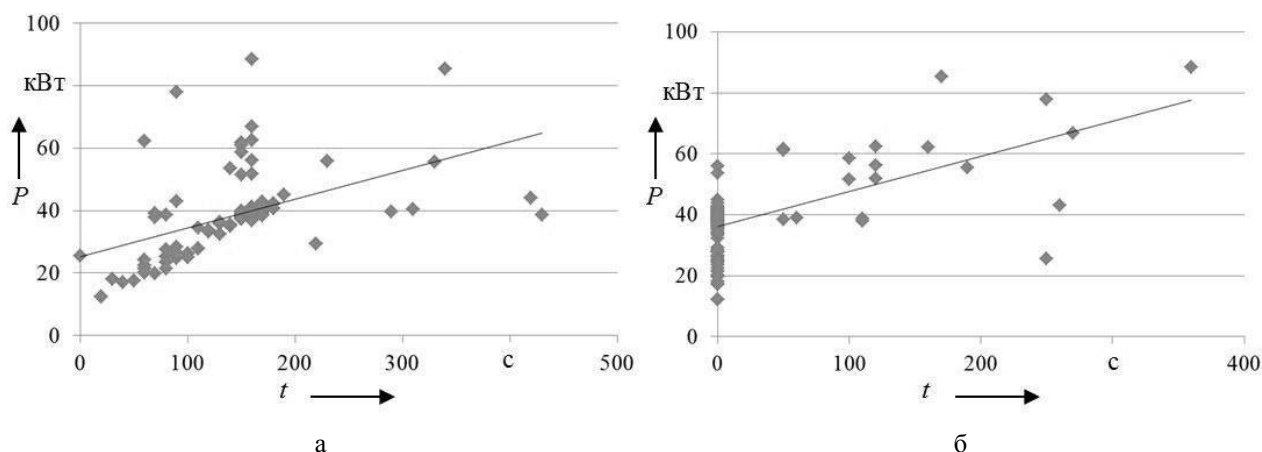


Рисунок 7 – Зависимости потребления мощности от времени работы компрессора № 1 (а) и компрессора № 2 (б)

На основании полученных зависимостей разработана математическая модель процесса электропотребления оборудования компрессорной СЛД Московка, структурная схема которой представлена на рисунке 9. В качестве математического аппарата использовались нечеткие нейронные сети.

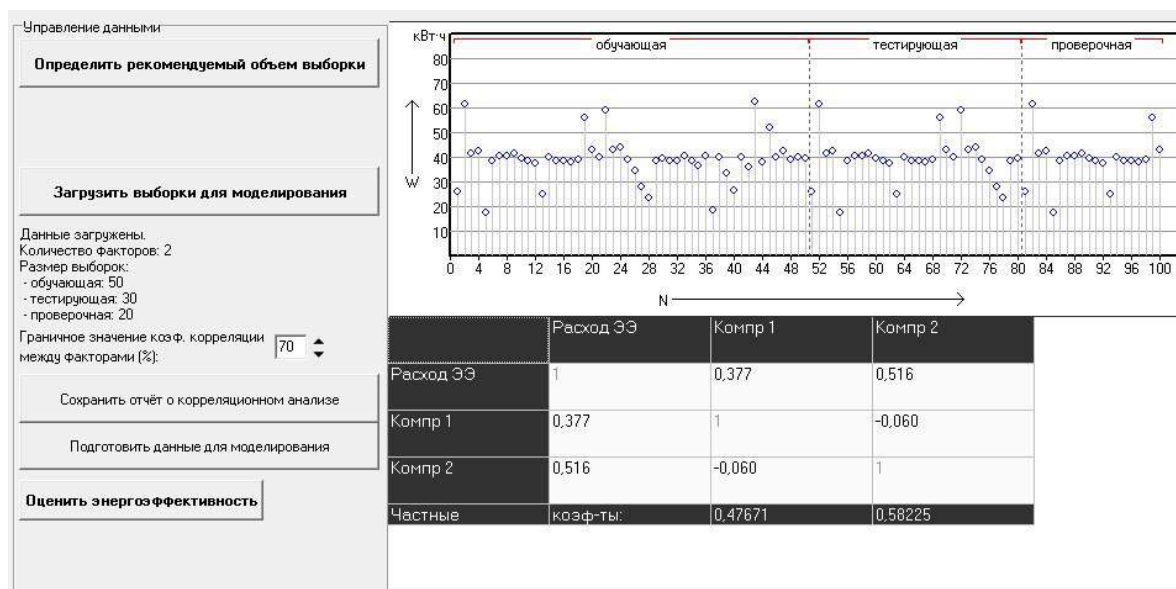


Рисунок 8 – Применение программного комплекса для оценки влияния факторов на процесс электропотребления

Разработанная математическая модель имеет комбинацию количества треугольных функций принадлежности на входе 3-2. При такой структуре математической модели процесса электропотребления компрессорной средняя квадратическая ошибка *RMSE* составила 3,5 кВт и

средняя относительная погрешность $MAPE$ – 7,1 %. График фактического и смоделированного потребления мощности оборудования компрессорной представлен на рисунке 10.

Таким образом, разработанная математическая модель процесса потребления мощности позволяет определять отклонения расхода электрической энергии, вызванные изменением режимов работы оборудования, и на основании этого анализировать причины перерасхода или экономии электрической энергии. При анализе данных времени работы и потребления мощности оборудования компрессорной выявлены сбои в нормальном режиме работы компрессоров № 1 и № 2, представленные на рисунке 4.

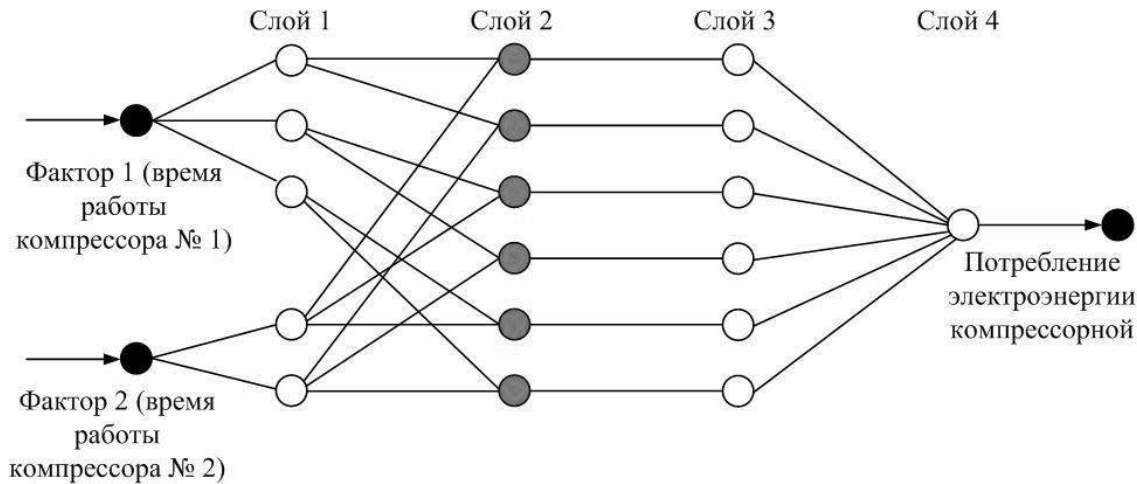


Рисунок 9 – Структурная схема математической модели процесса электропотребления компрессорной СЛД Московка

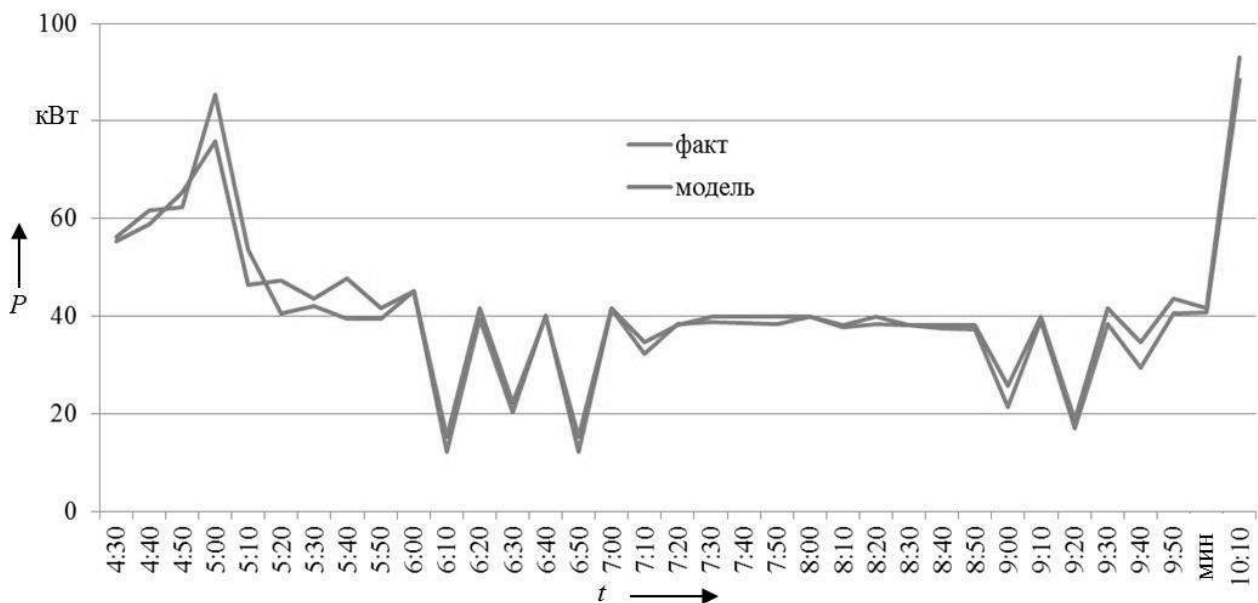


Рисунок 10 – Сравнение фактического и смоделированного значений потребляемой мощности оборудования компрессорной СЛД Московка

На всем протяжении апробации все элементы интеллектуальной системы выполнили свою функцию без перебоев. Таким образом, применение разработанной интеллектуальной системы в цехах и на производственных участках предприятий позволяет в режиме реального времени оценивать энергетическую эффективность производственного процесса, эффективность работы и внедрения нового электрооборудования и определять время наработки оборудования, периодичность технического обслуживания и ремонтов электроустановок.

Перспективным направлением является оснащение предлагаемой системы следующими элементами: датчиками учета изменения климатических факторов (температуры, продолжительности светового дня и облачности) и датчиками подключения к системе учета электрической энергии через гальванически развязанные средства связи (RS-485 или оптопорт).

Список литературы

1. Глухова, М. Г. Развитие методического инструментария экономической оценки эффективности программ энергосбережения промышленных предприятий [Текст] / М. Г. Глухова, А. А. Карташева // Инновации в управлении региональным и отраслевым развитием: Материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием / Тюменский индустриальный университет. – Тюмень, 2014. – С. 93 – 96.
2. Каштанов, А. Л. Автоматизированный программный комплекс по контролю и управлению энергопотреблением в границах железнодорожного узла по данным АСКУЭ [Текст] / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, И. Ю. Норкин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2010. – № 2 (2). – С. 71 – 76.
3. Разработка интеллектуальной системы контроля энергетической эффективности эксплуатации электрооборудования предприятий [Текст] / В. И. Иванченко, А. А. Комяков и др. // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2018. – № 157. – С. 54 – 58.
4. Черемисин, В. Т. Оценка регулирования напряжения на стороне высшего напряжения тяговых подстанций в аспекте энергетической эффективности [Текст] / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 3 (54). – С. 75 – 81.
5. Кириллов, Г. А. Выбор оптимальной периодичности технического обслуживания и ремонта электрооборудования, находящегося в дежурном режиме или на хранении [Текст] / Г. А. Кириллов, Я. М. Кашин // Научные чтения имени профессора Н. Е. Жуковского: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина. – Краснодар, 2014. – С. 212 – 215.
6. Хорошев, Н. И. Статистический метод определения оптимальной периодичности проведения технического обслуживания и ремонта электрооборудования [Текст] / Н. И. Хорошев, Ю. С. Баяндина // Фундаментальные исследования. – Пенза: Академия естествознания, 2016. – № 11-3. – С. 615 – 619.
7. Кириллов, Г. А. Выбор оптимальной периодичности технического обслуживания и ремонта из условия минимального коэффициента неработоспособного состояния электрооборудования [Текст] / Г. А. Кириллов, Я. М. Кашин, А. И. Гайдамашко // Булатовские чтения: Материалы междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар: Издательский дом «Юг», 2017. – С. 78 – 80.
8. Пат. 179019 Российская Федерация, МПК G01R 29/08. Устройство учета времени наработки электрооборудования [Текст] / Черемисин В. Т., Комяков А. А., Эрбес В. В., Плотников Ю. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2017138802; заявл. 25.04.2018; опубл. 07.11.2017, Бюл. № 12.
9. Cheremisin, V. T. Evaluation of the Actual Effectiveness of Energy-Saving Devices based on Artificial Intelligence [Tekst] / V. T. Cheremisin, V. V. Erbes, A. A. Komyakov. International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM). – Chelyabinsk, 2016. – pp. 1 – 4.
10. Комяков, А. А. Автоматизированная система контроля и управления энергетической эффективностью производственных процессов на железнодорожном транспорте [Текст] / А. А. Комяков, В. В. Эрбес // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2015. – С. 104 – 108.

References

1. Gluhova M. G., Kartasheva A. A., Razvitie metodicheskogo instrumentariya ehkonomicheskoy ocenki ehffektivnosti programm ehnergoberezheniya promyshlennyyh predpriyatij [Development of methodological tools for the economic evaluation of the efficiency of energy saving programs for industrial enterprises]. *Materialy Vserossiyskoj s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoy konferencii* (Innovations in the management of regional and sectoral development: Proceedings of the All-Russian International Scientific and Practical Conference). – Tyumen, 2014, pp. 93 – 96.
2. Kashtanov A. L., Komyakov A. A., Norkin I. YU. Avtomatizirovannyj programmnyj kompleks po kontrolyu i upravleniyu ehnergopotrebleniyem v granicah zheleznodorozhnogo uzla po dannym ASKUEH (Automated software package for monitoring and managing energy consumption within the boundaries of the railway junction according to ASKUE). *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 2 (2), pp. 71 – 76.
3. Ivanchenko V. I., Komyakov A. A., Plotnikov YU. V., Erbes V.V. Razrabotka intellektual'noj sistemy kontrolya ehnergeticheskoy ehffektivnosti ehkspluatatsii ehlektrooborudovaniya predpriyatij (Development of an intelligent system for monitoring the energy efficiency of electrical equipment). *Omskij nauchnyj vestnik*, 2018, no. 157, pp. 54 – 58.
4. Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Erbes V. V. Ocenka regulirovaniya napryazheniya na storone vysshego napryazheniya tyagovyh podstancij v aspekte ehnergeticheskoy ehffektivnosti (Estimation of voltage regulation on the higher voltage side of traction substations in the aspect of energy efficiency). *Transport of the Urals*, 2017, no. 3 (54), pp. 75 – 81.
5. Kirillov G. A., Kashin YA. M. Vybora optimal'noj periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta ehlektrooborudovaniya, nahodyashchegosya v dezhurnom rezhime ili na hranenii [The choice of the optimum periodicity of maintenance and repair of electrical equipment in standby or storage mode]. *Materialy IV mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nauchnye chteniya imeni professora N.E. Zhukovskogo»* (Materials of the IV International Scientific and Practical Conference «Scientific readings of the name of Professor N.E. Zhukovsky»). – Krasnodar, 2014, pp. 212 – 215.
6. Horoshev N. I., Bayandina YU. S. Statisticheskij metod opredeleniya optimal'noj periodichnosti proyedeniya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta ehlektrooborudovaniya (Statistical method for determining the optimum periodicity for the maintenance of electrical equipment and maintenance). *Fundamental'nye issledovaniya*, Penza, 2016, no. 11 (3), pp. 615 – 619.
7. Kirillov G. A., Kashin YA. M., Gajdamashko A. I. Vybora optimal'noj periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta iz usloviya minimal'nogo koehfficienta nerabotosposobnogo sostoyaniya ehlektrooborudovaniya [The choice of the optimum periodicity of maintenance and repair from the condition of the minimum coefficient of the inoperative state of electrical equipment]. *Materialy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Bulatovskie chteniya»* (Materials of the First International Scientific and Practical Conference «Bulat's readings»). – Krasnodar, 2017, pp. 78 – 80.
8. Cheremisin V. T., Komyakov A. A., Erbes V. V., Plotnikov YU. V. *Patent RU 2017132802*, 07.11.2017.
9. Cheremisin V. T.; Erbes V. V.; Komyakov A. A., «Evaluation of the Actual Effectiveness of Energy-Saving Devices based on Artificial Intelligence», 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 19 – 20 May 2016. Chelyabinsk, Russia. P. 1 – 4.
10. Komyakov A. A., Erbes V. V. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya i upravleniya ehnergeticheskoy ehffektivnosti proizvodstvennyh processov na zheleznodorozhnom transporte [Automated system for monitoring and managing the energy efficiency of production processes in railway transport]. *Materialy nauchnoj konferencii «Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the scientific conference «Innovative projects and technologies in education, industry and transport»). Omsk, 2015, pp. 104 – 108.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: 8-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

Пономарев Антон Витальевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Эрбес Виктор Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Комяков, А. А. Разработка технологии повышения энергетической эффективности производственных процессов в сервисных локомотивных депо [Текст] / А. А. Комяков, А. В. Пономарев, В. В. Эрбес // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 76 – 85.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Komyakov Alexander Anatolievich

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.

Phone: 8-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

Ponomarev Anton Vitalevich

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.

Erbes Viktor Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation. Cand.Tech.Sci., senior researcher of research-and-production laboratory «Energy-efficient technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Komyakov, A. A. The development technologies of increasing energy efficiency of production processes in service locomotive depo. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 2, no 34, pp. 76 – 85 (In Russian).

УДК 620.91

К. В. Менакер, Д. А. Яковлев, М. В. Востриков

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ), г. Чита, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Аннотация. В статье предложен способ повышения эффективности систем электропитания нетяговых потребителей за счет квадратичного накопления электрической энергии на реактивных элементах в режиме биений частоты. Приводится доказательство энергетической эффективности режима биений по сравнению с режимом полного резонанса применительно к реализации квазирезонансных импульсных источников электропитания. В статье рассматриваются также вопросы выбора оптимальной частоты биений по критерию максимального отношения накапливаемой энергии на реактивных элементах контура к затрачиваемой от первичного источника.

Ключевые слова: резонанс, колебательный контур, импульсный источник, квадратичный способ, частота свободных колебаний.

Konstantin V. Menaker, Dmitriy A. Yakovlev, Maksim V. Vostrikov

Transbaikal Institute of Railway Transport, Chita, the Russian Federation

INCREASE OF EFFICIENCY OF OPERATION OF ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEMS OF NONTYAGOVY CONSUMERS

Abstract. The article proposes a method for increasing the efficiency of power supply systems for non-tangible consumers due to quadratic accumulation of electric energy on reactive elements in the frequency-beating mode. The proof of the energy efficiency of the beating regime in comparison with the full resonance regime with respect to the implementation of quasiresonance pulsed power supplies is given. The article also deals with the choice of the optimal beat frequency by the criterion of the maximum ratio of the accumulated energy on the reactive elements of the circuit to the one expended from the primary source.

Keywords: resonance, oscillatory circuit, pulse source, quadratic method, frequency of free oscillations.

Импульсные источники электропитания являются неотъемлемой частью большинства современных электронных устройств, включая системы электропитания нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Современные устройства электропитания микропроцессорных систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи практически полностью импульсного исполнения.

От эффективности источников электропитания во многом зависит экономичность питаемых устройств. Исследования показали, что несмотря на то, что коэффициент полезного действия ряда современных импульсных источников относительно высок, имеется большой запас по повышению его значения. Во время работы импульсных источников электропитания переменный или постоянный ток первичного источника преобразуется в импульсный высокочастотный ток с последующим его преобразованием в требуемый уровень напряжения на нагрузке. Накопление энергии и последующая ее передача на нагрузку происходит в реактивных элементах в течение одного периода работы электронных ключей. В этом и состоит ограничение эффективности современных импульсных источников.

В работах [1 – 6] была предложена концепция создания высокоэффективных импульсных источников электропитания на основе закона квадратичного накопления электрической энергии, заключающегося в квадратичном увеличении энергии магнитного и электрического поля реактивных элементов в течение нескольких тактов (периодов) синхронного взаимодействия с первичным источником, затраченная энергия которого есть линейная функция времени.

В данной работе приведено доказательство возможности реализации высокоэффективных импульсных источников электропитания в режиме биения частоты, имеющем ряд технических преимуществ по сравнению с ранее рассмотренными схемами.

Проведенные исследования показали, что действие закона квадратичного накопления энергии наблюдается и в режиме биений частоты. Известно, что при включении в последовательную RLC-цепь источника гармонического напряжения, частота которого близка к резонансной, но не равна ей, в цепи наблюдаются биения, заключающиеся в периодическом увеличении амплитуды тока или напряжения до значения, существенно превышающего амплитуду вынужденной составляющей [7].

Проанализируем переходные процессы, возникающие при подключении последовательной RLC-цепи к источнику гармонического напряжения $u(t) = E_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi)$, мгновенное значение ЭДС которого при $t = 0$ равно нулю ($\psi = -\pi / 2$).

Данный режим подробно рассмотрен во многих работах, в том числе и в источниках [7, 8]. Вынужденная и свободная составляющие тока в этом режиме описываются известными выражениями:

$$i_{\text{вын}}(t) = I_{m \text{ вын}} \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi - \varphi) = I_{m \text{ вын}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi); \quad (1)$$

$$i_{\text{св}}(t) = A_1 \cdot e^{-(\delta - j\omega_{\text{св}})t} + A_2 \cdot e^{-(\delta + j\omega_{\text{св}})t}, \quad (2)$$

где амплитуда вынужденной составляющей тока

$$I_{\text{м вын}} = E_m / \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}; \quad (3)$$

постоянные интегрирования:

$$A_1 = \frac{(\delta + j\omega_{\text{св}}) \cdot \sin \varphi - \omega \cdot \cos \varphi}{2j\omega_{\text{св}}} \cdot I_{\text{м вын}}; \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{\omega \cdot \cos \varphi - (\delta - j\omega_{\text{св}}) \cdot \sin \varphi}{2j\omega_{\text{св}}} \cdot I_{\text{м вын}}; \quad (5)$$

аргумент комплексного входного сопротивления цепи

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right). \quad (6)$$

С учетом соотношений (3) – (5) выражение (2) для свободной составляющей тока принимает вид:

$$\begin{aligned} i_{\text{св}}(t) &= \left\{ \frac{e^{j\omega_{\text{св}}t} + e^{-j\omega_{\text{св}}t}}{2} \cdot \sin \varphi + \left[\frac{\delta \cdot \sin \varphi}{\omega_{\text{св}}} - \frac{\omega \cdot \cos \varphi}{\omega_{\text{св}}} \right] \cdot \frac{e^{j\omega_{\text{св}}t} - e^{-j\omega_{\text{св}}t}}{2j} \right\} \cdot I_{\text{м вын}} \cdot e^{-\delta t} = \\ &= \left\{ \sin \varphi \cdot \cos \omega_{\text{св}} t + \left[\frac{\delta \cdot \sin \varphi}{\omega_{\text{св}}} - \frac{\omega \cdot \cos \varphi}{\omega_{\text{св}}} \right] \cdot \sin \omega_{\text{св}} t \right\} \cdot I_{\text{м вын}} \cdot e^{-\delta t}. \end{aligned} \quad (7)$$

При частоте внешнего воздействия, равной (очень близкой) частоте свободных колебаний $\omega_{\text{св}}$, и высокой добротности колебательного контура, при которой $\omega_{\text{св}}$ практически совпадает с резонансной частотой цепи ω_0 , выражение (7) существенно упрощается [7]:

$$i_{\text{св}}(t) = (\sin \varphi \cdot \cos \omega_0 t - \cos \varphi \cdot \sin \omega_0 t) \cdot I_{\text{м вын}} \cdot e^{-\delta t} = -I_{\text{м вын}} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t - \varphi). \quad (8)$$

Ток цепи после коммутации равен сумме свободной и вынужденной составляющих:

$$i(t) = I_{\text{м вын}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) - I_{\text{м вын}} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t - \varphi). \quad (9)$$

Согласно выражению (9) свободная составляющая тока является затухающей гармонической функцией времени. В начальный момент времени амплитуда свободной составляющей тока равна амплитуде вынужденной составляющей, а затем уменьшается по экспоненциальному закону. Через промежуток времени, равный $(4 \div 5) \cdot \tau = (4 \div 5) \cdot 1/\delta$, после коммутации амплитуда свободной составляющей становится пренебрежимо малой и переходной процесс можно считать практически закончившимся (см. рисунок 1). Амплитуда тока цепи вследствие уменьшения свободной составляющей плавно увеличивается, стремясь в пределе к установившемуся значению $I_{\text{м вын}}$, не превышая его.

Значение энергии, потребленной первичным источником за время t , принято определять по выражению:

$$W_3 = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt. \quad (10)$$

Однако выражение (10), по мнению авторов и по результатам экспериментальных проверок, является некорректным. Значение энергии, затраченной источником за время t , должно

определяться мгновенным значением напряжения источника и только вынужденной составляющей тока:

$$W_3 = \int_0^t u(t) \cdot i_{\text{вын}}(t) \cdot dt. \quad (11)$$

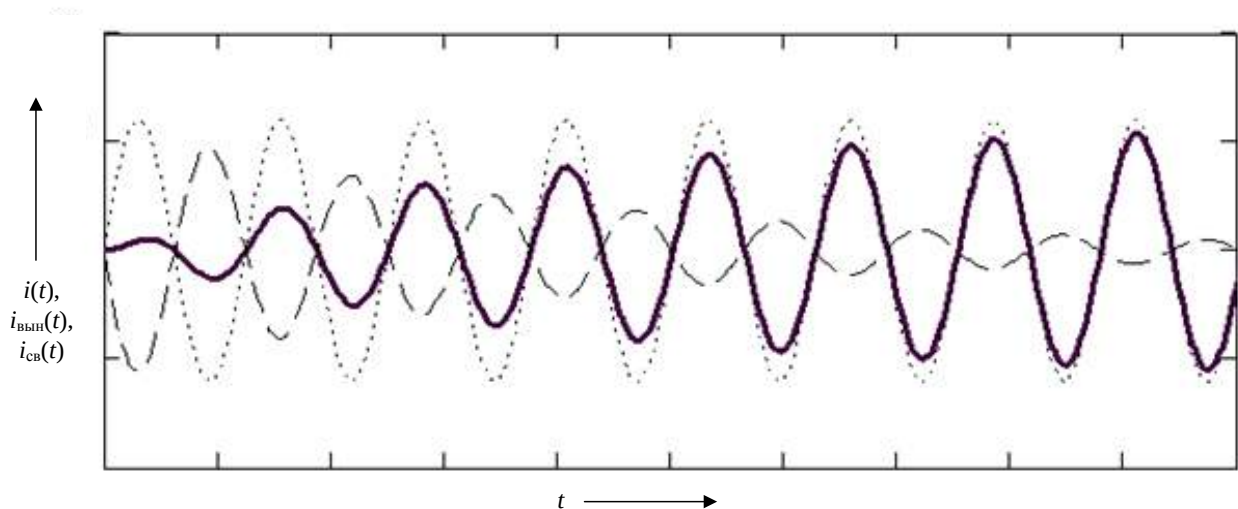


Рисунок 1 – Зависимости составляющих тока последовательной RLC-цепи от времени при включении источника гармонического напряжения частотой, равной частоте свободных колебаний (———— — сумма свободной и вынужденной составляющих тока; — вынужденная составляющая тока; — — — — свободная составляющая тока)

Учет в выражении (11) только вынужденной составляющей тока, а не суммарного значения свободной и вынужденной составляющих закономерен в связи с самим определением свободной составляющей тока. *Характер свободных процессов не зависит от вида внешнего воздействия на цепь, а определяется только параметрами пассивных элементов, а также топологией цепи после коммутации. Вынужденный же режим работы цепи задается действующими в цепи независимыми источниками энергии [7].*

Энергия, запасенная в индуктивности в момент времени t , определяется суммарным значением свободной и вынужденной составляющих тока цепи:

$$W_L = \frac{L \cdot i^2(t)}{2}. \quad (12)$$

Поскольку суммарное значение свободной и вынужденной составляющих тока согласно выражению (9) в любой момент времени меньше вынужденной составляющей тока, то запасенное значение энергии в индуктивности всегда меньше потребленной первичным источником.

Интерес представляет режим включения в последовательную RLC-цепь источника гармонического напряжения, частота которого близка к резонансной, но не равна ей. В этом режиме наблюдаются биения, заключающиеся в периодическом увеличении амплитуды тока или напряжения до значения, существенно превышающего амплитуду вынужденной составляющей (рисунок 2).

Возникновение биений в рассматриваемой режиме объясняется тем, что вследствие несовпадения частот внешнего воздействия и свободных колебаний фазовые соотношения между свободной и вынужденной составляющими тока непрерывно изменяются.

Произведем оценку значений энергии, затраченной от источника и запасенной в индуктивности за период времени нарастания суммарного тока от нуля до максимального значения при первом биении.

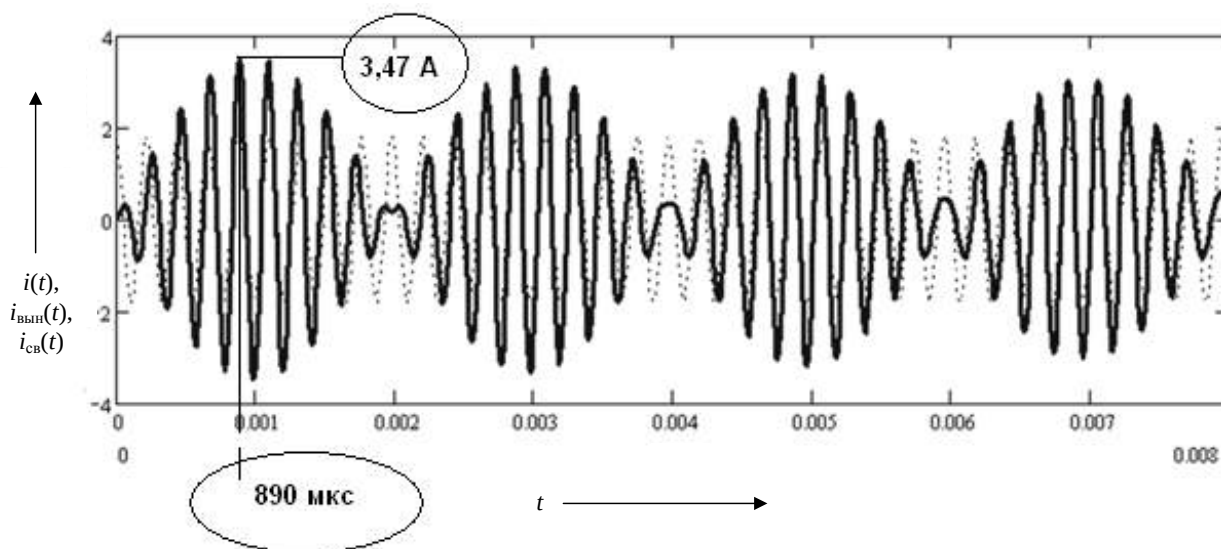


Рисунок 2 – Зависимости составляющих тока последовательной RLC-цепи от времени при включении источника гармонического напряжения частотой, близкой частоте свободных колебаний (———— – сумма свободной и вынужденной составляющих тока; – вынужденная составляющая тока)

Примем параметры RLC-цепи: $L=1\text{ мГн}$, $C=1\text{ мкФ}$, $R=0,1\text{ Ом}$, $E_m=12\text{ В}$. Частота свободных колебаний $\omega_{\text{св}}$ составит $3,162 \cdot 10^4\text{ рад/с}$. Примем частоту внешнего воздействия $\omega=0,9 \cdot \omega_{\text{св}}=2,846 \cdot 10^4\text{ рад/с}$. Осциллограмма суммарного тока свободной и вынужденной составляющих для анализируемой схемы представлена на рисунке 2. Значение энергии, потребленной первичным источником за время 890 мкс, согласно выражению (11):

$$W_3 = \int_0^{0,00089} u(t) \cdot i_{\text{вын}}(t) \cdot dt = 1,572 \cdot 10^{-4}\text{ Дж}.$$

Запасенная энергия в индуктивности к моменту времени $t=890\text{ мкс}$ согласно выражению (12):

$$W_L = \frac{L \cdot i^2(t)}{2} = \frac{1 \cdot 10^{-3}\text{ Гн} \cdot (3,47\text{ А})^2}{2} = 6,015 \cdot 10^{-3}\text{ Дж}.$$

Анализ полученных результатов показывает, что за счет синхронного сложения свободной составляющей тока с вынужденной составляющей в определенные моменты времени в цепи наблюдается квадратичное накопление энергии на реактивных элементах контура. Данное явление может быть с успехом применено для реализации квазирезонансных источников электропитания, в которых частота внешнего воздействия близка, но не равна частоте свободных колебаний контура.

Положительной стороной использования режима биений при построении квазирезонансных источников является не только повышение их эффективности, но и возможность увеличения удельной выходной мощности устройств до двух – трех раз по сравнению с традиционными схемами за счет действия квадратичного тока или напряжения на реактивных элементах колебательного контура. Низкая частота съема электрической энергии, равная частоте биений, способствует упрощению схемы квазирезонансных источников в целом из-за

отсутствия необходимости преобразования высокочастотного сигнала в сигнал промышленной частоты.

Частота биений определяется абсолютной разностью угловых частот свободной и вынужденной составляющей [7]:

$$\omega_6 = \frac{|\omega - \omega_0|}{2}. \quad (13)$$

Выбор оптимальной частоты биений является многокритериальной задачей. Решение данной задачи в первом приближении можно осуществить по максимальному значению запасенной на индуктивности энергии, определяемой суммарным значением тока вынужденной и свободной составляющих. Если пренебречь затуханием свободной составляющей тока ($\delta = 0$), то по выражению (9) получаем [7]:

$$i(t) = 2 \cdot I_{m \text{ вын}} \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega + \omega_0}{2} \cdot t - \varphi\right) = \frac{2 \cdot E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right) \times \\ \times \cos\left(\frac{\omega + \omega_0}{2} \cdot t - \arctg\left(\frac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right)\right). \quad (14)$$

Исследование функции (14) на экстремум ввиду ее сложной зависимости от частоты первичного источника целесообразно проводить в два этапа. Амплитудное значение функции (14) определяется выражением:

$$I_m(t) = 2 \cdot I_{m \text{ вын}} \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right) = \frac{2 \cdot E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right). \quad (15)$$

Производная функции (15) по частоте имеет вид:

$$\frac{dI_m}{d\omega} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \cdot \left[\cos\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right) \cdot t - \frac{2}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right) \times \right. \\ \left. \times \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \cdot \left(L + \frac{1}{\omega^2 C}\right) \right]. \quad (16)$$

Функция (16) определена при множестве значений времени. Максимальное значение тока $I_m(t)$ согласно выражению (15) функция принимает в момент времени

$$t_m = \frac{\pi}{|\omega - \omega_0|}. \quad (17)$$

График функции (16) для ранее принятых параметров RLC-контура, соответствующий моменту времени t_m , представлен на рисунке 3.

Анализ графика показывает, что уравнение производной амплитуды суммарного тока контура не имеет корней, кривая асимптотически стремится к нулю, но не достигает этого значения. Однако из данного графика возможно определение границ частот, при которых биения практически не наблюдаются и режим работы контура близок к режиму резонанса. Границы этих частот ($W_{\min} - W_{\max}$) соответствуют максимальным значениям функции, которые расположены симметрично относительно частоты свободных колебаний контура. Начиная с максимальных значений, кривая представленная на рисунке 3, экспоненциально убывает. Совершенно очевидно, что выбор частоты внешнего воздействия целесообразно осуществлять вне пределов границ ($W_{\min} - W_{\max}$), ограниченных амплитудными значениями

кривой. Однако конкретное значение частоты внешнего воздействия целесообразно определять путем исследования функции (14) на экстремум.

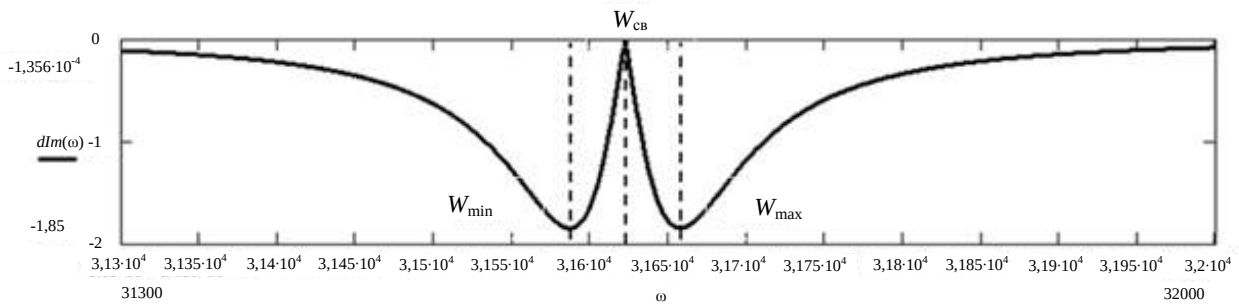


Рисунок 3 – График производной функции амплитуды тока контура

График производной функции (14) для ранее принятых параметров RLC-контура, соответствующий моменту времени t_m , представлен на рисунке 4.

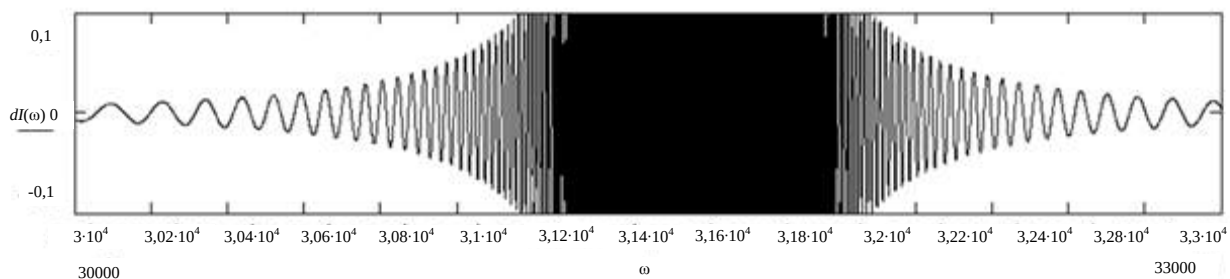


Рисунок 4 – График производной функции суммарного тока контура

Анализ полученного графика показывает, что исследуемая функция принимает нулевые значения с переменным периодом, величина которого возрастает по мере удаления от значения частоты свободных колебаний контура. Это означает, что функция (14) тока контура имеет множество экстремумов. Проведенные исследования показали, что оптимальными частотами по соотношению затраченной от источника и накопленной на реактивных элементах энергии являются частоты, лежащие в областях с наибольшими периодами колебаний функции, представленной на рисунке 4. Так, для анализируемого контура оптимальные частоты лежат в области от $2,8 \cdot 10^4$ до $3,04 \cdot 10^4$ рад/с в меньшую сторону от частоты свободных колебаний и аналогично в большую сторону. Выбор конкретной частоты зависит от требуемой частоты биений, на которой собственно и будет осуществляться съем накопленной энергии. В случае необходимости получения промышленной частоты выходного сигнала частота биений должна соответствовать 50 Гц.

Следует сказать о сложностях реализации квазирезонансных источников электропитания, основанных на режиме биений. В реальных контурах коэффициент затухания имеет малое, но конечное значение. Свободная составляющая тока в таких контурах экспоненциально уменьшается во времени, а биения носят затухающий характер. Решение данной проблемы возможно за счет использования в составе контуров параметрических элементов, индуктивность или емкость которых изменяется в незначительных пределах в зависимости от значения тока или напряжения. В этом случае биения будут носить незатухающий характер.

Квазирезонансные источники электропитания, основанные на режиме биений, несмотря на отсутствие теоретического обоснования постепенно находят практическое применение. В работах [9, 10] представлено описание работы импульсного источника электропитания, схема которого представлена на рисунке 5.

Режим биений в данной схеме реализован путем достижения полуволнового резонанса на воздушном высокочастотном трансформаторе, вторичные обмотки L2, L3 которого реализованы в виде однопроводниковой длинной линии со средней точкой. Преимущества данного источника электропитания и область его применения подробно описаны в работе [5].

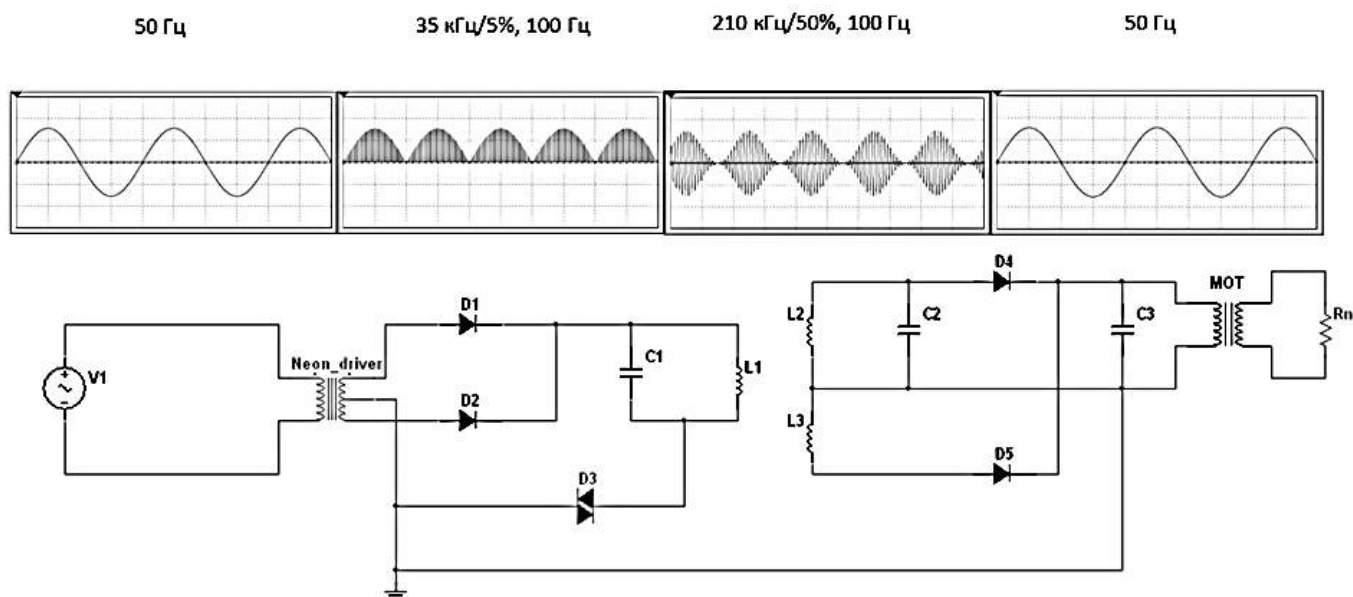


Рисунок 5 – Упрощенная схема импульсного источника электропитания на основе режима биений частоты

Подводя итоги, можно отметить, что режим биений может быть с успехом использован при построении многообразных схем высокоэффективных импульсных источников электропитания, используемых, в том числе, и в системах электропитания нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Использование данного режима перед классическими подходами построения импульсных источников дает большие преимущества по соотношению затраченной от первичного источника и накопленной на реактивных элементах энергии и позволяет относительно просто без использования дополнительных инверторных схем получать на выходе переменное напряжение требуемой частоты.

Список литературы

1. Менакер, К. В. Создание ударного контура возбуждения импульсного резонансного преобразователя мощности [Текст] / К. В. Менакер, А. С. Цветаева // Электротехника / Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности. – М. – 2015. – № 5. – С. 36 – 40.
2. Менакер, К. В. Создание высокоэффективных импульсных источников электропитания на основе квадратичного способа накопления энергии [Текст] / К. В. Менакер, М. В. Востриков, А. С. Цветаева // Силовая электроника / Медиа КиТ. – М. – 2016. – №1 (58). – С. 46 – 50.
3. Менакер, К. В. Создание высокоэффективных импульсных источников электропитания на основе схем ФАПЧ [Текст] / К. В. Менакер, М. В. Востриков // Силовая электроника / Медиа КиТ. – М. – 2016. – № 6 (63). – С. 44 – 47.
4. Менакер, К. В. Импульсный преобразователь мощности [Текст] / К. В. Менакер, А. С. Цветаева // Автоматика, связь, информатика / ОАО «Российские железные дороги». – М. – 2012. – № 6. – С. 21 – 23.

5. К вопросу создания преобразователя мощности как резервного источника питания [Текст] / К. В. Менакер, А. С. Цветаева и др. // Электробезопасность / Южно-Уральский гос. ун-т. – М. – 2012. – № 1. – С. 50 – 53.
6. Семенов, Н. Н. Применение импульсного преобразователя мощности для резервирования питания, различных устройств и цепей тяговых подстанций [Текст] / Н. Н. Семенов, К. В. Менакер // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного транспорта. – Новосибирск. – 2012. – № 1. – С. 417 – 419.
7. Попов, В. П. Основы теории цепей: Учебник для вузов [Текст] / В. П. Попов. – М.: Высшая школа, 1985. – С. 291 – 294.
8. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Учебник [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – С. 244, 245.
9. Donald, L. Smith. Resonance energy methods [Text] / L. S. Donald, – TransWorld Energy, CEO, 2002. – P. 33 – 37.
10. Donald, L. Smith. An answer to America,s energy deficit [Text] / L. S. Donald, – TransWorld Energy, CEO, 1997. – P. 47 – 49.

References

1. Menaker K. V., Tsvetaeva A. S. Creation of a shock contour of excitement of the pulse resonant converter of power [Sozдание udarnogo kontura vozbuzhdeniya impul'snogo rezonansnogo preobrazovatelya moshchnosti]. *Electrician – The journal of All-Russian Research Institute of the cable industry*, 2015, no. 5, pp. 36 – 40.
2. Menaker, K. V., Vostrikov M. V., Tsvetaeva A. S. Creation of highly effective pulse sources of power supply on the basis of a square way of accumulation of energy [Sozдание vysokoeffektivnyh impul'snyh istochnikov elektropitaniya na osnove kvadratichnogo sposoba nakopleniya energii]. *Power electronics – The journal Ltd company «Media KiT»*, 2016, no. 1 (58), pp. 46 – 50.
3. Menaker, K. V., Vostrikov M. V. Creation of highly effective pulse sources of power supply on the basis of schemes FAPCH [Sozдание vysokoeffektivnyh impul'snyh istochnikov elektropitaniya na osnove skhem FAPCH]. *Power electronics – The journal Ltd company «Media KiT»*, 2016, no. 6 (63), pp. 44 – 47.
4. Menaker, K. V., Tsvetaeva A. S. The pulse converter of the power [Impul'snyj preobrazovatel' moshchnosti]. *Automatic equipment, communication, informatics – The journal JSCo «RZD»*, 2012, no. 6, pp. 21 – 23.
5. Menaker K. V., Tsvetaeva A. S., Litvincev A. G., Semenov N. N. To a question of creation of the converter of power as reserve electrical safety power supply [K voprosu sozdaniya preobrazovatelya moshchnosti kak rezervnogo istochnika pitaniya]. *Electrical safety – The journal of Southern Ural State University*, 2012, no. 1, pp. 50 – 53.
6. Semyonov, N. N., Menaker K. V. Use of the pulse converter of power for reservation of food, various devices and chains of traction substations [Primenenie impul'snogo preobrazovatelya moshchnosti dlya rezervirovaniya pitaniya, razlichnyh ustrojstv i cepej tyagovyh podstancij]. *Scientific problems of transport of Siberia and the Far East – The journal of Siberian State. University of the water transport*, 2012, no. 1, pp. 417 – 419.
7. Popov V. P. *Osnovy teorii cepej* (Bases of the theory of chains). Moscow: Vyssh. shk., 1985, 294 p.
8. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* (Theoretical bases of electrical equipment). Moscow: Vyssh. shk., 1996. 245 p.
9. Donald L. Smith. Resonance energy methods, TransWorld Energy, 2002, pp. 33 – 37.
10. Donald L. Smith. An answer to America,s energy deficit, TransWorld Energy, 1997, pp. 47 – 49.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Менакер Константин Владимирович

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ).

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение», ЗабИЖТ.

Тел.: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

Яковлев Дмитрий Александрович

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ).

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение», ЗабИЖТ.

Тел.: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

Востриков Максим Викторович

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ).

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Электроснабжение», ЗабИЖТ.

Тел.: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Менакер, К. В. Повышение эффективности работы систем электропитания нетяговых потребителей [Текст] / К. В. Менакер, Д. А. Яковлев, М. В. Востриков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – 2 (34). – С. 85 – 94

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Menaker Konstantin Vladimirovich

Transbaikal Institute of Railway Transport (Zabizht). 11, Magistralnaya st., Chita, 672040, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Supply, Zabizht.

Phone: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

Yakovlev Dmitry Alexandrovich

Transbaikal Institute of Railway Transport (Zabizht). 11, Magistralnaya st., Chita, 672040, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Supply, Zabizht.

Phone: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

Vostrikov Maxim Viktorovich

Transbaikal Institute of Railway Transport (Zabizht). 11, Magistralnaya st., Chita, 672040, the Russian Federation.

Senior lecturer of the Department of Electric Power Supply, Zabizht.

Phone: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Menaker K. V., Yakovlev D. A., Vostrikov M. Increase of efficiency of operation of electric power supply systems of nontyagovy consumers. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 2, no 34, pp. 85 – 94 (In Russian).

УДК 621.331

УДК 629.4

М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, А. Ж. Еркебаев

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

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ И УЧАСТКОВОЙ СКОРОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ

Аннотация. В статье изложены методологические подходы к оценке эффективности мероприятий, направленных на повышение эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации. Приведен пример расчета эффективности использования энергии рекуперации на двухпутном участке постоянного тока. Выполнен анализ влияния изменения таких параметров участка, как техническая и участковая скорость движения грузовых поездов, на эффективность использования энергии рекуперации. В статье приведены результаты оценки составляющих энергии рекуперации, формирующих экономическую эффективность рекуперации, и описаны подходы к прогнозированию изменения этой эффективности в зависимости от изменения влияющих факторов.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, система тягового электроснабжения, энергия рекуперации, эксплуатационные показатели, техническая и участковая скорость движения поездов

Mikhail M. Nikiforov, Alexander S. Vilgelm, A. J. Yerkebayev

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

INFLUENCE OF TECHNICAL AND SITE SPEED ON EFFICIENCY OF ENERGY RECOVERY USE

Abstract. The article outlines methodological approaches to assessing the effectiveness of measures aimed at improving the efficiency of recuperative braking application and the use of energy recovery. An example of calculating the energy efficiency of recuperation on a double-track section of direct current is given. The analysis of the influence of changes in such parameters of the section as technical and district speed of freight trains on the efficiency of energy recovery. The article presents the results of estimating the energy recovery components that form the economic efficiency of recuperation, and describes the approaches to predicting the change in this efficiency, depending on the change in the influencing factors.

Keywords: energy efficiency, traction power supply system, energy recovery, operational indicators, technical and station speed of trains

Одним из ключевых мероприятий программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «РЖД» является тема «Повышение эффективности применения РТ и использования ЭР». При этом реализуется и отдельное мероприятие – «Восстановление и модернизация систем рекуперативного торможения локомотивов и МВПС», также направленное на повышение эффективности применения рекуперативного торможения (РТ) электроподвижным составом (ЭПС). Первое мероприятие подразумевает главным образом повышение эффективности использования уже выработанной ЭПС ЭР в системе тягового электроснабжения (СТЭ), а второе – увеличение объема рекуперированной энергии.

Методические подходы к определению эффективности первого мероприятия подробно рассмотрены в трудах [1 – 5], из которых следует, что для выполнения оценки энергетической и экономической эффективностей рекуперации необходимо проанализировать составляющие, на которые распределяется выработанная ЭПС энергия рекуперации (ЭР) с выделением ее потерь в элементах СТЭ и доли, используемой эффективно. К эффективным составляющим ЭР относятся:

- потребление на собственные нужды рекуперирующего ЭПС;
- на тягу поездов другим ЭПС (находящимся на участке в режиме тяги);
- на собственные нужды тяговых подстанций, на нужды железнодорожных и сторонних потребителей, питающихся от электросетей районов электроснабжения и линий продольного электроснабжения;
- возврат ЭР в систему внешнего электроснабжения.

К составляющим потерь ЭР относятся потери:

- в контактной сети (КС) при передаче ЭР от рекуперирующего ЭПС к другому ЭПС, находящемуся в режиме тяги, и к тяговым подстанциям;
- выпрямительно-инверторных преобразователях (ВИПах) и тяговых трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока при возврате ЭР из КС;
- понижающих трансформаторах тяговых подстанций постоянного и переменного тока при передаче ЭР через них в систему внешнего электроснабжения.

Описанная в источнике [1] методика оценки эффективности использования ЭР предполагает распределение ее объемов по составляющим полезного потребления и потерь в устройствах СТЭ с использованием эмпирических коэффициентов, разработанных на основании специально созданной математической модели, представленной на рисунке 1.

Значения всех основных влияющих на эффективность использования ЭР факторов принимаются к расчету в виде исходных данных. На их основании рассчитываются значения эмпирических коэффициентов.

Сначала выделяется общая величина эффективного использования ЭР, выработанной ЭПС на расчетном участке за расчетный период, за вычетом потерь ЭР в тяговой сети. Для

определения этой величины используется коэффициент эффективности использования ЭР за вычетом потерь в тяговой сети $k_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}}$.

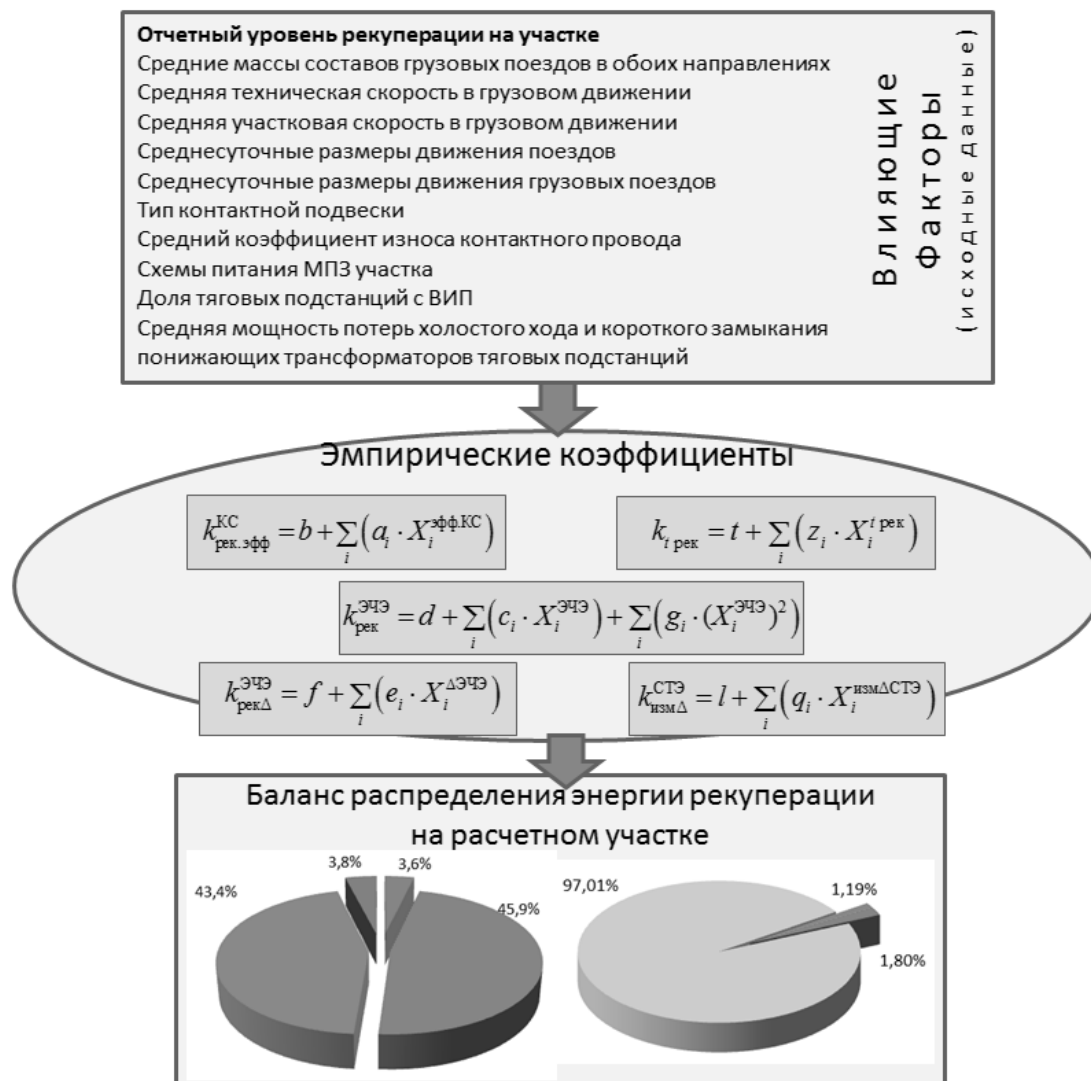


Рисунок 1 – Упрощенный алгоритм методики оценки эффективности использования ЭР

Далее через коэффициент возврата ЭР $k_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}}$ определяется объем ЭР, возвращенный на тяговые подстанции расчетного участка за расчетный период.

Для участков постоянного тока с ВИПами на тяговых подстанциях и с наличием возврата энергии по счетчикам на вводах ВИПов необходимо определить за расчетный период значения потерь ЭР в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций с использованием соответствующего коэффициента потерь энергии $k_{\text{пот}}^{\text{ЭЧЭ}}$ и далее уже рассчитать долю ЭР, потребленной на тягу поездов на расчетном участке за расчетный период электровозами в режиме тяги.

Кроме того, определяется разность потерь энергии в СТЭ для случаев с применением и без применения РТ с использованием соответствующего коэффициента разности потерь $k_{\Delta\text{пот}}^{\text{СТЭ}}$.

Коэффициент времени нахождения ЭПС в режиме рекуперации $k_{\text{т.рек}}$ используется для определения величины ЭР, потребленной на собственные нужды рекуперирующего ЭПС.

Вид уравнений для расчета эмпирических коэффициентов и значения вспомогательных коэффициентов $a_i, b, t, z_i, d, c_i, g_i, f, e_i, l, q_i$, используемых в них, определены отдельно для однопутных и многопутных участков постоянного тока и однопутных и многопутных участков переменного тока по результатам корреляционного анализа влияния факторов на значения этих эмпирических коэффициентов на основе имитационного моделирования работы электрифицированных участков [6].

Баланс ЭР, полученный по результатам расчета, может быть представлен в виде круговой диаграммы. Предполагается, что пользователь описанной выше методики будет иметь возможность не только оценить текущий уровень эффективности использования ЭР, но и путем изменения расчетных условий (значений исходных данных) прогнозировать изменение уровня эффективности рекуперации для соответствующих изменений, а также подбирать оптимальное сочетание параметров СТЭ и эксплуатационных показателей участка для получения наименьших потерь ЭР и наибольшей эффективности рекуперации. Результаты апробации расчетной модели, описанной выше, представлены в статьях [7, 8].

Известно, что на потребление электроэнергии на тягу поездов и возможность применения РТ существенное влияние оказывает график движения поездов [9]. Рассмотрим пример расчета текущего уровня эффективности использования ЭР на условном двухпутном участке постоянного тока и проанализируем изменение этого уровня в зависимости от изменения технической и участковой скорости движения грузовых поездов на участке.

Необходимые для расчета исходные данные, характеризующие показатели работы участка и его параметры, представлены в таблице 1. Данный участок характеризуется сложным профилем пути и значительным объемом удельной рекуперации, который составил за расчетный период, равный одному месяцу, $4,56 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 10^4 \text{ ткм}$ брутто. Средняя масса грузовых поездов на участке в нечетном направлении – 5100 т, средняя масса грузовых поездов на участке в четном направлении – 1500 т. Средняя техническая скорость в грузовом движении на участке – 44,0 км/ч, участковая – 34,0 км/ч.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета эффективности использования ЭР

Наименование показателя		Значение
Руководящий уклон в нечетном направлении участка, ‰		12,0
Руководящий уклон в четном направлении участка, ‰		10,0
Общий объем перевозочной работы по всем сериям ЭПС, 10^4 ткм брутто		9865
Объем рекуперации по всем сериям ЭПС, кВт·ч		45000
Средняя масса грузовых поездов на участке в нечетном направлении, т		5100
Средняя масса грузовых поездов на участке в четном направлении, т		1500
Средняя техническая скорость в грузовом движении на участке, км/ч		44,0
Средняя участковая скорость в грузовом движении на участке, км/ч		34,0
Среднее количество пар поездов в сутки по всем видам движения на участке, пар		45
Среднее количество пар поездов в сутки в грузовом движении на участке, пар		33
Количество тяговых подстанций на участке		9
Количество тяговых подстанций с ВИПами на участке		2
Средневзвешенное относительное сопротивление контактной подвески участка, о.е.		1,56
Средневзвешенный коэффициент резерва работоспособности контактного провода участка, о.е.		0,85
Средневзвешенное относительное сопротивление КС расчетного участка в зависимости от схем питания межподстанционных зон, о.е.		1,14
Средняя мощность потерь холостого хода преобразовательных трансформаторов участка, кВт		16
Средняя мощность потерь короткого замыкания преобразовательных трансформаторов участка, кВт		55
Объем возврата энергии по счетчикам вводов ВИПов, кВт·ч		10000
Линейный пробег электровозов, рекуперирующих на расчетном участке, лок.-км	ВЛ10	2900
	1,5ВЛ11	2500
	2ЭС6	16000
Средняя техническая скорость электровозов, рекуперирующих на расчетном участке, км/ч	ВЛ10	44,0
	1,5ВЛ11	44,0
	2ЭС6	45,0

В абсолютном выражении объем рекуперации, эффективность использования которой необходимо выполнить, составил 45000 кВт·ч. Из девяти тяговых подстанций участка две оснащены ВИПами. Суммарный объем возврата по ним составил 10000 кВт·ч. Здесь необходимо сделать важное пояснение. В данном случае объем возврата – это суммарный возврат энергии на тяговые подстанции с ВИПами за расчетный период. Этот объем формируется из энергии, рекуперированной всем ЭПС (включая электропоезда), работающим на участке в расчетном периоде. Величина же рекуперации 45000 кВт·ч – это отчетная величина по одному депо только по грузовым электровозам.

Порядок расчета значений средневзвешенного относительного сопротивления контактной подвески участка, средневзвешенного коэффициента резерва работоспособности контактного провода участка и средневзвешенного относительного сопротивления КС расчетного участка в зависимости от схем питания межподстанционных зон описан в статье [3].

В первую очередь определяется объем ЭР, переданной ЭПС в КС, за вычетом ее потерь в КС, кВт·ч:

$$B_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}} = B_{\text{рек}} \cdot k_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}}, \quad (1)$$

где $B_{\text{рек}}$ – отчетный объем ЭР, эффективность использования которого необходимо оценить (в данном случае 45000 кВт·ч);

$k_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}}$ – эмпирический коэффициент эффективности использования ЭР, переданной ЭПС в КС, за вычетом ее потерь в КС.

В данных эксплуатационных условиях $k_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}}$ составил 0,96, а величина $B_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}}$ – 43217 кВт·ч. Объем потерь ЭР в КС, таким образом, составил 1783 кВт·ч.

Объем ЭР, возвращенной на тяговые подстанции расчетного участка, определяется по формуле, кВт·ч:

$$B_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}} = B_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}} \cdot k_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}}$ – эмпирический коэффициент возврата ЭР на тяговые подстанции.

При значении $k_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}}$, равном 0,066, величина $B_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}}$ составила 2864 кВт·ч.

Объем потерь ЭР в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций определяется по формуле, кВт·ч:

$$\Delta B_{\text{рек}}^{\text{ВИП}} = B_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}} \cdot k_{\text{рек}\Delta}^{\text{ЭЧЭ}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{рек}\Delta}^{\text{ЭЧЭ}}$ – эмпирический коэффициент потерь ЭР в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций.

Значение $k_{\text{рек}\Delta}^{\text{ЭЧЭ}}$ составило 0,058, величина потерь $\Delta B_{\text{рек}}^{\text{ВИП}}$ – 165 кВт·ч.

Объем ЭР, потребленной другим ЭПС на участке, рассчитывается по формуле, кВт·ч:

$$B_{\text{рек}}^{\text{ЭПС др}} = B_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}} - B_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}} - \Delta B_{\text{рек}}^{\text{ВИП}}. \quad (4)$$

Данная величина составила 40188 кВт·ч. Баланс ЭР на расчетном участке представлен на рисунке 2.

Объем ЭР, переданной ЭПС в КС и используемой эффективно, можно рассчитать по формуле, кВт·ч:

$$\mathcal{E}_{\text{рек}} = B_{\text{рек}}^{\text{ЭПС др}} + B_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}}. \quad (5)$$

Величина эффекта $\Delta B_{\text{рек}}$ в приведенном примере составит 43051 кВт·ч, или можно сказать, что 95,7 % всей рекуперированной энергии в данных эксплуатационных условиях используется эффективно.

Предложенная методика позволяет выполнить оценку величин изменения потерь энергии в СТЭ в режиме применения и неприменения РТ [9] и объема ЭР, потребленной рекуперирующим ЭПС на собственные нужды и не учтенной счетчиками рекуперации на ЭПС.

Первая величина определяется по формуле, кВт·ч:

$$\Delta B_{\text{рек}}^{\text{СТЭ}} = (B_{\text{рек}} - B_{\text{рек.эф}}^{\text{КС}} + \Delta B_{\text{рек}}^{\text{ВИП}}) \cdot k_{\text{изм.}\Delta}^{\text{СТЭ}}, \quad (6)$$

где $k_{\text{изм.}\Delta}^{\text{СТЭ}}$ – эмпирический коэффициент изменения потерь энергии в устройствах СТЭ для режимов применения и неприменения РТ.



Рисунок 2 – Диаграмма баланса ЭР на расчетном участке

В данном случае величина $\Delta B_{\text{рек}}^{\text{СТЭ}}$ составила 1929 кВт·ч в сторону сокращения потерь энергии в СТЭ.

Объем ЭР, потребленной рекуперирующим ЭПС на собственные нужды, определяется по формуле, кВт·ч:

$$B_{\text{рек}}^{\text{ЭПС с.н.}} = \sum_{i=1}^n (P_{\text{ЭПС}_i \text{ с.н.}} \cdot \frac{NL_{\text{ЭПС}_i}}{V_{\text{тех.ЭПС}_i}} \cdot k_{\text{исп.ЭПС}_i \text{ с.н.}}) \cdot k_{\text{т.рек}}, \quad (7)$$

где $k_{\text{т.рек}}$ – эмпирический коэффициент времени нахождения ЭПС в режиме РТ;

$NL_{\text{ЭПС}_i}$ – линейный пробег ЭПС, рекуперирующего на расчетном участке, i -й серии;

$V_{\text{тех.ЭПС}_i}$ – средняя техническая скорость ЭПС, рекуперирующего на расчетном участке, i -й серии;

$P_{\text{ЭПС}_i \text{ с.н.}}$ – мощность машин собственных нужд рекуперирующих ЭПС i -й серии;

$k_{\text{исп.ЭПС}_i \text{ с.н.}}$ – коэффициент использования машин собственных нужд рекуперирующих ЭПС i -й серии.

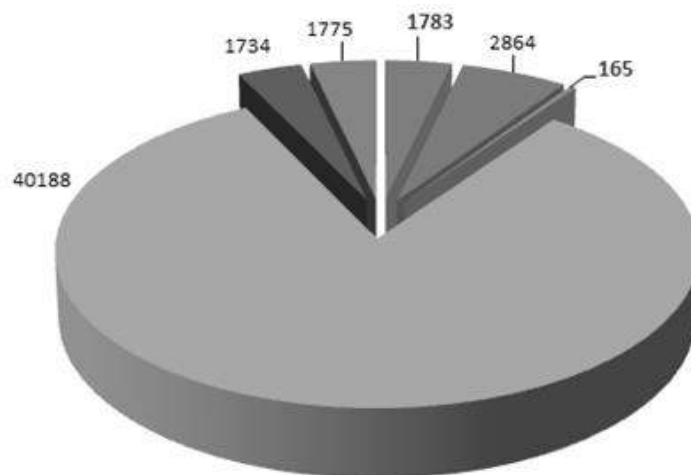
Величина $B_{\text{рек}}^{\text{ЭПС с.н.}}$ составила 1224 кВт·ч. С учетом данных величин эффективность использования ЭР может быть проиллюстрирована диаграммой (рисунок 3), а экономия элек-

троэнергии за счет применения РТ и использования ЭР будет определяться по формуле, кВт·ч:

$$\mathcal{E}_{\text{рек}}^{\text{сумм}} = B_{\text{рек}}^{\text{ЭПС др}} + B_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}} + \Delta B_{\text{рек}}^{\text{СТЭ}} + B_{\text{рек}}^{\text{ЭПС с.н.}} \quad (8)$$

Значение суммарного эффекта $\mathcal{E}_{\text{рек}}^{\text{сумм}}$ в данном случае составит 46560 кВт·ч, или 96,0 % от базового значения эффекта от использования ЭР на расчетном участке, которая составляет 48509 кВт·ч.

В дальнейшем интерес представляет анализ влияния эксплуатационных факторов на эффективность использования ЭР на участке. Так, было проанализировано влияние изменения величины технической скорости движения грузовых поездов на участке при неизменном коэффициенте участковой скорости и других параметров на величину изменения эффективности использования ЭР. Результаты расчетов сведены в таблицу 2. Выполнены расчеты для трех разных значений технической скорости: 44,0 км/ч – базовый расчет для действующих на участке условий, 46,0 и 48,0 км/ч. Участковая скорость задавалась из условия поддержания величины коэффициента участковой скорости в размере 0,77.



1783 – объем потерь энергии рекуперации в контактной сети при передаче энергии рекуперации от рекуперирующего ЭПС к потребителям;

2864 – объем энергии рекуперации, возвращенной на тяговые подстанции расчетного участка;

165 – объем потерь энергии рекуперации в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций;

40188 – объем энергии рекуперации, потребленной другим ЭПС на участке;

1734 – изменение потерь энергии в СТЭ в режиме применения и не применения рекуперативного торможения;

1775 – объем энергии рекуперации, потребленной рекуперирующим ЭПС на собственные нужды

Рисунок 3 – Диаграмма баланса суммарной ЭР на расчетном участке

Из данных таблицы 2 видно, что с увеличением технической скорости на 2 и 4 км/ч происходит увеличение потерь ЭР в КС при передаче ЭР от рекуперирующего ЭПС к потребителям соответственно на 0,23 и 0,46 % от общего объема ЭР, переданной в КС. При этом сокращается объем ЭР, переданной ЭПС в КС и используемой эффективно, с величины 95,67 % до значений 95,35 и 95,03 % или в абсолютном выражении – на величину до 288 кВт·ч. При этом величина сокращения потерь энергии в СТЭ в режимах применения и неприменения РТ с увеличением технической скорости тоже увеличится (на 0,32 и 0,64 % соответственно для $V_{\text{тех}}$ – 46 и 48 км/ч). Увеличится и объем ЭР, потребленной рекуперирующим ЭПС на собственные нужды (на 1,2 и 2,3 % соответственно для $V_{\text{тех}}$ – 46 и 48 км/ч), а это одна из наиболее эффективных статей использования ЭР, поскольку в этом случае исключаются потери от протекания токов рекуперации по элементам СТЭ.

Таблица 2 – Результаты расчетов влияния изменения технической скорости на эффективность использования ЭР

Наименование показателя	Значение показателя					
	в абсолютном выражении, кВт·ч	в процентном соотношении, %	в абсолютном выражении, кВт·ч	в процентном соотношении, %	в абсолютном выражении, кВт·ч	в процентном соотношении, %
Значение технической скорости, км/ч	44,0		46,0		48,0	
Коэффициент участковой скорости	0,77		0,77		0,77	
Объем ЭР, переданной в КС	45000	100,0	45000	100,0	45000	100,0
Базовая величина эффекта от использования ЭР	48509	100,0	49307	100,0	50108	100,0
Объем потерь ЭР в КС при передаче ЭР от рекуперирующего ЭПС к потребителям	1783	3,68	1928	3,91	2073	4,14
Объем ЭР, возвращенной на тяговые подстанции	2864	5,90	2854	5,79	2845	5,68
Объем потерь ЭР в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций	165	0,34	165	0,33	164	0,33
Объем ЭР, потребленной другим ЭПС на участке	40188	82,85	40053	81,23	39918	79,66
Изменение потерь энергии в СТЭ в режиме применения и неприменения РТ	1734	3,57	1916	3,89	2109	4,21
Объем ЭР, потребленной рекуперирующим ЭПС на собственные нужды	1775	3,66	2391	4,85	2999	5,99
Объем ЭР переданной ЭПС в КС и используемой эффективно	43051	95,67	42907	95,35	42763	95,03
Экономия электроэнергии за счет применения РТ и использования ЭР	46560	95,98	47214	95,76	47871	95,53

Таким образом, величина суммарной экономии электроэнергии за счет применения РТ и использования ЭР с увеличением технической скорости на данном двухпутном участке постоянного тока будет увеличиваться (на 1,4 % с увеличением технической скорости на 2 км/ч и на 2,8 % с увеличением технической скорости на 4 км/ч).

Более наглядно данные зависимости можно проиллюстрировать с помощью графиков, построенных для большего диапазона технических скоростей (рисунок 4).

Результаты расчета влияния коэффициента участковой скорости в грузовом движении на экономию электроэнергии за счет применения РТ и использования ЭР при неизменной технической скорости, которое достигается за счет сокращения числа остановок на участке, представлены в таблице 3. Техническая скорость была принята равной 44 км/ч, а коэффициент участковой скорости изменялся с 0,77 до 0,86 и 0,95, что соответствует участковой скорости 34, 38 и 42 км/ч.

В этом случае потери в КС при передаче ЭР от рекуперирующего ЭПС к потребителям не изменяются. Сокращается объем ЭР, потребленной на собственные нужды, на величину до 1,12 % и снижаются потери энергии в СТЭ в режимах применения и неприменения РТ на величину до 0,44 %. При этом величина суммарной экономии электроэнергии за счет применения РТ и использования ЭР с увеличением коэффициента

участковой скорости на данном участке будет незначительно снижаться (на величину до 0,03 %).

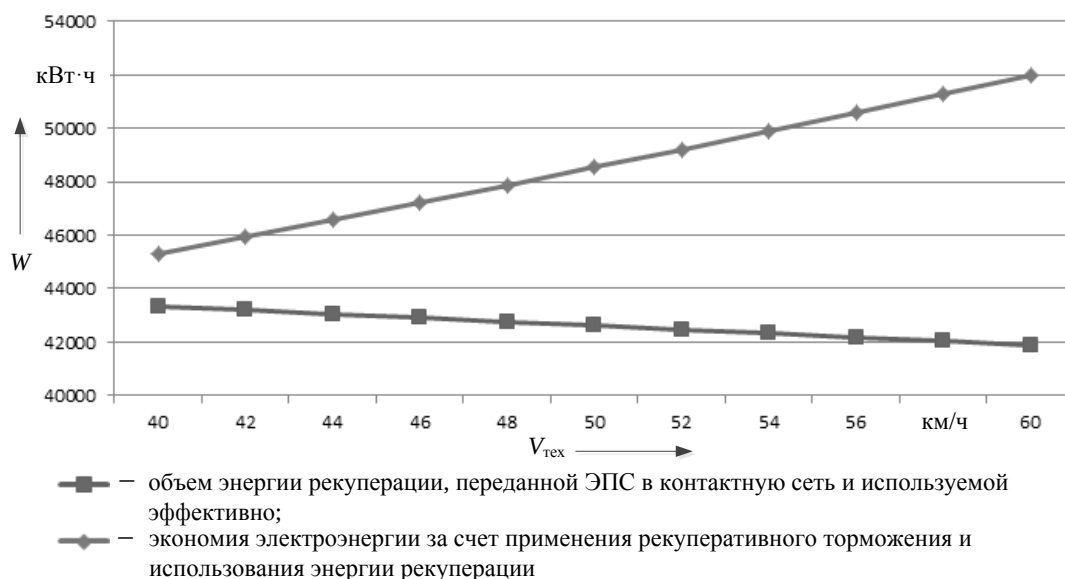


Рисунок 4 – Зависимости объемов ЭР, используемой эффективно и повышающей энергетическую эффективность тяги поездов, от технической скорости

Таблица 3 – Результаты расчетов влияния изменения коэффициента участковой скорости на эффективность использования ЭР

Наименование показателя	Значение показателя					
	в абсолютном выражении, кВт·ч	в процентном соотношении, %	в абсолютном выражении, кВт·ч	в абсолютном выражении, кВт·ч	в процентном соотношении, %	в абсолютном выражении, кВт·ч
Значение технической скорости, км/ч	44,0		44,0		44,0	
Коэффициент участковой скорости	0,77		0,86		0,95	
Объем ЭР, переданной в КС	45000	100,0	45000	100,0	45000	100,0
Базовая величина эффекта от использования ЭР	48514	100,0	48338	100,0	48153	100,0
Объем потерь ЭР в КС при передаче ЭР от рекуперирующего ЭПС к потребителям	1783	3,68	1783	3,69	1783	3,70
Объем ЭР, возвращенной на тяговые подстанции	2864	5,90	2864	5,93	2864	5,95
Объем потерь ЭР в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций	165	0,34	165	0,34	165	0,34
Объем ЭР, потребленной другим ЭПС на участке	40188	82,85	40188	83,15	40188	83,46
Изменение потерь энергии в СТЭ в режиме применения и не применения РТ	1731	3,57	1828	3,79	1929	4,01
Объем ЭР, потребленной рекуперирующим ЭПС на собственные нужды	1783	3,66	1510	3,10	1224	2,54
Объем ЭР переданной ЭПС в КС и используемой эффективно	43051	95,67	43051	95,67	43051	95,67
Экономия электроэнергии за счет применения РТ и использования ЭР	46566	95,98	46390	95,97	46204	95,95

На рисунке 5 представлены зависимости объемов ЭР, используемой эффективно и повышающей энергетическую эффективность тяги поездов, от коэффициента участковой скорости в достаточно широком диапазоне. Приведенные зависимости наглядно показывают, что для данного участка величина суммарной экономии электроэнергии за счет применения РТ и использования ЭР с увеличением коэффициента участковой скорости снижается.

Данные примеры приведены для того, чтобы представить потенциальные возможности предлагаемого метода оценки эффективности использования ЭР. Очевидно, что изменение таких показателей, как участковая и техническая скорость движения поездов, повлекут за собой изменения и других показателей, влияние которых также следует учитывать. Более того, изменится и сама величина объема энергии, рекуперированной ЭПС. Очевидно и то, что помимо энергетического эффекта от использования ЭР при улучшении таких важных эксплуатационных показателей будут появляться и другие составляющие экономического эффекта, которые также нужно оценивать и принимать во внимание при планировании графика движения поездов и внедрения мероприятий по повышению эффективности использования ЭР.

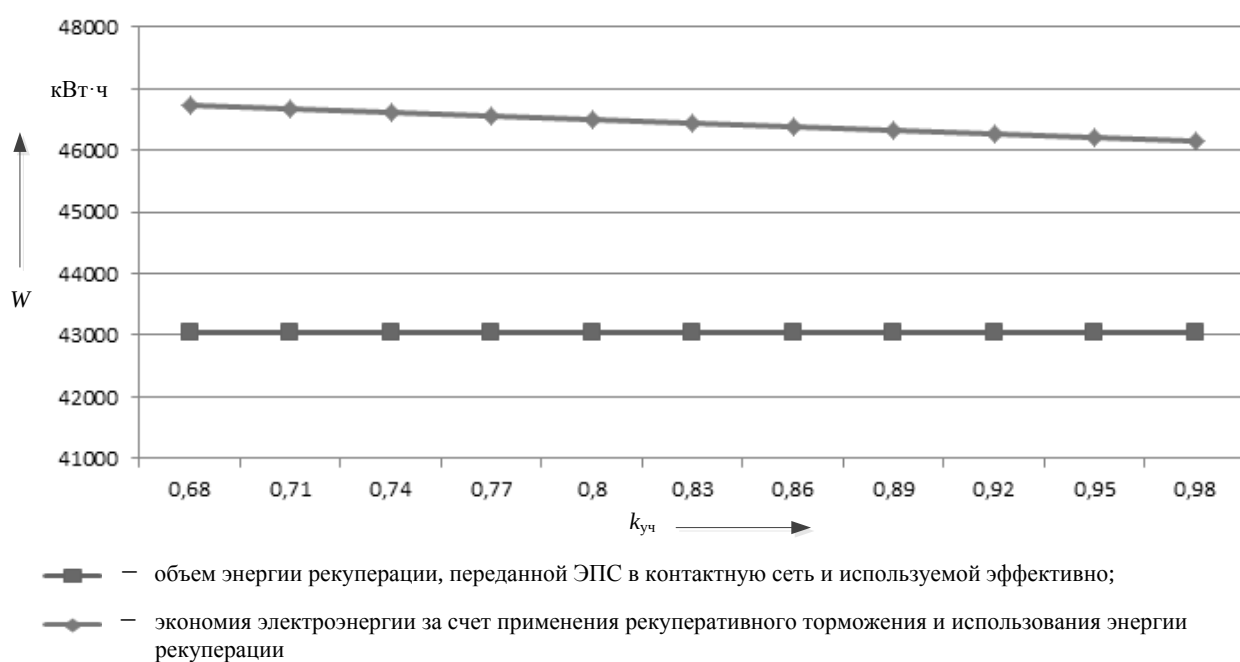


Рисунок 5 – Зависимости объемов ЭР, используемой эффективно и повышающей энергетическую эффективность тяги поездов, от коэффициента участковой скорости

Положенный в основу представленной методики расчетно-аналитический подход эффективен при необходимости планирования изменений параметров работы участка и улучшения эксплуатационных показателей работы участка. При отсутствии возможности проведения синхронных измерений процессов токопотребления на тяговых подстанциях и ЭПС на таких участках автоматизация предлагаемой методики становится оптимальным мероприятием, позволяющим

выполнять оперативную оценку эффективности работы СТЭ, организации движения поездов, работы структурных подразделений дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД»;

прогнозировать изменение уровня эффективности использования ЭР в зависимости от изменений эксплуатационных условий и параметров СТЭ;

принимать обоснованные управленческие и организационные решения по интенсификации применения РТ.

Список литературы

1. Черемисин, В. Т. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 1(25). – С. 60 – 70.
2. Черемисин, В. Т. Методика расчета экономической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2016. – № 3(50). – С. 95 – 99.
3. Никифоров, М. М. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии рекуперации [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, В. И. Гутников // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 74 – 83.
4. Черемисин, В. Т. Эффективность использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного и переменного тока [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – 216 с.
5. Черемисин, В. Т. Основные положения методики оценки эффективности использования ЭР [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2017. – № 1(65). С. 114 – 120.
6. Черемисин В. Т. Методика оценки использования энергии рекуперации [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Мир транспорта / Московский гос. ун-т путей сообщения Императора Николая II. – М. – 2018. – № 1(74). – С. 34 – 45.
7. Вильгельм А. С. Апробация расчетной модели системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока для оценки потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения [Текст] / А. С. Вильгельм, В. И. Гутников, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 1 (17). – С. 50 – 57.
8. Никифоров, М. М. Расчет эффективности использования энергии рекуперации на однопутных и двухпутных участках железных дорог постоянного и переменного тока [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Вестник транспорта Поволжья / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара. – 2018. – № 2 (68). С. 28 – 37.
9. Незевак, В. Л. Основные подходы к оценке влияния графика движения поездов на расход электроэнергии [Текст] / В. Л. Незевак, М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 122 – 128.
10. Вильгельм, А. С. Влияние энергии рекуперации на уровень потерь в системе тягового электроснабжения [Текст] / А. С. Вильгельм, М. М. Никифоров // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 2(53). – С. 55 – 60.

References

1. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Methodology for evaluating the energy efficiency of regenerative braking application and energy recovery use [Metodologiya otsenki energeticheskoi effektivnosti primeneniia rekuperativnogo tormozheniia i ispol'zovaniia energii reku-peratsii] / *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*. 2016, no. 1 (25), pp. 60 – 70.
2. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Method of regenerative braking and energy recovery use cost-effectiveness calculating [Metodika rascheta ekonomicheskoi effektivnosti primeneniia reku-perativnogo tormozheniia i ispol'zovaniia energii rekuperatsii] / *Transport Urala – Transport of Urals*, 2016. no. 3(50), pp. 95 – 99.
3. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Gutnikov V. I. Influence of parameters and operating modes traction power supply system on efficiency of energy recovery use [Vliyanie par-

ametrov i rezhimov raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na effektivnost' ispol'zovaniya energii rekuperatsii]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*. 2017, no. 1 (29), pp. 74 – 90.

4. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Efficiency of recuperation energy using on the railways of direct and alternating current: Scientific monograph [Effektivnost' ispol'zovaniya energii rekuperatsii na zheleznnykh dorogakh postoyannogo i peremennogo toka: Nauchnaya monografiya]. Omsk, 2018. 216 p.

5. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Main provisions of methodology for assessing of energy recovery use efficiency [Osnovnyye polozheniya metodiki otsenki effektivnosti ispol'zovaniya energii rekuperatsii] / *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya – Bulletin of Rostov State Transport University*. Rostov-na-Donu, 2017. № 1 (65), pp.114 – 120.

6. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Wilhelm, A. S. Method for Estimating the Use of Regenerative Energy [Metodika otsenki ispol'zovaniya energii rekuperatsii] / *Mir Transporta – World of transport and transportation*, vol. 16, Iss. 1, pp. 34 – 45 (2018).

7. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S., Gutnikov V. I. Approbation of the railroads traction power supply system a direct current calculation model for assessment of recuperative braking energy efficiency potential [Aprobatsiia raschetnoi modeli sistemy tiagovogo elektrosnabzheniia zheleznnykh dorog postoiannogo toka dlia otsenki potentsiala energoeffektivnosti rekuperativnogo tormozheniia] / *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*. 2014, no. 1 (17), pp. 50 – 57.

8. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Calculation of energy recovery use efficiency on single-track and double-track area of the railways of direct and alternating current [Raschet effektivnosti ispol'zovaniya energii rekuperatsii na odnopusnykh i dvukhpussykh uchastkakh zheleznnykh dorog postoyannogo i peremennogo toka] / *Vestnik transporta Povolzh'ya – Bulletin of Volga transport*. Samara, 2018, no. 2 (68), pp. 28 – 37.

9. Nezevak V. L., Nikiforov M. M., Ushakov S. Yu. The main approaches to the assessment of the effect of the train schedule on electricity consumption [Osnovnyye podkhody k otsenke vliyaniya grafika dvizheniya poyezdov na raskhod elektroenergii] / *Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: Materialy nauchnoy konferentsii – Innovative projects and technologies in education, industry and transport: Proceedings of the scientific conference*. Omsk, 2015, pp. 122 – 128.

10. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Energy recovery influence on the level of losses in traction power supply system [Vliyaniye energii rekuperatsii na uroven' poter' v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya] / *Transport Urala – Transport of Urals*, 2017. no. 2 (53), pp. 55 – 60.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте Омского государственного университета путей сообщения.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Вильгельм Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand.Tech.Sci, deputy director, Research Institute for Energy Efficiency in Railway Transport, Omsk State Transport University.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Vilgelm Alexander Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand.Tech.Sci, senior researcher associate of research-and-production laboratory «Energy saving up tech-

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», доцент.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

Еркебаев Айбек Жомартович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

Тел.: 8 (960) 989-13-12.

E-mail: yerkebayev.a@mail.ru

nologies and electromagnetic compatibility», Assistant Professor.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

Yerkebayev Aibek Jomartovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av. Omsk, 644046, Russia.

Post-graduate student of the department «Electric power supply of railway transport».

Phone: 8 (960) 989-13-12.

E-mail: yerkebayev.a@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Никифоров, М. М. Влияние технической и участковой скорости на эффективность использования энергии рекуперации [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, А. Ж. Еркебаев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 94 – 106.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nikiforov M. M., Vilgelm A. S., Yerkebayev A. J. Influence of technical and site speed on efficiency of energy recovery use. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 2, no 34, pp. 94 – 106 (In Russian).

УДК 629.4.072.2

С. С. Саркенов

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

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАФИКОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения с целью решения задачи по сокращению потребления электроэнергии на тягу поездов в условиях изменения расписания грузовых поездов. Имитационное моделирование выполнено для условий изменения массы поезда и нагрузки на ось. Описание полученных результатов выполнено на основе регрессионных моделей и нейронных сетей, приведен порядок применения моделей на практике.

Ключевые слова: график движения поездов, тяговые расчеты, система тягового электроснабжения, расход электроэнергии, потери электроэнергии, масса поезда, нагрузка на ось, межпоездной интервал, пакет поездов, нейросетевая модель.

Sovetkhan S. Sarkenov

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

EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY OF TRAIN MOTION SCHEDULES BASED ON MODELING BY NONLINEAR REGRESSION AND NEURAL NETWORK METHODS

Annotation. The article deals with the modeling of the electric rolling stock and traction power supply system with the aim of solving the problem of reducing the electric power consumption for the traction of trains in the conditions of changing the schedule of freight trains. Simulation modeling is performed for the conditions of changing the mass of the train and the load on the axis. The description of the results obtained is based on regression models, the order of application of models in practice is given.

Keywords: train traffic schedule, traction calculations, traction power supply system, electric power consumption, power losses, train mass, axle load, inter-train interval, train package, neural network model.

Потребление электроэнергии на тягу поездов относится к одной из приоритетных задач при реализации государственной политики в сфере энергосбережения. Государственная политика в данной сфере стимулирует мероприятия, направленные на повышение энергетической эффективности, вводя, например, льготное налогообложение для объектов высокой энергетической эффективности [1]. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» определяет целевые ориентиры повышения энергетической эффективности перевозок [2]. В связи с развитием информационных технологий в области организации движения поездов представляется актуальным решение задачи организации движения грузовых поездов по критерию снижения потребления электроэнергии на тягу поездов или повышения энергетической эффективности перевозочного процесса [3].

Рассмотрим взаимодействие электроподвижного состава и системы тягового электропитания в условиях организации движения грузовых поездов на участках железных дорог с различными типами профиля пути. С этой целью для ряда участков железной дороги выполнены тяговые расчеты с помощью программного комплекса «КОРТЭС» в условиях изменения масс составов и нагрузки на ось [4]. Фрагмент тягового расчета в программном комплексе «КОРТЭС» представлен на рисунке 1.

В качестве участков рассмотрены двухпутные участки железных дорог постоянного тока, режим питания межподстанционных зон на которых двусторонний параллельный [5].

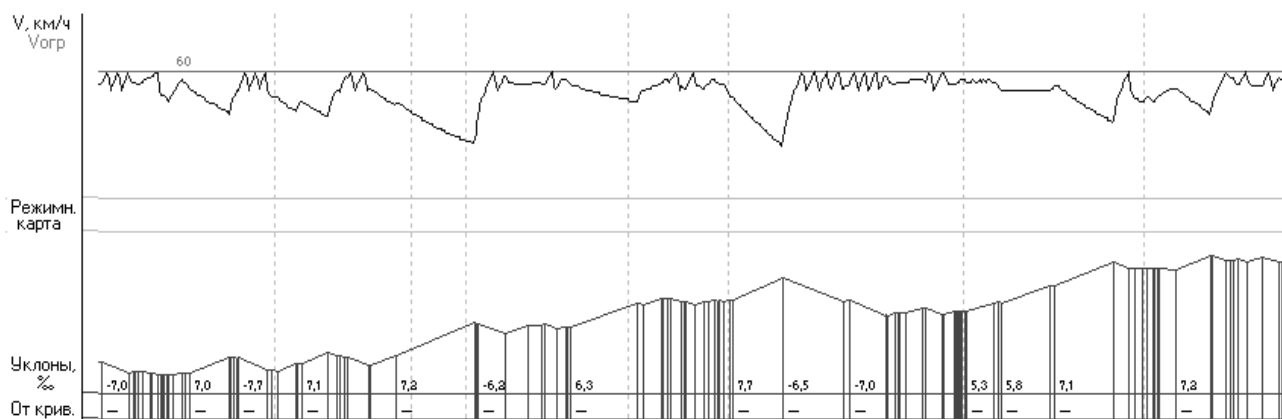


Рисунок 1 – Фрагмент тягового расчета в программном комплексе «КОРТЭС»

В качестве параметров графика движения поездов для условий пакетной организации движения рассматриваются межпоездной интервал и количество поездов в пакете. При моделировании принято, что изменение межпоездного интервала выполняется в диапазоне от 10 до 18 мин с шагом одна минута, изменение количества поездов в пакете – от трех до восьми штук с шагом один поезд.

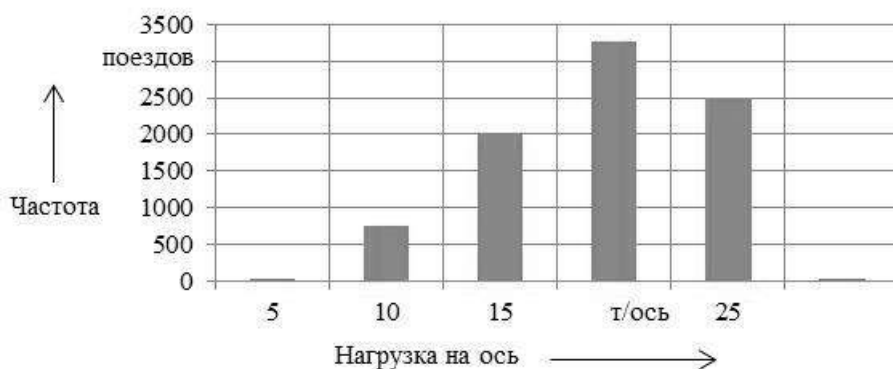


Рисунок 2 – Гистограмма распределения нагрузки на ось на участке по данным ТХО-125

На основании данных ТХО-125 (рисунок 2) принимается: изменение масс грузовых поездов в диапазоне от 1000 до 7000 т с шагом 1000 т; изменение нагрузки на ось в диапазоне от 5 до 25 т/ось с шагом 5 т/ось.

В программном комплексе «КОРТЭС» на основании тяговых расчетов были смоделированы суточные графики движения поездов на всех типах профиля железнодорожного пути. Проведен анализ результатов электрических расчетов и на рисунке 3 представлен график зависимости удельного расхода от параметров графика движения при постоянных массе и нагрузке на ось.

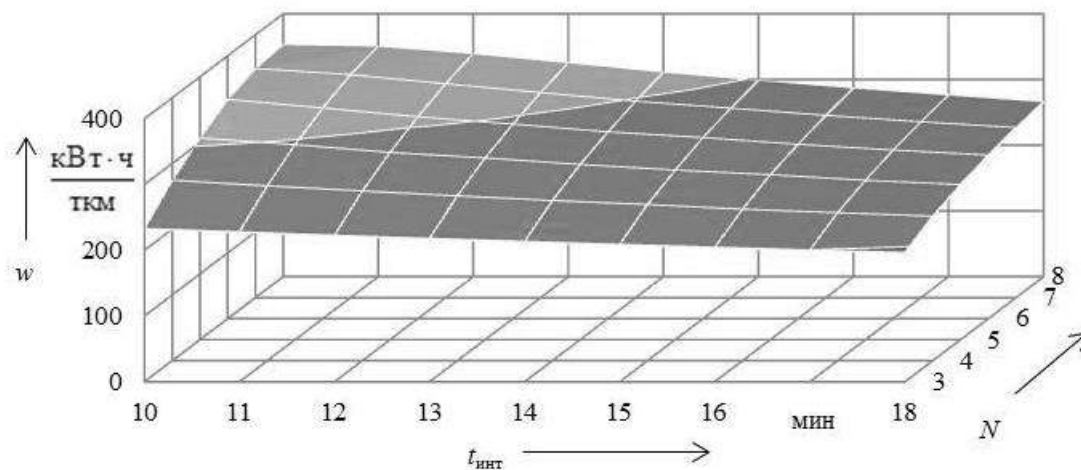


Рисунок 3 – График изменения удельного расхода электроэнергии в зависимости от параметров графика поездов при массе состава 1000 т и нагрузке на ось 5 т/ось

Анализируя полученные результаты моделирования, можно сделать следующие выводы: на всех типах профиля расход электроэнергии на тягу поездов минимален при межпоездном интервале 18 мин и количестве поездов в пакете, равном трем;

максимальный расход электроэнергии на тягу поездов на всех типах профиля при межпоездном интервале 10 мин и количестве поездов в пакете, равном восьми.

Это объясняется тем, что при минимальном интервале и максимальном количестве поездов на участке увеличивается потребление электроэнергии.

Для определения влияния параметров на расход и потери электроэнергии на тягу поездов воспользуемся корреляционным анализом [6]. Корреляционная зависимость удельного расхода от четырех параметров представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Корреляционная матрица удельного расхода

Нормообразующие факторы	w	$m_{ось}$	m	N	$t_{инт}$
w		0,07	0,79	0,32	-0,22
$m_{ось}$			0,38	0	0
m				0	0
N					0
$t_{инт}$					

Из анализа таблицы 1 видно, что влияние массы состава на электропотребления значительно и достигает 79 % [7]. Поэтому целесообразно рассмотреть каждую массу и нагрузку на ось отдельно. Рассмотрим корреляционную зависимость удельного расхода от параметров графика движения, т. е. от количества поездов и межпоездного интервала при постоянной массе состава и постоянной нагрузке на ось.

Таблица 2 – Корреляционная матрица удельного расхода при массе состава 1000 т и нагрузке на ось 5 т/ось

Нормообразующие факторы	w	N	$t_{\text{инт}}$
w		0,79	– 0,56
N			0
$t_{\text{инт}}$			

Корреляционная связь удельного расхода и количества поездов в пакете прямо пропорциональна и равна 79 %, а корреляционная связь межпоездного интервала обратно пропорциональна и равна 56 %.

Воспользовавшись математическими аппаратами обработки массива данных [8], построим нелинейную регрессионную модель вида:

$$w_{\text{расчет}} = A + B \cdot N + C \cdot t_{\text{инт}} + D \cdot N^2 + E \cdot t_{\text{инт}}^2,$$

где A, B, C, D, E – коэффициенты нелинейной регрессионной модели.

На рисунке 4 представлен вариант нелинейной регрессионной модели при массе состава 1000 т и нагрузке на ось 5 т/ось. Коэффициент детерминации данной модели равен 0,97, что больше 0,9 и позволяет говорить о достаточной точности модели.

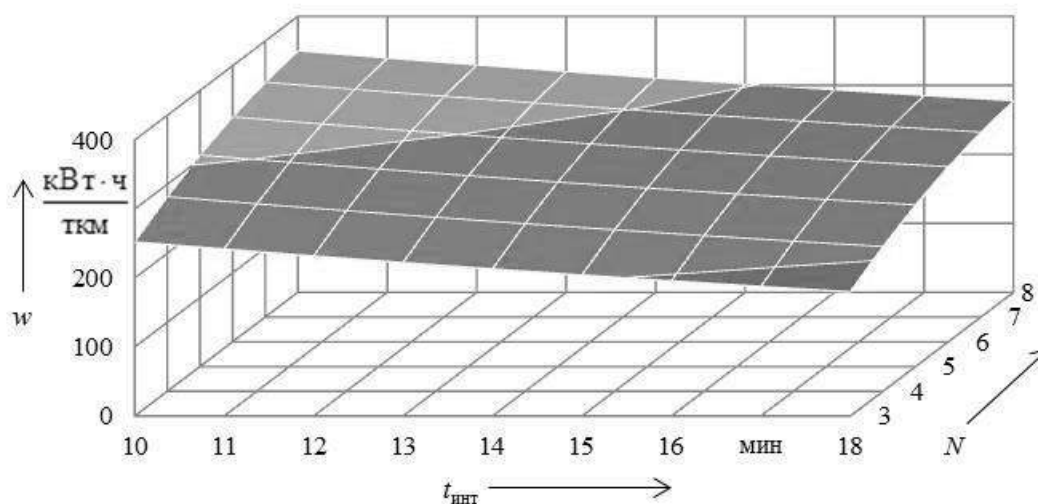


Рисунок 4 – Удельный расход электроэнергии в зависимости от параметров графика поездов при массе состава 1000 т и нагрузке на ось 5 т/ось (нелинейная регрессия)

Данную модель можно использовать в прогнозировании расхода электроэнергии на тягу поездов. При известных параметрах графика движения, количества поездов, их массы и длины, используя коэффициенты нелинейной регрессии, можно рассчитывать расход на будущий период.

С помощью нейронных сетей рассчитаем модели графиков движения поездов [9]. Методы нейронных сетей могут использоваться независимо или служить дополнением к традиционным методам анализа данных. Большинство статистических методов связано с построением моделей, основанных на тех или иных предположениях и теоретических выводах (например, в предположении, что искомая зависимость является линейной или переменные имеют нормальное распределение) [10].

Нейросетевой подход свободен от модельных ограничений, но одинаково годится для линейных и сложных нелинейных зависимостей и особенно эффективен в разведочном анализе данных, когда необходимо выяснить, имеются ли вообще зависимости между переменными [10]. Алгоритм нейронной сети представлен на рисунке 5. Результаты расчетов

нейронных сетей приведены в таблице 3, где представлены пять вариантов нейронных сетей со скрытыми функциями, функциями на выходе и точностями обучения и тестирования.

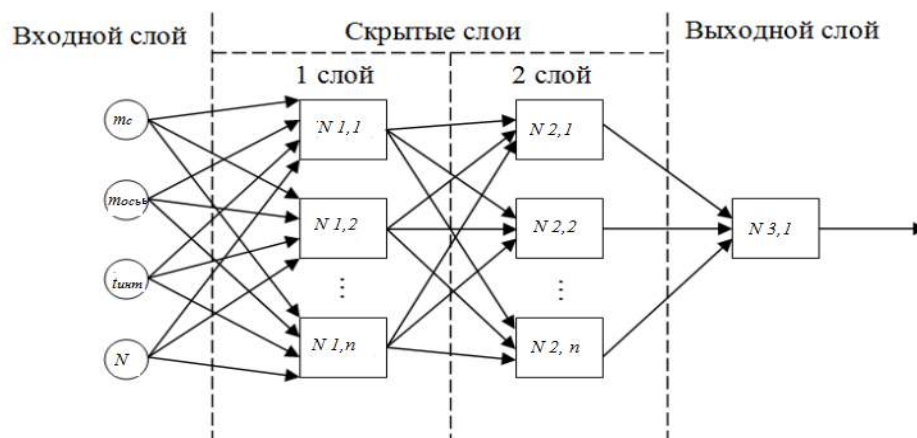


Рисунок 5 – Нейронная сеть со скрытыми слоями

Таблица 3 – Варианты расчета нейронными сетями

Название нейросети	Точность обучения	Точность тестирования	Ошибка обучения	Ошибка тестирования	Функция на выходе
MLP 2-3-1	0,998206	0,998891	0,000138	0,000058	Exponential
MLP 2-9-1	0,999061	0,999388	0,000075	0,000043	Tanh
MLP 2-3-1	0,997802	0,998999	0,000168	0,000056	Exponential
MLP 2-8-1	0,998830	0,999720	0,000086	0,000014	Identity
MLP 2-4-1	0,998313	0,999411	0,000132	0,000038	Logistic

Сравнение результатов регрессионной модели и нейронных сетей показывает, что коэффициент детерминации нейронных сетей для рассмотренных вариантов составляет более 0,99. Для регрессионных моделей коэффициент детерминации находится в диапазоне 0,93 – 0,97. Точность прогноза для нейронных сетей составляет 99,9 %, для регрессионных моделей – изменяется в диапазоне 93,0 – 96,0 %.

Таким образом, результаты построения модели электропотребления на тягу поездов позволяют сделать следующие выводы.

При сокращении количества грузовых поездов в пакете с восьми до трех наблюдается сокращение удельного расхода на 50,5 %, наибольшее снижение отмечается на I и II типах профиля.

При увеличении межпоездного интервала с 10 до 18 минут наблюдается снижение удельного расхода на всех типах профиля при формировании пакетного графика с тремя поездами в пакетах.

Выявленные корреляционные зависимости показывают, что при увеличении количества поездов в пакете наблюдается повышение удельного расхода, а при увеличении межпоездного интервала – снижение удельного расхода на 70,8 % при трех поездах в пакете и на 57 % при восьми поездах в пакете.

Корреляционная матрица показывает, что влияние количества поездов в пакете на удельный расход прямо пропорциональное, а межпоездного интервала обратно пропорциональное – при увеличении количества поездов в пакете с трех до восьми удельный расход увеличивается на 50,5 %, а при увеличении межпоездного интервала с 10 до 18 минут удельный расход снижается на 50,5 %.

При сравнении моделей, построенных на основе регрессионных моделей и нейронных сетей, установлено, что коэффициент детерминации для моделей достигает 0,97 для регрес-

сионной и 0,99 для нейронной, средняя абсолютная ошибка для моделей достигает 0,04 для регрессионной и 0,001 для нейронной.

Выбор вида нейронных сетей позволяет получить ряд моделей с различным количеством скрытых слоев. Сравнение моделей показывает, что для указанного вида задач нейронные сети для рассмотренных вариантов графиков движения позволяют добиться снижения наблюдаемой средней абсолютной ошибки с 0,000138 до 0,000075, повышения коэффициента детерминации с 0,997 до 0,999.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года от 15 декабря 2011 г. № 2718р [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2011. – 97 с.
2. Методика анализа и прогнозирования топливно-энергетических ресурсов [Электронный ресурс]: Распоряжение ОАО «РЖД» № 512 от 26.12.2014. <https://jd-doc.ru/2013/dekabr-2013/5126-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-31-12-2013-n-2967r>
3. Сидорова, Е. А. Характеристика энергопотребления на тягу поездов в энергетическом паспорте железной дороги [Текст] / Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 4 (4). – С. 76 – 80.
4. Черемисин, В. Т. Характеристики профилей пути на электрифицированных участках железных дорог в аспекте классификации типов [Текст] / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. В. Перестенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2017. – № 2. – С. 118 – 128.
5. Черемисин, В. Т. Оценка влияния пакетной организации движения на объем электроэнергии на тягу на участках постоянного тока с I типом профиля [Текст] / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, С. С. Саркенов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2017. – № 3 (55). – С. 135 – 144.
6. Незевак, В. Л. Оценка изменения объема электропотребления на тягу от графика движения поездов на участках с I типом профиля пути на основе регрессионных моделей и нейронных сетей / В. Л. Незевак // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 4 (55). – С. 65 – 70.
7. Незевак, В. Л. Основные зависимости изменения объема электроэнергии от параметров графика движения поездов на участках постоянного тока с I типом профиля [Текст] / В. Л. Незевак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. 2017. – № 2 (30). – С. 87 – 99.
8. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов и др. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
9. Нейронные сети: Методология и технологии современного анализа данных [Текст] / Под ред. В. П. Боровикова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 392 с.
10. W. Günselmann . Technologies for increased energy efficiency in railway systems [Text] / Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on.

References

1. *Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda* (Energy strategy of the holding «Russian Railways» for the period until 2015 and for the future until 2030): Order of JSC Russian Railways of December 15, 2011, No. 2718r, 97 p.
2. *Metodika analiza i prognozirovaniia toplivno-energeticheskikh resursov* (Methods of analysis and forecasting of fuel and energy resources): Order of JSC Russian Railways No. 512 of December 26, 2014.

3. Sidorova E. A., Davydov A. I. Characteristics of energy consumption for the traction of trains in the power railroad passport [Kharakteristika energopotrebleniia na tiagu poezdov v energeticheskom pasporte zheleznoi dorogi]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 4 (4), pp. 76 – 80.

4. Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Perestanenko A. V. Characteristics of path profiles on electrified sections of railways in the aspect of classification of types [Kharakteristiki profilei puti na elektrifitsirovannykh uchastkakh zheleznykh dorog v aspekte klassifikatsii tipov]. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – The journal of Vestnik of the Rostov State Transport University*, 2017, no. 2, pp. 118 – 128.

5. Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Sarkenov S. S. Evaluation of the effect of batch traffic organization on the amount of electric power for traction on the sections of direct current with the I type profile [Otsenka vliianiia paketnoi organizatsii dvizheniia na ob'em elektroenergii na tiagu na uchastkakh postoiannogo toka s I-m tipom profilii]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – The journal of Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2017, no. 3 (55), pp. 135 – 144.

6. Nezevak V. L. Estimation of the change in the amount of power consumption for traction from the train schedule on sections with the I type of the path profile based on regression models and neural networks [Otsenka izmeneniia ob'ema elektropotrebleniia na tiagu ot grafika dvizheniia poezdov na uchastkakh s I tipom profilii puti na osnove regressionnykh modelei i neironnykh setei]. *Transport Urala – The journal of Transport of the Urals*, 2017, № 4 (55), pp. 65 – 70.

7. Nezevak V. L. The main dependencies of the change in the volume of electric power from the parameters of the train schedule on the sections of direct current with the i-th profile type [Osnovnye zavisimosti izmeneniia ob'ema elektroenergii ot parametrov grafika dvizheniia poezdov na uchastkakh postoiannogo toka s I-m tipom profilii]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway*, 2017, no. 2 (30), pp. 87 – 99.

8. Grebenyuk P. T. *Pravila tiagovykh raschetov dlia poezdnoi raboty* (Rules of traction calculations for train work). Moscow: Transport, 1985, 287 p.

9. Borovikov V.P. *Neironnye seti: Metodologiya i tekhnologii sovremennogo analiza dannykh* (Neural networks: Methodology and technologies of modern data analysis). Moscow: Telecom, 2008, 392 p.

10. Günselmann W. Technologies for increased energy efficiency in railway systems. *Power Electronics and Applications*, 2005 European Conference on.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Саркенов Советхан Сатжанович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

E-mail: sovet201@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sarkenov Sovetkhan Satganovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Rolling stock electric railway», OSTU.

E-mail: sovet201@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Саркенов, С. С. Оценка энергоэффективности графиков движения поездов на основе моделирования методами нелинейной регрессии и нейронных сетей [Текст] / С. С. Саркенов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2(34). – С. 106 – 112.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sarkenov S. S. Modeling of electric consumption processes on the track of trains in the aspect of influence of norm-forming factors. *The journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 2, no 34, pp. 106 – 112 (In Russian).

Е. А. Третьяков¹, А. Г. Галкин², Е. А. Сидорова¹

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

²Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТОМ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Внедрение цифровых технологий в электрических сетях и подстанций позволяет использовать новые технологии и перспективные методы управления транспортом и распределением электроэнергии в интеллектуальных электрических сетях железных дорог на основе мультиагентного управления. Указанные методы должны обеспечивать повышенное быстродействие, адаптивное определение ограничений на использование электроэнергетического оборудования, управление параметрами режима, секционированием и режимами потоков мощности в распределительных сетях, восстановлением энергоснабжения после аварийных событий. Разработан метод адаптивного управления транспортом и распределением электрической энергии в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, основанный на иерархической структуре по МЭК 61850, учитывающий координацию управляющих и локальных контроллеров в среде обмена данными, изменяемую зону ответственности управляющих контроллеров и их разделение по функциональному назначению на основе мультиагентного подхода. Представлены подходы к управлению потоками мощности для снижения потерь электроэнергии, повышения пропускной способности транспортных каналов и обеспечения восстановления нормального режима электрической сети путем ее реконфигурации и управления активными элементами на основе теории графов с учетом прогнозного почасового графика нагрузки, ограничения спроса на мощность активными потребителями и замкнутого режима работы электрической сети через управляемые сечения. Представленные результаты моделирования управления напряжением в тестовой электрической схеме показали реализуемость и эффективность предложенных подходов.

Ключевые слова: напряжение, координация, потоки мощности, распределенное управление, оптимизация, управляющие воздействия, матрица чувствительности, активно-адаптивные электрические сети.

Evgeny A. Tretyakov¹, Alexander G. Galkin², Elena A. Sidorova¹

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²Ural State University of railway engineering (USGS)

PERSPECTIVE METHODS OF MANAGEMENT OF TRANSPORT AND DISTRIBUTION OF ELECTRIC ENERGY IN ELECTRIC NETWORKS OF RAILWAYS

Abstract. The introduction of digital technologies in electrical networks and substations allows the introduction of new technologies and promising methods for managing transportation and distribution of electricity in intelligent electric networks of railways based on multi-agent control. These methods should provide improved performance, adaptive definition of restrictions on the use of electric power equipment, control of mode parameters, partitioning and power flow modes in distribution networks, restoration of power supply after emergency events. A method of adaptive control of transport and distribution of electrical energy in the power supply system of stationary consumers of railways has been developed, based on the hierarchical structure of IEC 61850, taking into account the coordination of control and local controllers in the data exchange environment, a variable area of responsibility of control controllers multi-agent approach. It presents approaches to managing power flows to reduce energy losses, increase the capacity of transport channels and ensure restoration of the normal mode of the electrical network by reconfiguring it and managing active elements based on graph theory, taking into account the projected hourly load schedule, limiting the demand for power to active consumers and closed mode electrical network operation through controlled sections. The presented simulation results of voltage control in the test circuit showed the feasibility and effectiveness of the proposed approaches.

Keywords: voltage, coordination, power flows, distributed control, optimization, control actions, sensitivity matrix, actively-adaptive electrical networks.

Электросетевой комплекс холдинга «РЖД» осуществляет передачу электроэнергии сторонним потребителям. В 2017 г. отпуск электроэнергии сторонним потребителям составил

33,48 млрд кВт·ч, что составляет 40,33 % от общего потребления железнодорожного транспорта.

В настоящее время основными проблемами системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог являются такие:

- низкая наблюдаемость параметров режима;
- низкий уровень оснащения техническими средствами регулирования параметров режима и элементами автоматизированных систем управления;
- недостаточная пропускная способность и перегрузка кабельных, воздушных линий и трансформаторов;
- высокие фактические потери и низкое качество электроэнергии;
- недостаточная надежность электроснабжения потребителей.

Поэтому техническое переоснащение и модернизация энергетического оборудования инфраструктуры электросетевого комплекса железных дорог является одной из первоочередных задач, стоящих перед ОАО «РЖД».

В настоящее время в ПАО «Россети», включая дочерние компании, реализуются пилотные проекты по внедрению цифровых подстанций с элементами централизованного управления, касающиеся в основном восстановления нормального режима электроэнергетической системы. В Великобритании, США и Китае введено в строй более сотни трансформаторных подстанций, а которых реализованы алгоритмы распределенного автоматического управления параметрами режима по напряжению, активной и реактивной мощности.

На современном этапе развития электроэнергетических систем России актуальной задачей является разработка принципов, методов функционирования интеллектуальных энергетических систем с активными элементами и средств управления ими.

Существующие системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог выполнены, как правило, по радиальным схемам, имеют низкую наблюдаемость параметров режима, недостаточную оснащенность линейными регуляторами и элементами автоматизированных систем управления [1].

В настоящее время управление системой электроснабжения железных дорог осуществляется с помощью оперативно-диспетчерского управления переключениями, выполняемого, как правило, оперативным персоналом [2].

Управление системой электроснабжения железных дорог включает в себя пять уровней во главе с «Трансэнерго» – филиалом ОАО «РЖД». Передача и распределение электроэнергии сторонним потребителям через систему электроснабжения железных дорог осуществляется преимущественно на уровне напряжений 6 – 10/0,4 кВ.

Требования к перспективным методам управления транспортом и распределением электрической энергии в распределительных электрических сетях железных дорог должны быть согласованы со стратегией развития электросетевого комплекса Российской Федерации (на период до 2030 года) [3]. Обязательные функциональные свойства перспективных распределительных электрических сетей железных дорог:

- обеспечение надежности электроснабжения и качества электроэнергии;
- распределенное накопление и генерация энергии;
- наблюдаемость, управляемость, система обработки информации и принятия решений;
- самовосстановление при аварийных ситуациях.

Основные требования к перспективным методам экономичной и надежной транспортировки электроэнергии и снабжения потребителей:

новые системы управления, обладающие двухсторонней связью для обеспечения оперативного и автоматического управления объектами электроснабжения;

повышенное быстродействие и точность работы системы мониторинга, обеспечивающей слежение за режимом, идентификацию аварийных и недопустимых ситуаций, измерения текущих параметров режима энергосистемы и оборудования;

адаптивное определение ограничений на использование электроэнергетического оборудования;

системы распределенного и иерархического способов сбора, обработки и хранения информации;

противоаварийная и режимная автоматика.

Представленным требованиям в наибольшей степени соответствует метод мультиагентного управления системой электроснабжения, который предполагает интеграцию централизованного и децентрализованного управления [4]. Основной отличительной особенностью мультиагентного управления является множество центров принятия решений (распараллеливание информационных потоков).

Ряд авторов [5, 6] придерживаются метода ситуационного управления, используя совместно с ним теорию нечетких множеств и кластерный анализ.

Система управления подстанцией (ПС) на основе мультиагентного подхода может быть реализована по МЭК 61850 [7] и строится на иерархическом принципе с выделением трех основных уровней: нижний (технологического процесса), средний (присоединения ячейки) и верхний (общего подстанционного).

Структурная схема информационно-управляющей архитектуры ПС представлена на рисунке 1.

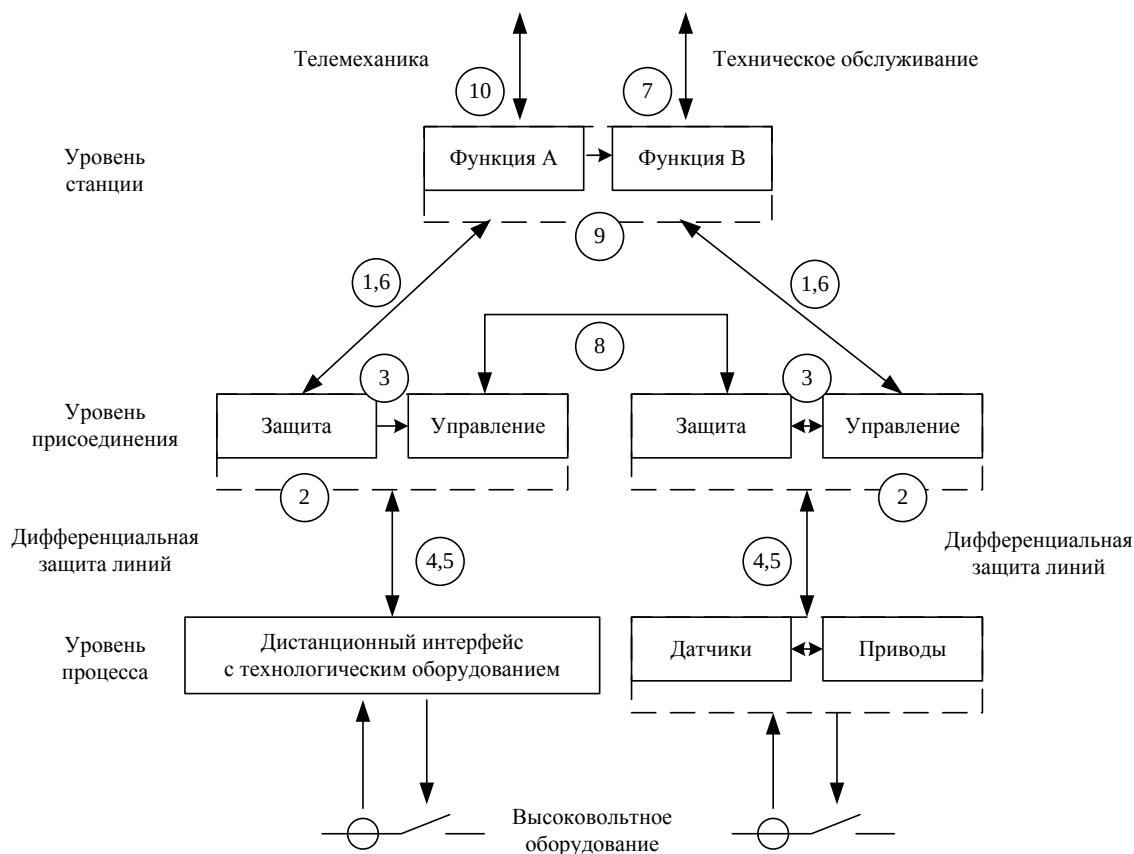


Рисунок 1 – Архитектура системы управления ПС по МЭК 61850: 1 – обмен информацией, относящейся к защите, между уровнем присоединения и уровнем станции; 2 – с устройством защиты противоположного конца; 3 – в пределах уровня присоединения; 4 – мгновенный обмен информацией (в особенности результатами измерений) от трансформаторов тока и напряжения между технологическим уровнем и уровнем присоединения; 5 – между уровнем процесса и уровнем присоединения; 6 – между уровнем присоединения и уровнем станции; 7 – между станционным уровнем и удаленным рабочим местом оператора; 8 – между присоединениями, в особенности для высокоскоростных функций, таких как блокировка; 9 – в пределах уровня станции; 10 – между станционным уровнем и удаленным центром управления

Современные распределительные сети железнодорожных узлов представляют собой многосвязные объекты, работающие в условиях переменности их структуры, параметров и режимов работы с центрами питания от тяговых или трансформаторных подстанций АО-Энерго.

В качестве объектов управления могут выступать источники активной и реактивной мощности; РПН трансформаторов 110, 35, 10 кВ; линейные регуляторы и вольтодобавочные трансформаторы; устройства FACTS (FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEM); активные потребители; коммутационные аппараты.

Метод адаптивного управления транспортом и распределением электрической энергии в распределительных электрических сетях железных дорог (рисунок 2) основан на принятии решений (управляющие контроллеры-агенты-координаторы) на основе измерений и анализа на базе мультиагентных систем. Все датчики, локальные и управляющие контроллеры соединены через информационные каналы по своим протоколам с виртуальной моделью сети в границах энергодиспетчерского пункта, который является центром управления. Выдача управляющих воздействий на исполнительные устройства объектов управления осуществляется как в автоматическом режиме, так и в результате действий энергодиспетчера, который осуществляет свои функции в центре управления системой электроснабжения.

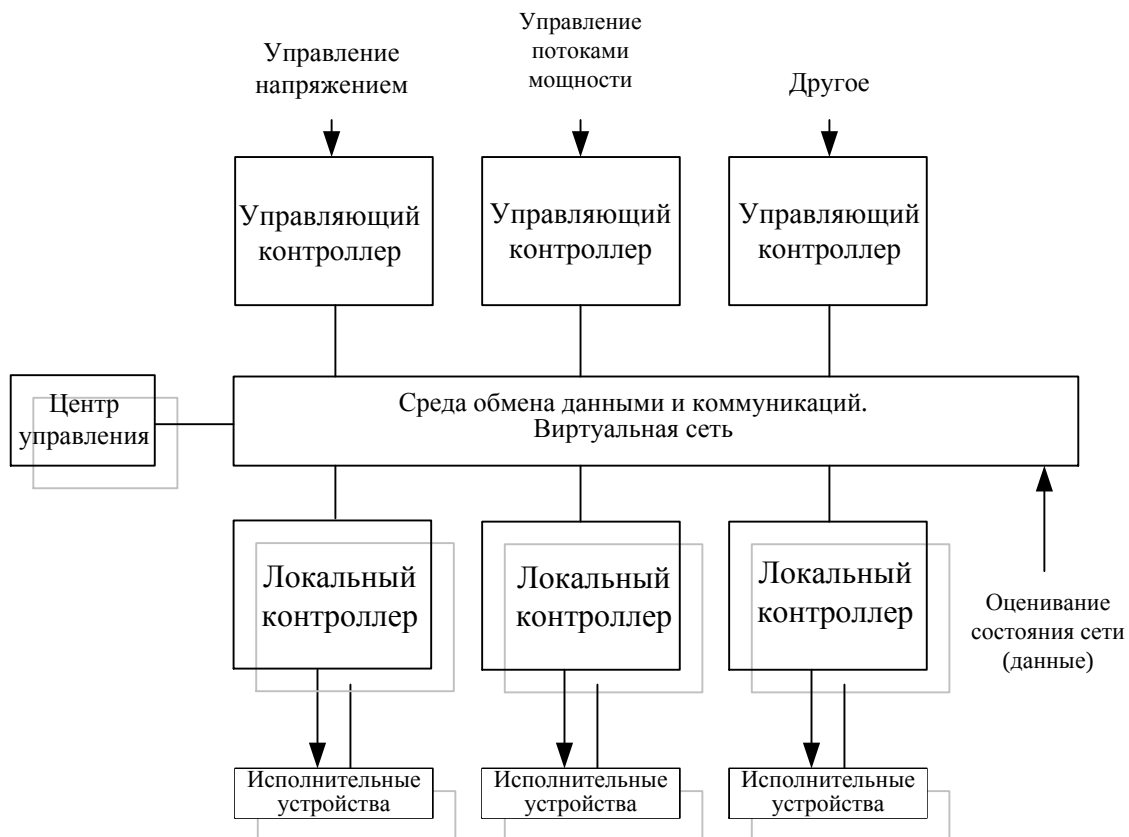


Рисунок 2 – Архитектура мультиагентного управления системой электроснабжения стационарных потребителей железных дорог

Локальные контроллеры объектов управления могут работать как автономно на основе своих целей, так и получив задание от распределительного (управляющего) контроллера подстанции, участка электрической сети, системы электроснабжения (рисунок 3).

Математически обобщенное описание мультиагентной системы управления (МАС) можно представить в виде [4]:

$$MAS = (AG, E, P, S), \quad (1)$$

где AG – группа агентов; E – вектор множества состояний среды; P – вектор-функция оценивания состояния; S – вектор-функция изменения состояния (поведения)

$$P \times S \rightarrow A, \quad (2)$$

A – действие, выходной алфавит;

$$\begin{aligned} \tilde{S}_i(k) &= [s_{1i}, s_{2i}, \dots, s_{li}]^T; \\ \tilde{A}_i(k) &= [a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{mi}]^T; \\ \tilde{E}_i(k) &= [e_{1i}, e_{2i}, \dots, e_{wi}]^T; \\ \tilde{P}_i(k) &= [p_{1i}, p_{2i}, \dots, p_{wi}]^T. \end{aligned}$$

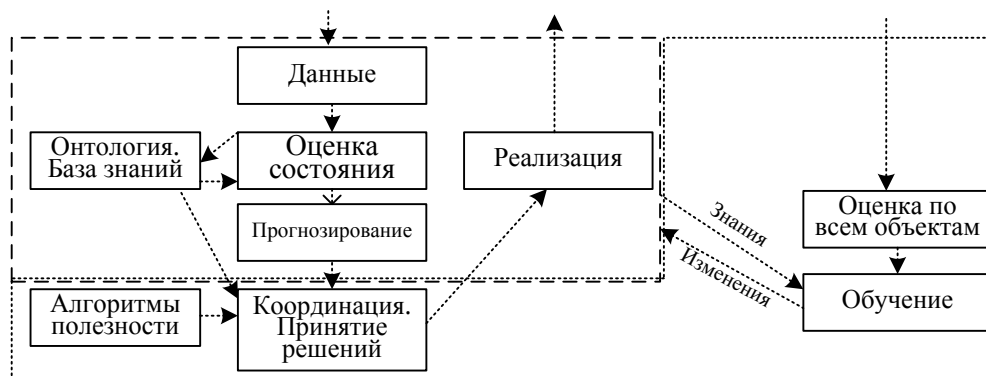


Рисунок 3 – Структура управляющего контроллера

Управление группой агентов

$$\begin{aligned} \tilde{S}_i &= f(S_1, A_1, \dots, S_N, A_N, E), i = 1, \dots, N; \\ \tilde{E}_i &= f(S_1, A_1, \dots, S_N, A_N, E) \end{aligned} \quad (3)$$

осуществляется при следующих ограничениях:

$$\begin{aligned} G(S_1, \dots, S_N, E) &\leq 0; \\ D(S_1, A_1, \dots, S_N, A_N, E) &\leq 0. \end{aligned}$$

Локальные правила самоорганизации (критерии эффективности агентов – для формирования их перечня) описываются целевой функцией:

$$J = \sum_{v=1}^n q_v \rightarrow \max; n \rightarrow \min, \quad (4)$$

где q_v – эффективность действий агента; n – число агентов, обеспечивающее достижение целевой функции.

Порядок управления агентами:

- 1) получение целевой задачи и формирование перечня агентов для ее решения;
- 2) адаптация алгоритма работы агентов к текущим условиям;
- 3) выполнение действий агентами в соответствии с алгоритмом.

Для повышения достоверности измеренных данных используются методы оценивания состояния. Идентификация текущего режима строится на основе оценивания состояния электрической сети и включает в себя следующее:

топологию сети – множество узлов и связей между ними на текущий момент времени (граф сети и матрица инцидентий);

параметры элементов расчетной схемы (сопротивления, проводимости оборудования, коэффициенты трансформации, коэффициенты статических нагрузок и генераторов и т. д.);

параметры режима электрической сети (напряжения, перетоки активной и реактивной мощности, токи, мощность генерации и графики потребления и т. д.).

В общем смысле процедура оценивания состояния системы электроснабжения заключается в том, что находятся такие значения параметров режима, которые удовлетворяют уравнению установившегося режима и соответствуют измеренным значениям.

Анализ топологии выполняется путем анализа измерений. Для МАС требуется использовать метод оценки состояния, основанный на применении локальных измерений вместо объемных централизованных данных, например, метод асинхронных алгоритмов оценивания состояния на базе отдельных агентов. Поскольку агент получает новые оценки переменных, он сравнивает их со своими собственными данными на основе метода максимального правдоподобия, который заключается в построении оценки неизвестного параметра со значением, максимизирующим вероятность получения при опытах данной выборки.

Следующая подсистема управляющего контроллера (рисунок 3) – это онтология и база знаний в системе электроснабжения.

Для описания онтологии используется семантическая сеть: на основе диаграмм классов и ограничений описываются все знания, которые необходимы агенту как для индивидуальной работы, так и для взаимодействия с другими агентами.

Модель онтологии имеет вид:

$$O = (X, R, F), \quad (5)$$

где X – конечное множество концептов; R – конечное множество отношений между концептами; F – конечное множество интерпретации.

Прогнозирование данных для целей управления позволит повысить точность решаемых задач.

Результаты предшествующих измерений электропотребления, расположенные в хронологическом порядке, можно рассматривать как статистическую информацию о предшествующем поведении, позволяющую прогнозировать дальнейшее поведение системы.

Прогнозирование нагрузки может выполняться различными известными методами, которые обеспечивают высокую скорость расчетов, например, методом статистической экстраполяции с почасовым прогнозом.

Метод мультиагентного управления основан на координации распределенных объектов, которая предназначена для согласования индивидуальных целей и вариантов поведения агентов, при которых каждый агент улучшает или не ухудшает значение своей функции полезности, а система в целом улучшает качество решения общей задачи [4].

Основные подходы к координации агентов [4]:

- 1) координация на удовлетворение общих правил поведения;
- 2) координация на основе переговоров;
- 3) сотрудничество для достижения общей цели;
- 4) координация типа «аукцион».

Алгоритм, реализующий процедуру аукциона, является итерационным и включает в себя последовательность шагов, связанных с формированием «стоимости» достижения целей каждым агентом, их сортировкой в порядке возрастания цены, с определением победителя, с повторным формированием ценового массива агентов и т. д., пока все цели не будут распределены между агентами (рисунок 4).

Первая итерация:

- 1) выдача задач;
- 2) формирование агентами ценового массива (k_p, k_Q);

3) определение эффективности действий агента, ранжирование массива их соотношений ($k_{p,q}/a, b$);

4) выбор лучших предложений.

Вторая и последующие итерации выполняются, если задачи распределены не полностью (лучшими предложениями).

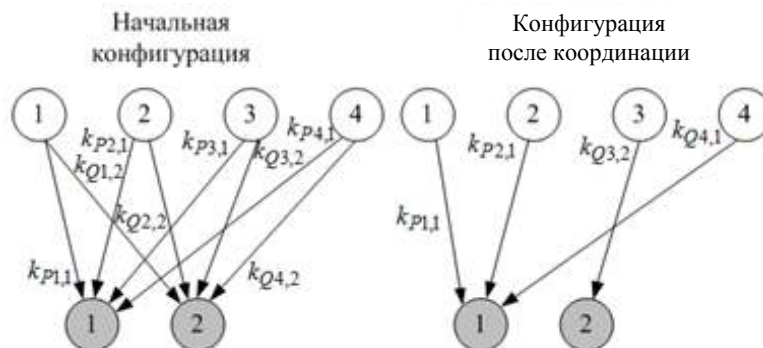


Рисунок 4 – Координация агентов

Рассмотрим пример распределительной сети железных дорог напряжением 6 кВ в нормальном режиме (рисунок 5).

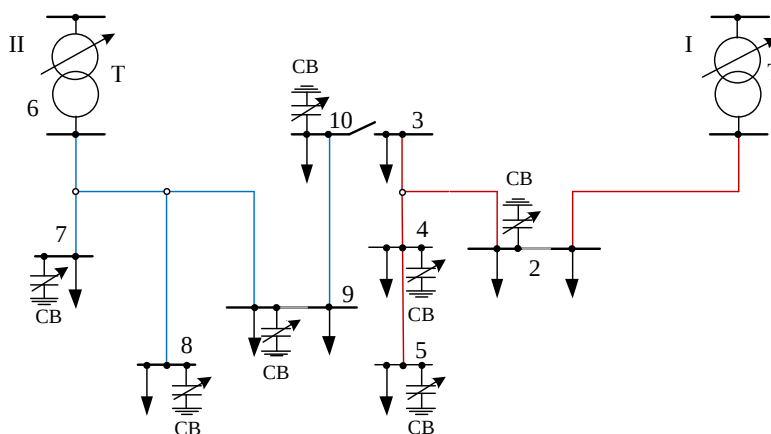


Рисунок 5 – Тестовая электрическая схема

Согласно мультиагентному методу управления напряжением при отклонении напряжения, например, на шинах 3, источники реактивной мощности на шинах 2, 4, 5 включаются в работу для стабилизации напряжений. Величины реактивной мощности источников определялись в результате решения оптимизационной задачи [6]. При этом координация между источниками осуществлялась по типу «аукцион» в результате ранжирования по убыванию соотношений (k_{p3}/a_{j3}) и (k_{q3}/b_{j3}), которые характеризуют чувствительность шины 3 по напряжению к изменению реактивной мощности в узлах электрической схемы и «стоимость» источников реактивной мощности. Чувствительность шин электрической сети по напряжению к изменению реактивной мощности определяется на основе соответствующих первых производных реактивной мощности от модулей напряжения [10].

Решение оптимизационной задачи решается итерационно, т. е. на каждом шаге итерации контроллеры источников реактивной мощности обмениваются обновленными значениями своих переменных. Обычно достаточно трех – шести итераций. Как следует из рисунка 6, стабилизация напряжения при отклонении напряжения на шине 3 может быть обеспечена источниками реактивной мощности (КУ) на шинах 4, 5 и 2, если указанное отклонение напряжения не превышает 190 В. Для стабилизации напряжения на шине 3, например, при

отклонении напряжения на 100 В, достаточно генерации реактивной мощности КУ на шине 4 на величину 300 квар и на шине 5 – 155 квар.

Оптимизация режима электрической сети, направленная на улучшение одного из параметров, например, напряжения, может вызвать перегрузку элементов сети и снижение ее пропускной способности. Режим распределительной сети должен быть прежде всего допустимым, т. е. должен удовлетворять условиям надежности электроснабжения, пропускной способности и качества электроэнергии [8 – 14].

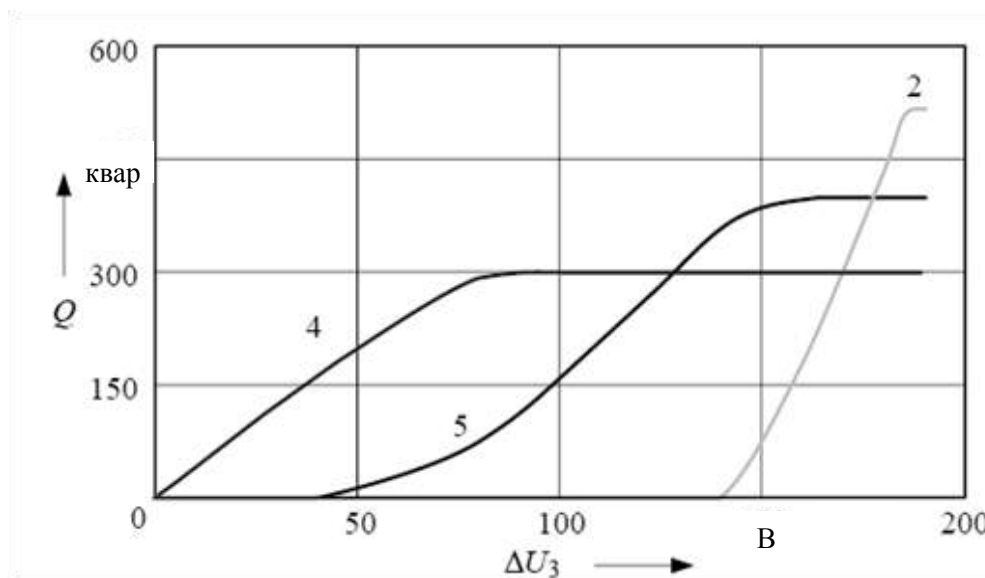


Рисунок 6 – Значения источников реактивной мощности на шине 4 (кривая 4), шине 5 (кривая 5) и шине 2 (кривая 2) для стабилизации напряжения на шине 3

Мультиагентное управление потоками мощности в распределительной электрической сети осуществляется за счет:

- координированной выработки активной и реактивной мощности;
- реконфигурации электрической сети, в том числе в замкнутый режим с управляемыми связями;
- ограничения спроса на электрическую энергию потребителям.

Цели управления:

- снижение потерь электроэнергии;
- ограничение перегрузок и повышение пропускной способности сети;
- восстановление нормального режима.

Алгоритм управления потоками мощности на основе их координированной выработки. Целевая функция по минимуму затрат на генерацию, передачу и распределение электроэнергии:

$$f = \sum_{i \in G} \alpha_i \Delta P_{Gi} + \sum_{i,j \in T} \beta_{ij} \Delta P_{Tij} + \sum_{i \in L} \gamma_i \Delta P_{Li} \quad (6)$$

при условии

$$\begin{aligned} \sum_{i \in G} P_{Gi} &= \sum_{i,j \in T} P_{Tij} + \sum_{i \in L} P_{Li}; \\ P_{Gi}^{\min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}; P_{Tij} \leq P_{Tij}^{\max}; \\ P_{Gi} &= P_{Gi0} + \Delta P_{Gi}; P_{Tij} = P_{Tij0} + \Delta P_{Tij}; \\ P_{Li} &= P_{Li0} + \Delta P_{Li}; U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, \end{aligned}$$

где P_{Gi} , P_{Tij} , P_{Li} – мощность генерации, потери мощности в электрической сети, мощность нагрузки; α_i , β_{ij} , γ_i – коэффициенты затрат на генерацию, передачу и приоритет нагрузки.

Эффективнее решать представленную задачу в соответствии с теорией графов методами кратчайшего пути, максимального потока [10].

Алгоритм Дейкстры является общей процедурой последовательного обновления метки расстояний до тех пор, пока они не удовлетворят условиям оптимальности кратчайшего пути. Алгоритм максимального потока (push-relabel) позволяет определить максимальную пропускную способность участков электрической сети.

Реконфигурация электрической сети может использоваться с целью повышения экономичности передачи и распределения электроэнергии в нормальном режиме и восстановления нормального режима.

Методами решения задачи определения оптимальной реконфигурации электрической сети являются перебор вариантов, последовательного приближения, вероятностные, эвристические (предпочтительнее).

Целевая функция реконфигурации в нормальном режиме обычно минимизирует потери электрической электроэнергии в сетях. Практически частота реконфигурации в нормальном режиме ограничена ресурсом коммутационных аппаратов и негативными последствиями переходных процессов в электрической сети. Реконфигурация в нормальном режиме может осуществляться от двух раз в год до двух раз в сутки. Перспективным является перевод электрических сетей среднего напряжения в замкнутый режим через устройства FACTS для оптимального перераспределения потоков мощности.

Восстановление нормального режима включает в себя следующее:

- реконфигурацию для повышения пропускной способности (снижения перегрузки);
- деление сети для секционирования (локализации) поврежденного участка.

Условия реконфигурации для восстановления нормального режима:

- обеспечение баланса мощности, включая резерв;
- исключение перегрузки электрооборудования;
- исключение недопустимых уровней напряжения и частоты.

Деление системы на подсистемы осуществляется по слабым связям на основе сенсорного анализа электрической сети.

Управление потоками мощности в электрических сетях с замкнутыми схемами через управляемые сечения (системы управляемых передач переменного тока) вместо нормально открытых пунктов позволяют регулировать поток активной и реактивной мощности и стабилизировать напряжения.

Результаты моделирования показали, что использование управляемых гибких передач переменного тока способствует значительному уменьшению потерь электроэнергии, стабилизации напряжений.

Управление потоками мощности в электрической сети на основе мультиагентного подхода осуществляется за счет изменения схем питания (при возможности), управления выработкой реактивной (активной) мощности, а также ограничения спроса на электрическую энергию потребителями. Наряду с ограничением мощности потребителей в ненормальных режимах соответствующей автоматикой (отключением) предлагается подход с более тщательным ранжированием потребителей с точки зрения возможного ущерба их отключения в реальном времени и их гибкости в управлении спросом (так называемые активные потребители).

Приоритет нагрузки определяется путем ранжирования потребителей по ценовой функции спроса на момент отключения.

Представленный перспективный метод управления транспортом и распределением электроэнергии в интеллектуальных распределительных электрических сетях железных дорог на основе мультиагентного управления включает в себя управление напряжением, секционированием и режимами потоков мощности в распределительных электрических сетях, восстановлением энергоснабжения после аварийных событий. Отличительной чертой указанного метода является то, что он учитывает координацию управляющих и ло-

кальных контроллеров в среде обмена данными, основан на изменяемой зоне ответственности управляющих контроллеров и их разделении по функциональному назначению на основе мультиагентного подхода. Управление потоками мощности для снижения потерь электроэнергии, повышения пропускной способности транспортных каналов и обеспечения восстановления нормального режима распределительных электрических сетей железных дорог предлагается выполнять путем их реконфигурации и управлением активными элементами на основе теории графов с учетом почасового прогнозирования графика нагрузки, ограничения спроса на мощность активными потребителями и возможности замкнутого режима работы электрической сети через управляемые сечения.

В настоящее время распределительные электрические сети электрических железных дорог должны быть модернизированы не только путем перехода на цифровые технологии передачи данных во вторичных цепях, но и путем создания гибкой системы управления такими сетями для повышения надежности электроснабжения, экономичности транспорта и распределения электроэнергии конечным потребителям.

Представленные результаты моделирования управления напряжением в тестовой электрической схеме показали реализуемость и эффективность предложенных подходов.

Список литературы

1. Почаевец, В. С. Автоматизированные системы управления устройствами электроснабжения железных дорог: Учебник [Текст] / В. С. Почаевец / УМЦ ЖДТ. – М., 2003. – 318 с.
2. Грибачев, О. В. Оперативное управление дистанцией электроснабжения железных дорог: Учебное пособие [Текст] / О. В. Грибачев / УМЦ ЖДТ. – М., 2005. – 184 с.
3. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации (на период до 2030 года) [Текст] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2013. – № 14. – С. 1738 – 1787.
4. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход [Текст]: Пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.
5. Крюков, А. В. Управление качеством электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, А. В. Черепанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – № 3(19). – 2014. – С. 65 – 73.
6. Пантелеев, В. И. Многоцелевая оптимизация и автоматизированное проектирование управления качеством электроснабжения в электроэнергетических системах: Монография [Текст] / В. И. Пантелеев, Л. Ф. Поддубных / Сибирский федеральный ун-т. – Красноярск, 2009. – 194 с.
7. ГОСТ Р МЭК 61850-2009. Сети и системы связи на подстанциях [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2009. – 36 с.
8. Сеславин, А. И. Исследование операций и методы оптимизации: Учебное пособие [Текст] / А. И. Сеславин, Е. А. Сеславина / УМЦ ЖДТ. – М., 2015. – 200 с.
9. Андреев, М. В. Всережимное математическое моделирование релейной защиты электроэнергетических систем: Монография [Текст] / М. В. Андреев, Н. Ю. Рубан, И. С. Гордиенко / Томский политехн. ун-т. – Томск, 2016. – 176 с.
10. Овчаренко, Н. И. Автоматика энергосистем: Учебник [Текст] / Н. И. Овчаренко; Под ред. А. Ф. Дьякова. – М: МЭИ, 2016. – 476 с.
11. Wu, H. B. Distributed cooperative voltage control based on curve-fitting in active distribution networks / H. B. Wu, C. Y. Huang, M. Ding, B. Zhao, P. Li // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017. – № 5(5). – P. 504 – 511.

12. Пантелеев, В. И. Оптимизация состояний систем электроснабжения предприятий с помощью генетических алгоритмов [Текст] / В. И. Пантелеев, А. Н. Туликов // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всерос. науч. конф. молодых ученых / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2006. – Ч. 3. – С. 175 – 179.

13. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2013. – 34 с.

14. Митрофанов, С. В. Моделирование в электроэнергетике: Учебное пособие [Текст] / С. В. Митрофанов, Л. А. Семенова / Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург, 2015. – 143 с.

References

1. Pochaevets V. S. *Avtomatizirovannyye sistemyi upravleniya ustroystvami elektrosnabzheniya zheleznih dorog* (Automated control systems for power supply devices for railways). Moscow: UMC ZDT Publ., 2003, 318 p.

2. Gribachev O. V. *Operativnoe upravlenie distantsiey elektrosnabzheniya zheleznih dorog* (Operational management of the distance of power supply of railways). Moscow: UMC ZDT Publ., 2005, 184 p.

3. *Strategiya razvitiya ehlektrosetevogo kompleksa Rossijskoj Federacii (na period do 2030 goda)* (Strategy of development of the power grid complex of the Russian Federation (for the period up to 2030), Moscow, Collection of Legislation of the Russian Federation, 2013, no. 14, pp. 1738 – 1787.

4. Russell S., Norvig P. *Iskusstvennyj intellekt: sovremennyy podhod* (Artificial intelligence: a modern approach). Moscow, Izdatelskij dom Vilyams, 2006. 1408 p.

5. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Cherepanov A. V. Electricity quality management in railroad power supply systems [Upravlenie kachestvom ehlektroehnergii v sistemah ehlektrosnabzheniya zheleznih dorog]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 3 (19), pp. 65 – 73.

6. Panteleev V. I., Poddubnykh L. F. *Mnogocелеvaya optimizatsiya i avtomatizirovannoe proektirovanie upravleniya kachestvom ehlektrosnabzheniya v ehlektroehnergeticheskikh sistemah* (Multi-purpose optimization and automated design of power quality management in electric power systems). Krasnoyarsk: SFU Publ., 2009, 194 p.

7. *Seti i sistemy svyazi na podstanciyah, Gost R 61850-2009.* (Networks and communication systems in substations, State Standart 61850-2009). Moscow, Standarty, 2009, 36 p.

8. Seslavin A. I., Seslavina E. A. *Issledovanie operacij i metody optimizacii* (Operations research and optimization methods). Moscow: UMC ZDT Publ., 2015, 200 p.

9. Andreev M. V., Ruban N. Yu., Gordienko I. S. *Vserezhimnoe matematicheskoe modelirovanie relejnoj zashchity ehlektroehnergeticheskikh sistem* (All-Mode Mathematical Modeling of Relay Protection of Electric Power Systems). Tomsk: TPU Publ., 2016, 176 p.

10. Ovcharenko N. I. *Avtomatika ehnergosistem* (Automation of power systems). Moscow: MEI Publ., 2016, 476 p.

11. Wu H. B., Huang C. Y., Ding M., Zhao B., Li P. Distributed cooperative voltage control based on curve-fitting in active distribution networks // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, no. 5(5), pp. 504 – 511.

12. Panteleev V. I., Tulikov A. N. Optimization of states of power supply systems for enterprises using genetic algorithms [Optimizatsiya sostoyanij sistem ehlektrosnabzheniya predpriyatij s pomoshch'yu geneticheskikh algoritmov]. *Materialy vserossijskoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh*. Novosibirsk, 2006, vol. 3, pp. 175 – 179.

13. *Elektricheskaya ehnergiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv ehlektromagnitnaya. Normy kachestva ehlektricheskoy ehnergii v sistemah ehlektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. GOST 32144-2013.* (Electric Energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems). Moscow, Standarty, 2013, 34 p.

14. Mitrofanov S. V., Semenova L. A. *Modelirovanie v ehlektroehnergetike* (Modeling in the electric power industry). Orenburg: OGU Publ., 2015, 143 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Третьяков Евгений Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

Галкин Александр Геннадьевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, ректор УрГУПС.

Тел.: (343) 221-24-44.

E-mail: rector@usurt.ru

Сидорова Елена Анатольевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, заведующая кафедрой «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: pmm@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Третьяков, Е. А. Перспективные методы управления транспортом и распределением электроэнергии в электрических сетях железных дорог [Текст] / Е. А. Третьяков, А. Г. Галкин, Е. А. Сидорова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 113 – 124.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tretyakov Evgeny Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

PhD in Physico-mathematical sciences, Associate Professor of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

Galkin Alexander G.

Ural state University of railway engineering (USGS).

66, Kolmogorov st., Ekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Doctor of technical Sciences, Professor, rector of Urgups.

Phone: (343) 221-24-44.

E-mail: rector@usurt.ru

Sidorova Elena Anatolievna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics» Omsk State Transport University.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: pmm@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tretyakov E. A., Galkin A. G., Sidorova E. A. Perspective methods of transport and distribution of electricity in electric networks of railways. The journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 2, no 34, pp. 113 – 124 (In Russian).

УДК 656.254:658.5(075.8)

Е. Ю. Копытов¹, Н. И. Степаненко², А. А. Любченко¹, А. А. Богданов¹

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

²Кузбасский РЦС Новосибирской дирекции связи ЦСС ОАО «РЖД», г. Кемерово, Российская Федерация

ПОДХОД К АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В РЕГИОНАЛЬНОМ ЦЕНТРЕ СВЯЗИ

Аннотация. Объекты железнодорожной электросвязи являются неотъемлемым комплексом технических средств, участвующих в организации безопасного и эффективного перевозочного процесса. Традиционно надежное функционирование средств связи обеспечивается путем проведения планового технического обслуживания, анализ качества которого выполняется по данным об инцидентах за прошедший отчетный период. Возможность экспериментальной оценки с помощью средств вычислительной техники несомненно имеет свои преимущества. В статье представлена задача разработки имитационной модели процесса эксплуатации устройств железнодорожной электросвязи с целью оценки коэффициента готовности и показателя качества обслуживания. Модель позволяет в автоматизированном режиме выполнять компьютерный эксперимент для вычисления средних значений указанных показателей с учетом следующих входных параметров модели: интенсивности отказов, периодичности и продолжительности обслуживания, времени восстановительного ремонта, вероятности ошибок персонала ремонтно-восстановительных бригад и вероятности отсутствия комплекта запасных частей.

Ключевые слова: техническое обслуживание, железнодорожная электросвязь, коэффициент готовности, имитационное моделирование, AnyLogic.

Evgeniy Y. Kopytov¹, Natalya I. Stepanenko², Alexander A. Lyubchenko¹,
Alexander A. Bogdanov¹

¹ Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

² Kuzbass regional communication center of Novosibirsk communication management office of CSS, JSC «RZD»,
Kemerovo, the Russian Federation

AN APPROACH FOR AUTOMATED QUALITY ESTIMATION OF PREVENTIVE MAINTENANCE IN REGIONAL COMMUNICATION CENTER

Abstract. Railway telecommunications are inherent facilities participating in the organization of efficient and safe transport process. Generally, reliable operation of telecommunication devices is provided by the implementation of preventive maintenance that quality analysis is performed on the incidents during the latest reporting period. The possibility of experimental estimation using computer techniques surely has advantages. In the paper, we have defined an objective of the development of a simulation model of the operation process of railway telecommunications so as to assess the inherent availability and maintenance quality indicator. The model allows carrying out a computer experiment and estimation of the abovementioned measures in an automated way taking into account the following input parameters: failure rates, periodicity and length of maintenance, time of repair, the probability of erroneous actions of service staff and the probability of spare and replacement parts lack.

Keywords: preventive maintenance, railway telecommunication, availability, simulation, AnyLogic

Объекты железнодорожной электросвязи предназначены для организации и выполнения технологических процессов железнодорожного транспорта. Структура и технологическое оснащение подразделений Центральной станции связи – филиала ОАО «РЖД» – должны обеспечивать выполнение необходимых работ по техническому обслуживанию объектов электросвязи. Ремонт объектов производится структурными подразделениями Центральной станции связи, специалистами, имеющими необходимые навыки для выполнения этих работ, а также средства механизации, средства измерений, оборудование и инвентарь.

Техническое обслуживание и ремонт объектов железнодорожной электросвязи, устройств линейно-аппаратного зала, пассажирской автоматики и вычислительной техники

осуществляются региональными центрами связи (РЦС), которые входят в состав дирекции связи, на территории которой расположены обслуживаемые участки железной дороги.

Эффективность работы региональных центров оценивается по показателю качества выполняемого технического обслуживания и коэффициенту готовности оборудования железнодорожной электросвязи, которые зависят от множества факторов эксплуатации и организации системы технического обслуживания (ТО).

В соответствии с докладом главного инженера Центральной станции связи ОАО «РЖД» Слюняева А. Н. «О стратегии развития систем диагностики и мониторинга объектов железнодорожной электросвязи до 2025 года» одними из целевых задач стратегии являются обеспечение требуемой готовности сетей технологической связи с коэффициентом готовности $K_r \geq 0,999$; обеспечение качества услуг технологической связи с интегральной оценкой не хуже 4,8 (по пятибалльной шкале); снижение удельных трудозатрат на эксплуатацию и техническое обслуживание технических средств связи не менее чем в два раза. Поэтому для правильной организации технической эксплуатации и, следовательно, обеспечения требуемых значений указанных показателей возможно использование автоматизированных средств, позволяющих дать оценку показателям в зависимости от различных параметров, характеризующих процесс обслуживания. В таком случае появляется возможность выбрать такие значения параметров, которые обеспечивают желаемый уровень показателей эффективности. Главное преимущество такого подхода использования автоматизированных средств заключается в том, что для оценки используются данные компьютерного моделирования, а не натурных экспериментов, что, несомненно, более привлекательно с точки зрения временных и материальных затрат.

Как показывает анализ литературы, проблема контроля качества технической эксплуатации технологического оборудования остается актуальной для всех хозяйств железнодорожного транспорта и в других отраслях. В работе [1] рассматривается подход к контролю качества и надежности при техническом обслуживании и ремонтах систем управления движением поездов на основе параметра потока отказов, тогда как вариант усовершенствованной методики оценки качества технической эксплуатации устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, основанной на балльной оценке, предложен в источнике [2]. Авторами работы [3] решение упомянутой задачи для парков транспортно-технологических машин дается с помощью эвристической модели восстановления, позволяющей оценивать предлагаемый в качестве меры качества обобщенный коэффициент надежности, основанный на коэффициентах готовности и технического использования. Показатели надежности восстанавливаемых систем широко используются при решении задачи оценки качества технического обслуживания и ремонта, в том числе для средств радиотехнического обеспечения полетов и электросвязи [4] и структурно-сложных территориально рассредоточенных систем связи [5].

Популярным сегодня методом анализа процессов и систем различных отраслей промышленности, в том числе и на транспорте, является имитационное или, в случае стохастических процессов, статистическое моделирование. В работах [6, 7] подчеркивается преимущество такого вида моделирования перед эмпирическим подходом для случая высоконадежных систем, когда из-за крайне редкого возникновения отказов невозможна оценка показателей надежности с приемлемой точностью. Как результат статистическое моделирование находит применение как при расчете надежности автотранспортных систем [7, 8], так и при оценке качества технического обслуживания и ремонта парков транспортно-технологических машин [3], при определении наиболее эффективных вариантов обслуживания транспортных потоков [9, 10], анализе пропускной способности железнодорожных линий [11, 12]. Данный вид моделирования применяется также как для анализа надежности структурно-сложных радиотехнических средств [13], так и для оценки надежности программного обеспечения [14].

Популярным сегодня отечественным инструментом имитационного моделирования является среда AnyLogic [15 – 19], обеспечивающая возможность визуальной разработки моде-

лей и объединяющая «все три современные парадигмы построения имитационных моделей» [20]. Среда AnyLogic используется для оценки комплексных показателей надежности элементов радиотехнических систем [17], моделирования процессов технического обслуживания железнодорожных радиостанций [21], прогнозирования надежности элементов информационных систем [18] и анализа эффективности компьютерных сетей [22, 23], а также для анализа показателей эксплуатационной работы железнодорожного узла [16] и моделирования расписания движения транспортных средств [19].

Таким образом, в данной статье рассматривается имитационная модель в среде AnyLogic, обеспечивающая автоматизированный расчет коэффициента готовности и показателя качества технического обслуживания оборудования железнодорожной электросвязи с целью анализа системы организации обслуживания в региональном центре связи – структурном подразделении дирекции связи.

Процесс эксплуатации и ТО оборудования железнодорожной электросвязи может быть представлен набором состояний и переходов между ними. В самом простом классическом случае такой процесс может быть представлен всего двумя состояниями: работоспособное состояние и состояние отказа. Данная модель хорошо изучена, и с ее использованием не составляет особого труда получить зависимости показателей надежности от времени [24]. Для модели двух состояний характерен лишь учет возможности возникновения внезапных отказов без уточнения причин их возникновения, а также других особенностей процесса, например, наличие системы регламентированного ТО, призванной обеспечить поддержание работоспособного состояния аппаратуры за счет предупреждения постепенных отказов. Следовательно, учет технического обслуживания устройств предполагает выделение отдельного состояния в исследуемом процессе. При этом рассматривается регламентированное ТО, выполняемое через запланированные интервалы времени в соответствии с технико-нормировочными картами.

В соответствии с инструкцией по техническому обслуживанию и ремонту объектов железнодорожной электросвязи ОАО «РЖД» от 26.10.2017 № 2185р основными видами работ при регламентированном ТО объектов электросвязи являются

- проверка и оценка технического состояния с помощью средств внутренней диагностики;
- измерение параметров, характеристик, настроек и приведение их к установленным технической документацией нормам;

- планово-профилактическая замена элементов на новые или отремонтированные и проверенные установленным порядком;

- осмотр, регулировка, чистка, замена некоторых составных частей оборудования, проверка крепления болтовых соединений, покраска, проверка исправного действия.

Указанные виды работы выполняются инженерно-техническим персоналом РЦС, главной характеристикой которого в предлагаемой модели является вероятность ошибочных действий при выполнении процедур технического обслуживания. Проведенные рядом авторов исследования показали, что при хорошей подготовке операторов и правильной организации эксплуатации радиоаппаратуры надежность ее в три – пять раз выше, чем при плохой организации и низкой подготовке операторов [24, 25]. По данным Петербургского государственного университета путей сообщения 58 % отказов оборудования автоматики и телемеханики происходит из-за ошибок персонала при проведении работ по техническому обслуживанию [26]. Результаты факторного анализа инцидентов в Кузбасском региональном центре связи за 2016 г. показывают, что около 20 % инцидентов происходит из-за нарушения инструкции, следовательно, учет такого фактора, как ошибки обслуживающего персонала, необходим при оценке и анализе показателей эффективности эксплуатации оборудования железнодорожной электросвязи.

Вероятность ошибочных действий (или ошибки) обслуживающего персонала E_{op} определяется как невыполнение поставленной задачи, которое может явиться причиной повреждения оборудования или имущества либо нарушения нормального хода запланированных операций по техническому обслуживанию. В модели принимается также допущение о том,

что эта же характеристика свойственна для персонала, занимающегося восстановительным ремонтом, вероятность ошибочных действий которого обозначается как Er .

Одним из основных условий ремонтпригодности аппаратуры является обеспечение ее необходимым комплектом элементов, используемых при восстановительных ремонтах аппаратуры. Комплект запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) должен содержать все необходимые в процессе эксплуатации элементы. Иногда отсутствие необходимых элементов в комплектах ЗИП намного увеличивает время восстановления.

Правильное комплектование ЗИПа, оптимизация его по стоимости являются важной проблемой при решении вопросов ремонтпригодности радиоэлектронной аппаратуры. При отказе аппаратуры ее неисправный элемент заменяют исправным из состава ЗИПа. Поэтому в ЗИПах некоторое время отсутствует этот элемент. Условимся время отсутствия необходимого элемента в комплекте запасных элементов называть временем восстановления элемента ЗИПа. Оно состоит из времени доставки элемента, времени замены его на складе или ремонта и времени ожидания замены или ремонта. В модели эксплуатации и ТО предлагается учитывать систему комплектования ЗИПа вероятностью отсутствия запасных элементов P_n и временем восстановления элемента ЗИПа для отказов и технологических нарушений различной категории.

Граф процесса эксплуатации и ТО аппаратуры, учитывающий возможные отказы оборудования из-за ошибок обслуживающего персонала и сотрудников, занятых восстановительным ремонтом, представлен на рисунке 1.

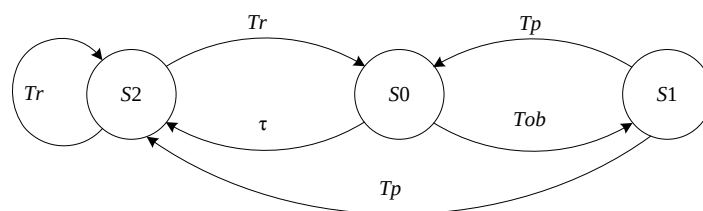


Рисунок 1 – Граф состояния процесса эксплуатации и ТО с учетом вероятностей $E_{ор}$ и Er

Граф состояний включает в себя работоспособное состояние (S_0), состояние отказа (S_2) и состояние технического обслуживания (S_1). Перед возникновением отказа устройство находится в состоянии S_0 случайное время τ , которое напрямую зависит от интенсивности возможных отказов компонентов и (или) блоков устройства. При этом рассматривается экспоненциальный закон надежности, предполагающий постоянство интенсивности отказов и преобладание внезапных отказов над постепенными. В случае возникновения отказа (перехода в состояние S_2) персоналом проводится восстановительный ремонт в течение времени Tr , по истечении которого система возвращается обратно в работоспособное состояние S_0 или остается в состоянии отказа, если персоналом, занимающимся восстановительным ремонтом, допущена ошибка. Если для поддержания работоспособности применяется регламентированное ТО и не произошло отказа, то через Tob – периодичность ТО – система перейдет в состояние S_1 , где обслуживающий персонал будет выполнять профилактические мероприятия в течение времени Tr , по истечении которого система перейдет в состояние S_0 или в состояние S_2 , если персоналом, занимающимся проведением ТО, будет допущена ошибка.

Показателем надежности, характеризующим вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, является коэффициент готовности K_r , вычисляемый по формуле:

$$K_r = \frac{TS_0}{TS_0 + TS_2}, \quad (1)$$

где TS_0 – время нахождения в работоспособном состоянии;

TS_2 – время нахождения в состоянии ремонта.

Таким образом, получив множество реализаций процесса (см. граф на рисунке), можно определить статистическое значение коэффициента готовности с течением времени, а также показателя качества технического обслуживания. При этом имитационное моделирование является более привлекательным, так как позволяет рассматривать такие значения входных параметров, для которых аналитическое решение тяжело реализуемо или невозможно. Следовательно, имея в наличии соответствующую имитационную модель, можно исследовать значения коэффициента готовности и показателя качества ТО в зависимости от входных параметров модели, характеризующих факторы эксплуатации.

С помощью инструмента имитационного моделирования AnyLogic была разработана статистическая модель, имитирующая поведение описанного ранее процесса эксплуатации и технического обслуживания устройств.

Модель является стохастической, так как учитываются случайность возникновения отказов и ошибочных действий персонала, наличие или отсутствие запасных элементов и непостоянство времени устранения отказов различных групп, распределенного по равномерному закону в заданном диапазоне.

Основными инструментами AnyLogic, использованными при построении модели, являются диаграмма состояний («стейтchart») и событие.

Диаграмма состояний позволяет графически задать пространство состояний алгоритма поведения объекта и события, которые являются причинами срабатывания переходов из одних состояний в другие, а также действия, происходящие при смене состояний. С помощью названной диаграммы можно графически задать дискретное поведение объектов любой сложности, куда более разнообразное, чем элементарные состояния свободен/занят, открыт/закрыт, исправен/неисправен, предлагаемые большинством блочных инструментов моделирования. Переходы между состояниями могут сработать в результате заданного в качестве условия перехода события – это может быть истечение заданного таймаута, получение сообщения, выполнение заданного логического условия.

Событие является самым простым способом планирования действий в модели и часто используется для моделирования задержек и таймаутов. Работа данного инструмента организуется тремя способами, в предлагаемой модели это реализуется циклическим срабатыванием через определенные промежутки времени.

Рассматриваемая модель имеет внешнюю автоматизированную базу данных на основе файла Microsoft Excel, в которую записываются все данные, необходимые для проведения анализа результатов эксперимента. В рабочей области модели строятся графики основных исследуемых зависимостей.

К входным параметрам модели относятся следующие:

- а) L – интенсивность отказов;
- б) Tob – периодичность технического обслуживания;
- в) Tr – время проверки оборудования во время технического обслуживания;
- г) Tr – время ремонта;
- д) kp – количество прогонов;
- е) $vrpr$ – время одного прогона (продолжительность моделирования);
- ж) Pn – вероятность отсутствия ЗИПа;
- з) $dopr$ – время ожидания поступления ЗИПа.

Выходные параметры модели:

- а) Kg – коэффициент готовности;
- б) B – удельное количество накопленных за месяц штрафных баллов;
- в) $TS0$ – общее время нахождения в работоспособном состоянии;
- г) $TS1$ – общее время нахождения в состоянии технического обслуживания;
- д) $TS2$ – общее время нахождения в состоянии ремонта.

В данной работе реализованы функция начисления штрафных баллов за отказы и система оценки качества исходя из начисленных баллов, основанная на Положении о показателе качества технического обслуживания средств связи от 20.08.2014 № ЦСС-767/р (далее – Положение...), согласно которому отказы по степени тяжести последствий подразделяются на три категории, а технологические нарушения – на две категории. За каждый отказ или технологическое нарушение начисляется определенное количество штрафных баллов, регламентированное Положением...

Количество штрафных баллов также зависит от задержек во времени при восстановлении работоспособности средств электросвязи и вычисляется по формуле:

$$B = B_0 + 0,5 \cdot B_0 (t_{\text{ф}} t_{\text{св}}) / t_{\text{св}}, \quad (2)$$

где B – итоговая балльная оценка;

B_0 – количество баллов за отказ или технологическое нарушение, регламентированное Положением...;

$t_{\text{ф}}$ – фактическое время восстановления работоспособности средств связи;

$t_{\text{св}}$ – среднесетевое время восстановления работоспособности средств связи, регламентированное Положением...

Значения таких параметров, как время ремонта, время технического обслуживания, время ожидания ЗИПа, генерируются случайным образом по нормальному закону распределения с заданными среднеквадратичным отклонением и математическим ожиданием. По итогам месяца определяется удельный показатель качества технического обслуживания средств связи B в расчете на каждые 100 технических единиц обслуживаемого оборудования по формуле:

$$B_y = \frac{B}{T_0} 100, \quad (3)$$

где B_y – удельный показатель качества технического обслуживания средств связи;

B – сумма баллов, начисленных за допущенные отказы технических средств связи и технологические нарушения;

T_0 – приведенная величина технических единиц обслуживаемых устройств.

Далее полученный удельный показатель интерпретируется соответствующей категорией качества: «отлично» – от 0 до 14,5; «хорошо» – свыше 14,5 до планируемого показателя; «удовлетворительно» – свыше планируемого показателя до 80 и «неудовлетворительно» – свыше 80.

Модель состоит из диаграммы трех состояний, связанных между собой переходами, совокупности входных и вспомогательных переменных. Используется также инструмент «Событие», отвечающее за сбор статистики и организацию нового прогона. Структура модели изображена на рисунке 2.

Каждый прогон начинается с работоспособного состояния (S_0), в котором происходит розыгрыш перехода в следующее состояние, основанный на экспоненциальном законе распределения. После розыгрыша случайного события открывается переход в состояние технического обслуживания (S_1) или ремонта (S_2), срабатывающий через определенный промежуток времени, задаваемый периодичностью технического обслуживания ($T_{\text{об}}$) или временем, через которое произойдет отказ (τ). После пребывания в неработоспособном состоянии (S_2) или состоянии технического обслуживания (S_1) срабатывает переход в работоспособное состояние (S_0), открываемый через время, определяемое временем ремонта (Tr) или проверки при техническом обслуживании (Tr), после чего цикл повторяется заново и так k раз, что соответствует задаваемому количеству прогонов.

После проведения эксперимента, выполнения kp прогонов вычисляются средние значения коэффициента готовности и показателя качества технического обслуживания, значения которых сохраняются автоматически в базе данных в виде файла data.xls.

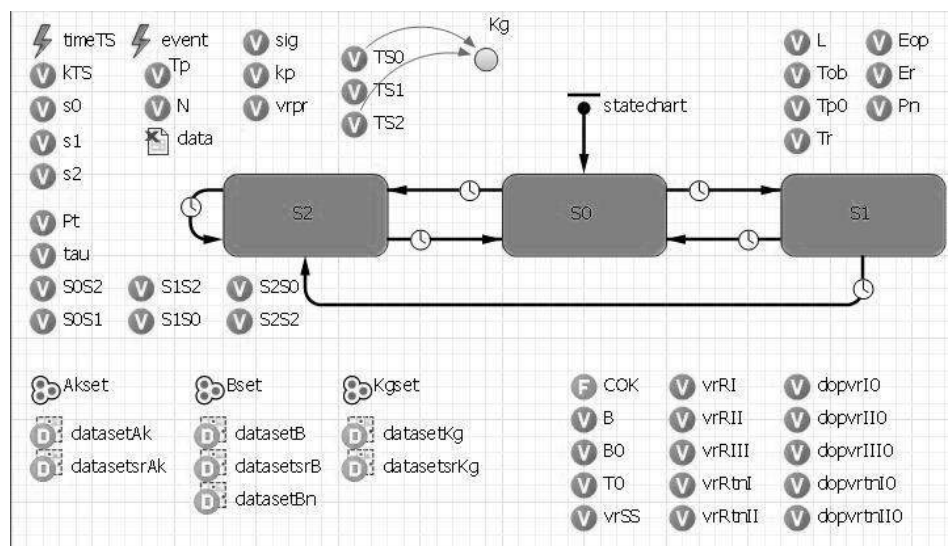


Рисунок 2 – Внешний вид структуры имитационной модели

Для оценки качества технического обслуживания в модели предусмотрена пользовательская функция «Система оценки качества» (СОК), выполняющая расчет на основе полученных в процесс моделирования статистических данных и правил Положения... При этом функция СОК учитывает, какую долю составляют отказы и технологические нарушения по всем категориям от их общего количества за период с 2014 по 2016 г. Следовательно, в модели было принято, что отказы первой категории составляют 3 %, второй – 1 %, третьей категории – 70 % и технологические нарушения первой и второй категорий – по 13 %.

Важно отметить, что модель является гибкой в настройке и позволяет вводить произвольные значения входных параметров, что дает возможность выполнять анализ их влияния на ключевые показатели эффективности эксплуатации оборудования железнодорожной электросвязи.

С целью анализа влияния входных параметров на коэффициент готовности K_T и показатель качества технического обслуживания B необходимо выполнение компьютерных экспериментов с предложенной моделью. Значения входных параметров модели по умолчанию приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения входных параметров по умолчанию

Параметр	Значение параметра
Интенсивность отказов L , 1/ч	0,00001
Периодичность технического обслуживания Tob , ч	2190
Время проверки при ТО, ч	1
Время устранения отказов и технологических нарушений каждой из групп $vrRI - vrRIII, vrRtnI, vrRtnII$, ч	4
Время ожидания ЗИПа при различных группах отказов и технологических нарушений $dopvrI0, dopvrII0, dopvrIII0, doptnI0, doptnII$, ч	24
Вероятность ошибки обслуживающего персонала Eop	0,0
Вероятность ошибки персонала при ремонте Er	0,0
Вероятность отсутствия ЗИПа Pn	0,0
Техническая оснащенность T_o , Т.Е.	278
Среднеквадратическое отклонение времени проверки и устранения отказов и технологических нарушений sig	0,15
Время одного прогона $vrpr$, лет	100
Количество прогонов kp	1000

В качестве входных изменяемых переменных модели были выбраны: интенсивность отказов L , продолжительность восстановительного ремонта Tr , влияющая непосредственно на время устранения отказов и технологических нарушений каждой из групп, вероятность ошибочных действий обслуживающего персонала Eop и вероятность отсутствия ЗИПа Pn . Значения перечисленных параметров для проведения экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения входных изменяемых переменных модели

Параметр	Значение параметра			
	эксперимент 1	эксперимент 2	эксперимент 3	эксперимент 4
Интенсивность отказов L , 1/ч	0,00001	0,00005	0,0001	0,0005
Время восстановления Tr , ч	4	8	12	16
Вероятность ошибки обслуживающего персонала Eop	0,0	0,2	0,4	0,6
Вероятность отсутствия ЗИПа Pn	0,0	0,2	0,4	0,6

Моделирование процесса эксплуатации и ТО носит стохастический (вероятностный) характер, поэтому каждый эксперимент выполняется 1000 прогонов с последующим вычислением средних значений коэффициента готовности и показателя качества ТО.

Зависимости коэффициента готовности K_r от времени при изменении интенсивности отказов L представлены на рисунке 3.

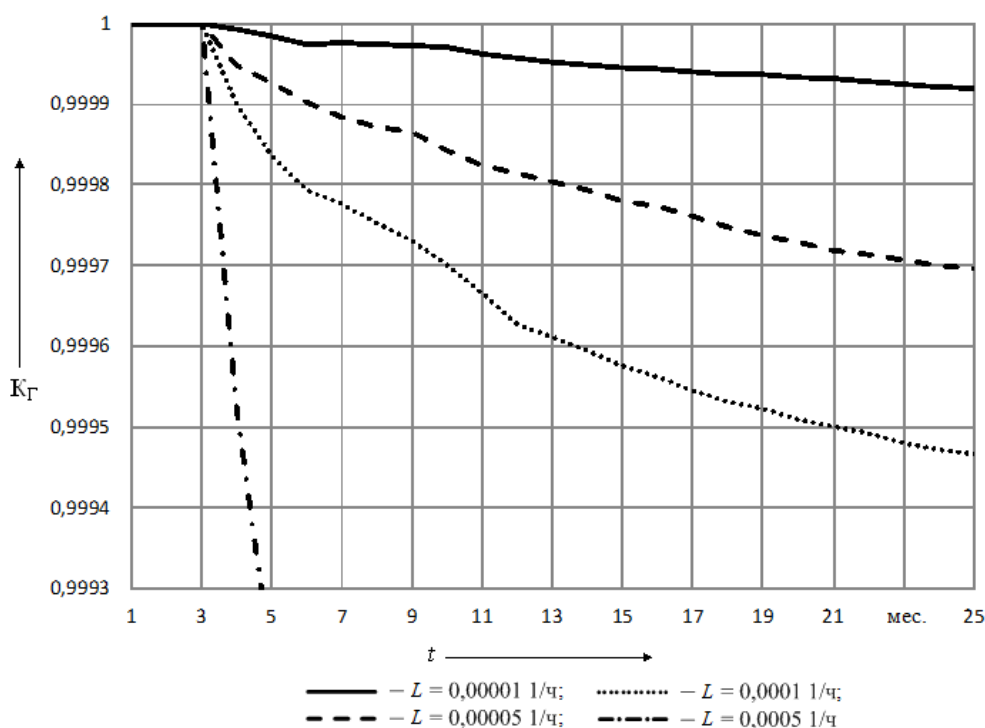


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента готовности от времени при изменении интенсивности отказов L

Графики зависимостей на рисунке 3 имеют нелинейный убывающий характер. В начальный момент времени оборудование находится в работоспособном состоянии, поэтому коэффициент готовности равен единице независимо от интенсивности отказов. С течением времени отмечается уменьшение значения коэффициента готовности с увеличением интенсивности отказов оборудования железнодорожной электросвязи, что говорит об адекватной реакции модели на входные воздействия. Следовательно, целесообразно эксплуатировать оборудование до того момента времени, пока значение коэффициента готовности отвечает установленным требованиям.

Линии тренда оценок показателя качества ТО от времени при изменении интенсивности отказов L показаны на рисунке 4.

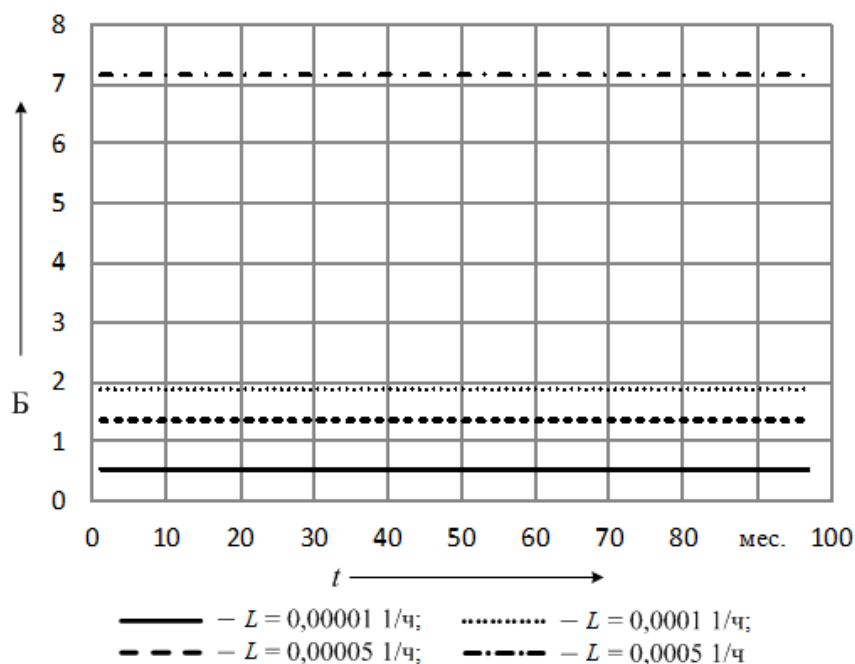


Рисунок 4 – Линии тренда оценок показателя качества ТО от времени при изменении интенсивности отказов L

На рисунке 5 представлены линии тренда для оценок показателя качества технического обслуживания Б от времени при изменении времени восстановления Tr .

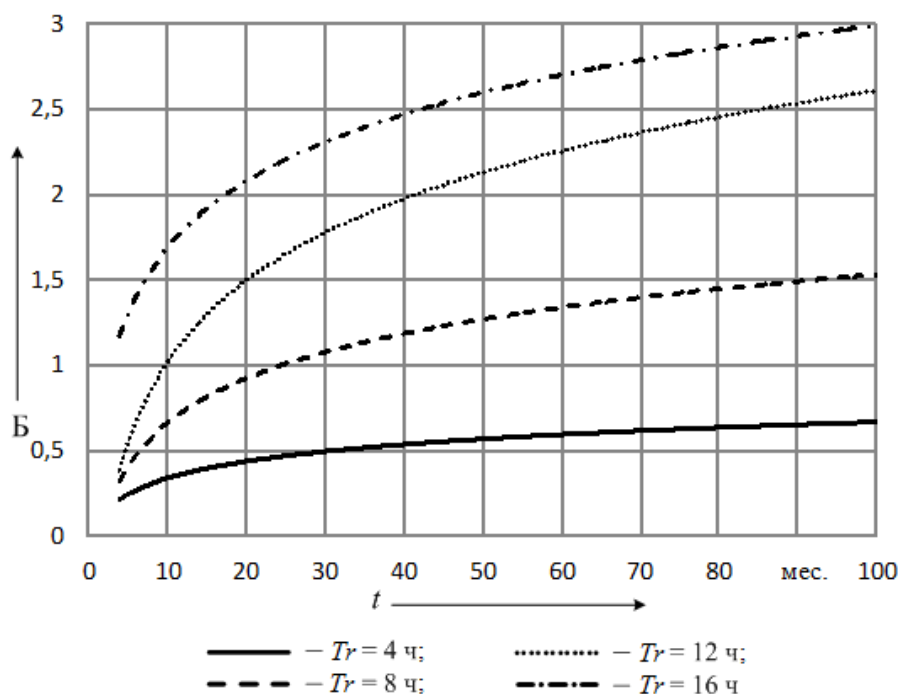


Рисунок 5 – Линии тренда оценок показателя качества ТО от времени при изменении времени восстановления Tr

Линии тренда оценки показателя качества технического обслуживания Б от времени при изменении вероятности ошибки обслуживающего персонала E_{op} изображены на рисунке 6.

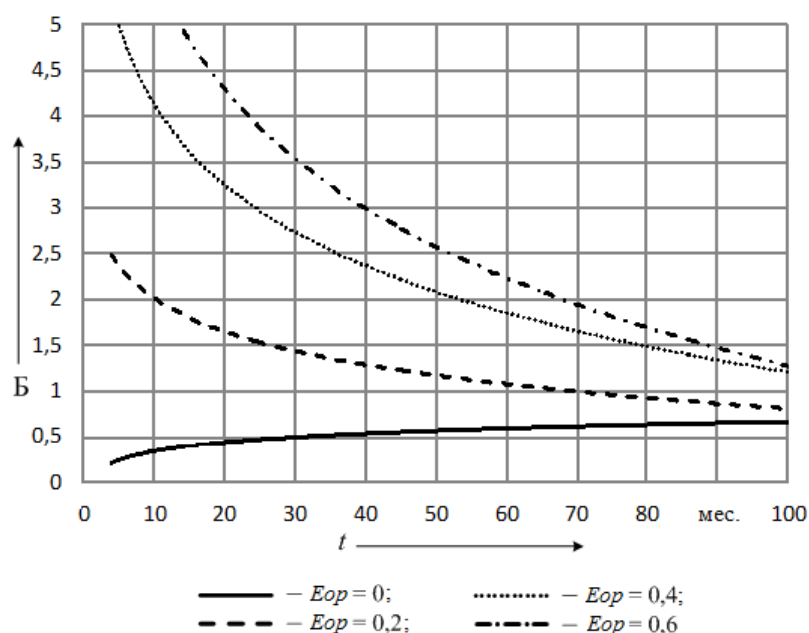


Рисунок 6 – Линии тренда оценок показателя качества ТО от времени при изменении вероятности ошибки обслуживающего персонала E_{op}

Линии тренда оценки показателя качества технического обслуживания Б от времени при изменении вероятности отсутствия ЗИПа P_n изображены на рисунке 7.

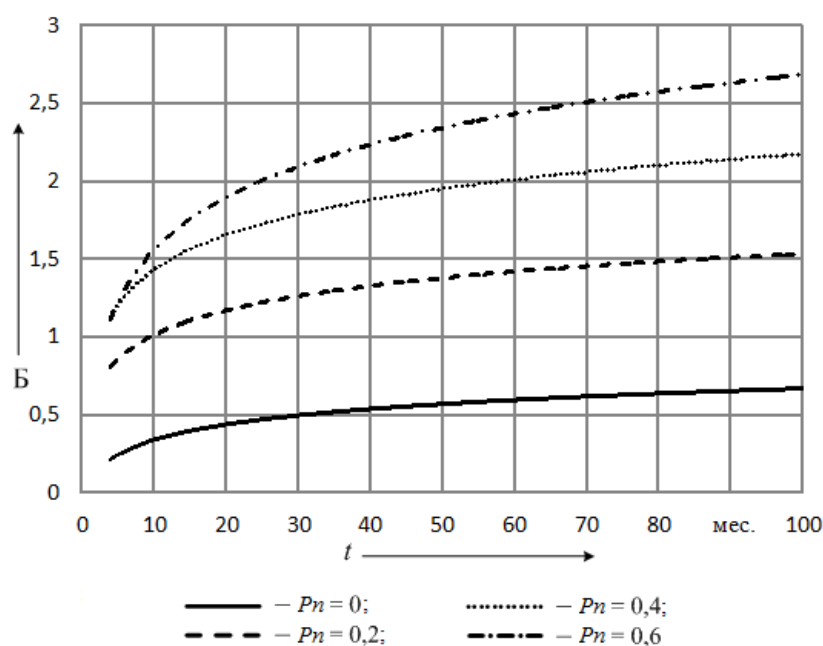


Рисунок 7 – Линии тренда оценок показателя качества ТО от времени при изменении вероятности отсутствия ЗИП P_n

Анализ данных моделирования, представленных на рисунке 4, показывает, что с ростом интенсивности отказов отмечается увеличение оценки показателя качества ТО, что соответствует правильной работе модели. При этом наибольший прирост Б получен для L , равной 0,0005 1/ч, тогда как для интенсивностей отказов от 0,00001 до 0,0001 1/ч прирост Б не превышает 0,8.

Результаты моделирования на рисунке 5 демонстрируют нелинейное увеличение оценок показателя качества Б от продолжительности восстановительного ремонта Tr . С увеличением вероятности ошибки обслуживающего персонала Eop отмечается также резкое увеличение показателя качества ТО, как это показано на рисунке 6. Однако с течением времени показатель качества Б нелинейно уменьшается, что свидетельствует об уменьшении влияния вероятности ошибки персонала на качество ТО с течением времени. Характер изменения показателя качества технического обслуживания Б от времени при изменении вероятности отсутствия ЗИПа Pn показан на рисунке 7. Экспериментальные кривые демонстрируют нелинейное возрастание показателя качества Б с течением времени, при этом наибольший прирост штрафных баллов происходит при $Pn = 0,2$ по всей оси времени.

Связь на железнодорожном транспорте стала неотъемлемой частью технологического процесса, от надежного ее функционирования зависят бесперебойность и эффективность перевозочного процесса.

По причине воздействия различных факторов окружающей среды, старения аппаратуры средствам электросвязи свойственны отказы. Для поддержания надежного функционирования и восстановления оборудования первичных сетей связи на сети железных дорог применяются различные виды технического обслуживания, реализуемые структурными подразделениями Центральной станции связи ОАО «РЖД» – региональными центрами связи. При этом планомерно осуществляется переход на более современные системы связи и технологии, что обусловлено необходимостью повышения качества предоставляемых услуг связи, заменой морально устаревшего оборудования и расширения функциональных возможностей. Таким образом, анализ производственной деятельности и организация технического обслуживания и ремонта в региональных центрах является важной задачей, от правильности выполнения которых в конечном счете зависит эффективность перевозочного процесса.

В данной работе предложена и апробирована в Кузбасском региональном центре связи имитационная модель, построенная в среде моделирования AnyLogic, позволяющая выполнить автоматизированный расчет коэффициента готовности и показателя качества технического обслуживания средств электросвязи в зависимости от влияющих факторов и тем самым дать оценку эффективности работы регионального центра связи.

Список литературы

1. Коваленко, В. Н. Контроль качества и надежности технического обслуживания и ремонтов [Текст] / В. Н. Коваленко, Д. Ю. Зайцев, Д. Г. Неволин // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2016. – № 3(50). – С. 43 – 47. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-43-47
2. Шагиахметов, Д. Р. Усовершенствование оценки качества технической эксплуатации устройств железнодорожной автоматики [Текст] / Д. Р. Шагиахметов, Т. О. Мусин // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева / Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – Алматы. – 2011. – № 4(71). – С. 60 – 66.
3. Манаков, А. Л. Имитационное моделирование функциональной системы для оценки качества технического обслуживания и ремонта парков транспортно-технологических машин [Текст] / А. Л. Манаков, В. В. Мойсеенко // Проблемы информатики / Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН. – Новосибирск. – 2010. – № 3. – С. 36 – 42.
4. Емельянов, В. Е. Оценка качества технического обслуживания средств РТОП и ЭС [Текст] / В. Е. Емельянов, С. Н. Смородский // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации / Московский гос. техн. ун-т гражданской авиации. – М. – 2015. – № 219(9). – С. 41 – 45.
5. Модель для расчета показателей качества функционирования системы технического обслуживания и ремонта сети связи [Текст] / В. Л. Витюк, В. Л. Гузенко др. // Фундаментальные исследования. – Пенза: Академия Естествознания. – 2015. – № 5-3. – С. 493 – 498.

6. Якубович, А. Н. Эффективный алгоритм численной реализации случайных величин в задачах статистического моделирования надежности технических систем [Текст] / А. Н. Якубович, И. А. Якубович // Интеллект. Инновации. Инвестиции / Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург. – 2016. – № 8. – С. 84 – 89.
7. Якубович, А. Н. Определение надежности автотранспортных систем и их элементов методами математического моделирования [Текст] / А. Н. Якубович, И. А. Якубович // Грузовик. – М.: Инновационное машиностроение. – 2016. – № 7. – С. 39 – 44.
8. Якубович, А. Н. Оценка надежности автотранспортных систем методами статистического моделирования (аналитический обзор) [Текст] / А. Н. Якубович, И. А. Якубович, В. И. Рассоха // Интеллект. Инновации. Инвестиции / Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург. – 2016. – № 1. – С. 89 – 94.
9. Имитационное моделирование вероятностных характеристик функционирования железнодорожной сети [Текст] / И. В. Максимей, Е. И. Сукач и др. // Математические машины и системы / Институт проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины. – Киев. – 2008. – № 4. – С. 147 – 153.
10. Сукач, Е. И. Автоматизация процесса исследования вариантов организации перемещения транспортных потоков в железнодорожной сети [Текст] / Е. И. Сукач // Математические машины и системы / Институт проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины. – Киев. – 2009. – № 4. – С. 161 – 168.
11. Кокурин, И. М. Оценка пропускной способности железнодорожных линий на основе имитационного моделирования процессов перевозок [Текст] / И. М. Кокурин, В. А. Кудрявцев // Известия Петербургского университета путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург. – 2012. – № 2(31). – С. 18 – 22.
12. Алексеев, С. И. Имитационно-анимационное моделирование основных технологических процессов мурманского транспортного узла [Текст] / С. И. Алексеев, В. В. Береженой, Р. И. Сорока // Евразийское пространство: приоритеты социально-экономического развития: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Евразийский открытый институт. – М., 2011. – С. 28 – 36.
13. Тихменев, А. Н. Прогнозирование надежности структурно-сложных радиоэлектронных средств методами имитационного моделирования [Текст] / А. Н. Тихменев, В. В. Жаднов // Качество. Инновации. Образование / Европейский центр по качеству. – М. – 2013. – № 3(94). – С. 50 – 56.
14. Оценка надежности программного обеспечения методами дискретно-событийного моделирования [Текст] / А. В. Чернов, А. Н. Гуда и др. // Программные продукты и системы / НИИ «Центрпрограммсистем». – Тверь. – 2015. – № 4. – С. 158 – 165. DOI: 10.15827/0236-235X.112.158-165
15. Якимов, И. М. Моделирование сложных систем в имитационной среде AnyLogic [Текст] / И. М. Якимов, А. П. Кирпичников, В. В. Мокшин // Вестник казанского технологического университета / Казанский технолог. ун-т. – Казань. – 2014. – Т. 17. – № 13. – С. 352 – 357.
16. Дискретно-событийная модель железнодорожного узла в среде AnyLogic [Текст] / А. А. Любченко, С. В. Бартош и др. // Динамика систем, механизмов и машин / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 87 – 92.
17. Любченко, А. А. Применение имитационного моделирования для определения вероятностных характеристик комплексных показателей надежности радиотехнических систем [Текст] / А. А. Любченко // Наука и современность / Центр развития научного сотрудничества. – Новосибирск. – 2010. – № 5-2. – С. 246 – 251.
18. Баран, В. И. Прогнозирование надежности элементов информационных систем с помощью инструментальных средств AnyLogic 7 [Текст] / В. И. Баран, Е. П. Баран // Вестник Российского университета кооперации / Российский университет кооперации. – Мытищи. – 2016. – № 1. – С. 8 – 10.
19. Merkurjeva, G. Vehicle schedule simulation with AnyLogic / G. Merkurjeva, V. Bolshakov // 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation. – 2010. IEEE. pp. 169-174. DOI: 10.1109/UKSIM.2010.38

20. Рахмангулов, А. Н. Особенности построения имитационной модели технологии работы железнодорожной станции в системе AnyLogic [Текст] / А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкuroв // Сборник научных трудов SWorld / Научный мир. – Иваново. – 2012. – Т. 4. – № 4. – С. 7 – 13.

21. Лутченко, С. С. Моделирование процессов технического обслуживания радиостанций в среде Anylogic [Текст] / С. С. Лутченко, Е. Ю. Копытов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 2. – С. 86 – 92.

22. Обухов, П. А. Разработка имитационных моделей в среде Anylogic для исследования эффективности работы компьютерных сетей [Текст] / П. А. Обухов, А. Б. Николаев // Автоматизация и управление в технических системах / Научно-инновационный центр. – Красноярск. – 2014. – № 4(12). – С. 71 – 81.

23. Попов, А. А. Оптимизация структуры компьютерной сети средствами имитационного моделирования в среде Anylogic [Текст] / А. А. Попов, М. М. Яблокова // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти. – 2016. – № 6-2. – С. 181 – 190.

24. Острейковский, В. А. Теория надежности: Учебник [Текст] / В. А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.

25. Шибанов, Г. П. Количественная оценка деятельности человека в системах «человек – техника» [Текст] / Г. П. Шибанов. – М.: Машиностроение, 1983. – 263 с.

26. Шаманов, В. И. Надежность систем железнодорожной автоматики и телемеханики: Учебное пособие [Текст] / В. И. Шаманов / Иркутский ин-т инж. трансп. – Иркутск, 1999. – 223 с.

References

1. Kovalenko V. N., Zaytsev D. Y., Nevolin D. G. Quality and reliability control for maintenance and repair [Kontrol' kachestva i nadezhnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remontov]. *Ural State University of Railway Transport (USURT)*, 2016, no. 3(50), pp. 43 – 47. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-43-47

2. Shagiakhmetov D. R. Improvement of quality estimation of technical operation of railway automation devices [Usovershenstvovanie otsenki kachestva tekhnicheskoy ehkspluatatsii ustroystv zheleznodorozhnoj avtomatiki]. *The Bulletin of KazATC*, 2011, no. 4(71), pp. 60 – 66.

3. Manakov A. L. Functional system simulation for quality estimation of preventive maintenance and repair of transport machine fleets [Imitatsionnoe modelirovanie funktsional'noj sistemy dlya otsenki kachestva tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta parkov transportno-tekhnologicheskikh mashin]. *Problems of Informatics*, 2010, no. 3, pp. 36 – 42.

4. Emelyanov V. E., Smorodskiy S. N. Quality assessment maintenance of FRTS and ES [Ocenka kachestva tekhnicheskogo obsluzhivaniya sredstv RTOP i EHS]. *Civil Aviation High TECHNOLOGIES*, 2015, no 219(9), pp. 41 – 45.

5. Vityuk V. L., Guzenko V. L., Mironov E. A., Sevastiyarov D. A., Shestopalova O. L. Model for calculating parameters of functioning quality of repair and maintenance of communications network [Model' dlya rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovaniya sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta seti svyazi]. *Fundamental research*, 2015, no 5-3, pp. 493 – 498.

6. Yakubovich A. N., Yakubovich I. A. Efficient algorithm for numerical implementation of random variables in statistical modeling of technical systems reliability [Effektivnyj algoritm chislennoj realizatsii sluchajnykh velichin v zadachakh statisticheskogo modelirovaniya nadezhnosti tekhnicheskikh sistem]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*, 2016, no. 8, pp. 84 – 89.

7. Yakubovich A. N., Yakubovich I. A. The determination of the reliability of transport systems and their elements using mathematical modelling [Opredelenie nadezhnosti avtotransportnykh sistem i ikh ehlementov metodami matematicheskogo modelirovaniya]. *Gruzovik*, 2016, no. 7, pp. 39 – 44.

8. Yakubovich A. N., Yakubovich I. A., Rassokha V. I. Reliability evaluation of transport systems by statistical modeling methods (analytical review) [Otsenka nadezhnosti avtotransportnykh sistem metodami statisticheskogo modelirovaniya (analiticheskij obzor)]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*, 2016, no. 1, pp. 89 – 94.

9. Maksimey I. V., Sukach E. I., Giruts P. V., Erofeeva E. A. Simulation Modeling of probabilistic characteristic of railway network operation [Imitatsionnoe modelirovanie veroyatnostnykh kharakteristik funktsionirovaniya zheleznodorozhnoj seti]. *Mathematical machines and systems*, 2008, no. 4, pp. 147 – 153.

10. Sukach E. I. Automatization of research processes of organization variants for transport flows movement of railroad network [Avtomatizatsiya protsessa issledovaniya variantov organizatsii peremeshheniya transportnykh potokov v zheleznodorozhnoj seti]. *Mathematical machines and systems*, 2009, no. 4, pp. 161 – 168.

11. Kokurin I. M., Kudryavtsev V. A. Estimation of Railway Line Capacity Based on Imitation Modeling the Transportation Processes [Otsenka propusknoj sposobnosti zheleznodorozhnykh linij na osnove imitatsionnogo modelirovaniya protsessov perevozok]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2012, no. 2(31), pp. 18 – 22.

12. Alekseev S. I., Berezhnoy V. V., Soroka R. I. Imitated-animated simulation of the basic technological processes the Murmansk transport hub [Imitacionno-animacionnoe modelirovanie osnovnykh tehnologicheskikh protsessov murmanskogo transportnogo uzla]. *Evrazijskoe prostranstvo: priority social'no-jekonomicheskogo razvitiya*. Moscow, 2011. Vol. I, pp. 28 – 36.

13. Tikhmenev A. N., Zhadnov V. V. Reliability prediction structural-difficult electronic devices by methods of imitating modeling [Prognozirovanie nadezhnosti strukturno-slozhnykh radioelektronnykh sredstv metodami imitatsionnogo modelirovaniya]. *Quality. Innovation. Education*, 2013, no. 3, pp. 50 – 56.

14. Chernov A. V., Guda A.N., Chubeyko S.V., Butakova M.A. Software reliability evaluation by discrete-event simulation methods [Otsenka nadezhnosti programmnogo obespecheniya metodami diskretno-sobytiynogo modelirovaniya]. *Programmnye Produkty i Sistemy*, 2015, no. 4, pp. 158 –165, DOI: 10.15827/0236-235X.112.158-165

15. Yakimov I. M., Kirpichnikov A. P., Mokshin V. V. Modelling of complex systems with simulation instrument AnyLogic [Modelirovanie slozhnykh sistem v imitacionnoj srede AnyLogic]. *Herald of Kazan Technological University*. 2014, vol. 17, no. 13, pp. 352 – 357.

16. Lyubchenko A.A., Bartosh S.V., Smirnov V.A., Castillo P.A. A discrete-event simulation model of railway junction in AnyLogic [Diskretno-sobytiynaja model' zheleznodorozhnogo uzla v srede AnyLogic]. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 87 – 92.

17. Lyubchenko A. A. Application of simulation for determination of probabilistic features of integrated reliability indices of radio systems [Primenenie imitacionnogo modelirovaniya dlya opredeleniya veroyatnostnykh kharakteristik kompleksnykh pokazatelej radiotekhnicheskikh sistem]. *Nauka i sovremennost'*, 2010, Vol. II, pp. 246 – 251.

18. Baran V.I., Baran E.P. Forecasting the reliability of elements of information systems using Anylogic 7 tools [Prognozirovanie nadezhnosti ehlementov informatsionnykh sistem s pomoshh'yu instrumental'nykh sredstv AnyLogic 7]. *Vestnik of the Russian University of Cooperation*, 2016, no. 1, pp. 8 – 10.

19. Merkuryeva G., Bolshakovs V. Vehicle schedule simulation with AnyLogic. *12th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, 2010, pp. 169 – 174. DOI: 10.1109/UKSIM.2010.38

20. Rakhmangulov A. N., Mishkurov P. N. Special aspects of railroad station working method simulation model development within AnyLogic system [Osobennosti postroeniya imitatsionnoj modeli tekhnologii raboty zheleznodorozhnoj stantsii v sisteme AnyLogic]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 7 – 13.

21. Lutchenko S. S., Kopytov E.Y. Simulation processes maintenance radio stations in environment Anylogic [Modelirovanie protsessov tekhnicheskogo obsluzhivaniya radiostantsij v srede Anylogic]. *Izvestiya Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 2, pp. 86 – 92.

22. Obukhov P. A., Nikolaev A. B. Development of Simulation Models in Anylogic Software for the Study of the Efficiency of Computer Networks [Razrabotka imitatsionnykh modelej v srede Anylogic dlya issledovaniya ehffektivnosti raboty komp'yuternykh setej]. *Automation and Control in Technical Systems*, 2014, no. 4(12), pp. 71 – 81.

23. Popov A.A., Yablokova M.M. Optimization of computer network structure using AnyLogic simulation [Optimizatsiya struktury komp'yuternoj seti sredstvami imitatsionnogo modelirovaniya v srede Anylogic]. *Information technologies. Radioelectronics. Telecommunications*, 2016, no. 6-2, pp. 181 – 190.

24. Ostrejkovskij V. A. *Teoriya nadezhnosti* (Reliability theory). Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 463 p.

25. Shibanov G. P. *Kolichestvennaya otsenka deyatel'nosti cheloveka v sistemakh chelovek-tekhnika* (Quantifying of human activity in man-machine systems). Moscow: Mashinostroenie, 1983, 263 p.

26. Shamanov V. I. *Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki* (Reliability of rail transport automatics and telemechanics). Irkutsk, 1999, 223 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Копытов Евгений Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-16-72.

E-mail: e.u.kopytov@gmail.com

Степаненко Наталья Ивановна

Кузбасский РЦС Новосибирской дирекции связи ЦСС ОАО «РЖД».

Кузнецкий пр., д. 75, г. Кемерово, 650025, Российская Федерация.

Старший электромеханик.

Тел.: +7 (904) 966-59-76.

Любченко Александр Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (960) 998-97-04.

E-mail: allyubchenko@gmail.com

Богданов Александр Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студент Института автоматизации, телекоммуникаций и информационных технологий, ОмГУПС.

Тел.: +7 (950) 338-99-11.

E-mail: Alex-b0g@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Копытов, Е. Ю. Подход к автоматизированной оценке качества технического обслуживания в региональном центре связи [Текст] / Е. Ю. Копытов, Н. И. Степаненко, А. А. Любченко, А. А. Богданов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 125 – 139.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kopytov Evgeniy Yurevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Engineering Sciences, associate professor, Department of Telecommunications, radio system and networks, OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-16-72.

E-mail: e.u.kopytov@gmail.com

Stepanenko Natalya Ivanovna

Kuzbass regional communication center of Novosibirsk communication management office of CSS, JSC «RZD».

75, Kuznetsky st., Kemerovo, 650025, the Russian Federation.

Senior electrician engineer.

Phone: +7 (904) 966-59-76.

Lyubchenko Alexander Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Engineering Sciences, associate professor, Department of Telecommunications, radio system and networks, OSTU.

Phone: +7 (960) 998-97-04.

E-mail: allyubchenko@gmail.com

Bogdanov Alexander Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

A student of the Institute of Automation, Telecommunications and Information Technology, OSTU.

Phone: +7 (950) 338-99-11

E-mail: Alex-b0g@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kopytov E. Y., Stepanenko N. I., Lyubchenko A. A., Bogdanov A. A. An approach for automated quality estimation of preventive maintenance in regional communication center. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 2, no 34, pp. 125 – 139 (In Russian).

Н. М. Арипов, Ш. Ш. Камалетдинов

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ), г. Ташкент,
Республика Узбекистан

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМПОЗИТНОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА В ГРУЗОВЫХ И КОММЕРЧЕСКИХ РАБОТАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН НА ОСНОВЕ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. В статье представлена сетевая модель процессов планирования и учета перевозок, а также процессов оформления документации при отправлении грузов во внутриреспубликанском сообщении железных дорог Узбекистана посредством композитного документооборота. Композитный документооборот предусматривает движения документов в бумажных и в электронных носителях, а также их композитные решения. Специальная автоматизированная система (АС) будет поддерживать процессы электронного документооборота и составлять отчетность в автоматизированном режиме. Для математического моделирования процесса документооборота в этой работе используются методы сетевого планирования и управления. Описаны характеристики предлагаемой технологии планирования и учета перевозок, а также оформления перевозочных документов при отправлении груза во внутриреспубликанском сообщении. Применен метод ПЕРТ для вычисления случайных временных характеристик работ. Определены временные характеристики событий по методу критического пути. Составлены таблицы, представляющие последовательность работ с указанием оптимистической, вероятностной и пессимистической оценки продолжительности выполнения, а также с результатами расчетов для определения среднего времени и дисперсии. Составлен сетевой график работ в соответствии с технологией документооборота, с помощью которого оценены сроки выполнения работ, входящих в процесс документооборота. Определена продолжительность критических и не критических путей. Приведенные в статье результаты подтверждают эффективность предлагаемой технологии документооборота. С применением данной технологии, предусматривающей заполнение документов в электронной форме и фиксацией с электронной цифровой подписью (ЭЦП), ожидается снизить затраты времени грузоотправителей и железной дороги, повысить производительность работ и качество предоставляемых услуг, создать централизованную информационную базу.

Ключевые слова: моделирование процессов, композитный документооборот, грузовые и коммерческие работы железных дорог, сетевое моделирование, методы сетевого планирования и управления, сетевой график, метод Перт, электронная цифровая подпись, критический путь, планирование перевозок.

Nazirzhon M. Aripov, Shokhrukh. Sh. Kamaletdinov

Tashkent Railway Engineering Institute (TashREI), Tashkent, Republic of Uzbekistan

MODELING OF PROCESSES OF COMPOSITE DOCUMENT MANAGEMENT IN CARGO AND COMMERCIAL WORKS OF THE RAILROADS OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN WITH METHODS OF NETWORK PLANNING AND MANAGEMENT

Abstract. In the article presents the network model of processes of planning and the accounting of transportations, and also processes of execution of documentation at freight dispatch in the intra republican message of the railroads of Uzbekistan by means of composite document management. Composite document management provides the movements of documents in paper and in electronic medium, and also their composite decisions. The special the automated system (AS) will support processes of electronic document management and to make the reporting in the automated mode. For mathematical modeling of process of document management in this work it is used methods of network planning and management. It is described characteristics of the offered technology of planning and the accounting of transportations, and also execution of carriage documents at freight dispatch in the intra republican. It is applied, the PERT method for calculation of accidental temporary characteristics of works. Temporary characteristics of events are determined by a method of a critical way. Tables with the sequence of works with the indication of optimistic, probabilistic and pessimistic assessment of duration of performance, and also with results of calculations for determination of average time and dispersion are made. The network schedule of works, in compliance of technology of document management by means of which terms of performance of work are evaluated, entering document management process is made. Durations of critical and noncritical ways are determined. The results received in article confirm efficiency of the offered

technology of document management. Use of this technology providing filling of documents electronically and fixing with the digital signature (DS), it is expected to lower expenses of time of consignors and the railroad, to increase productivity of works and quality of the provided services, to create the centralized information base.

Keywords: modeling of processes, composite document management, cargo and commercial works of the railroads, network modeling, methods of network planning and management, network schedule, Perth method, digital signature, critical way, planning of transportations.

Электронный документооборот применяется в разных отраслях производства для повышения производительности технологических процессов. На железнодорожном транспорте технология грузовых и коммерческих работ является сложной составляющей деятельности персонала. Причиной этому служат взаимоотношения грузоотправителей с железной дорогой посредством юридически значимых документов определенных форм.

В статье рассматривается вопрос моделирования процессов планирования и учета перевозок, а также процессов оформления документации при отправлении грузов во внутриреспубликанском сообщении железных дорог Узбекистана посредством композитного документооборота.

Различные аспекты применения и моделирования процессов электронного документооборота рассмотрены в статьях М. Ю. Круковского [1], а на железнодорожном транспорте – П. Е. Булавского и Д. С. Маркова [2], Н. М. Арипова и Д. Х. Баратова [4]. В указанных статьях в основном используется теория графов для моделирования процессов документооборота. В работе П. Е. Булавского и Д. С. Маркова [3] для определения временных характеристик использован аппарат динамических вероятностных нагруженных графов. Применение методов сетевого планирования и управления в процессах бизнеса отражены в работах Е. В. Буценко [5].

Вопросы совершенствования технологий грузовых и коммерческих работ рассмотрены в работах И. А. Еловой [6] и М. М. Колоса [7]. В данных работах подробно описаны существующие недостатки документооборота и приведены рекомендации по улучшению качества работ с помощью автоматизированных систем.

Для математического моделирования процесса документооборота в этой статье приводятся методы сетевого планирования и управления, которые позволяют определить оптимальное время в зависимости от способа оформления документов. Представлен процесс формирования сетевой модели, включающий в себя определение последовательности действий при взаимодействии грузоотправителя с работниками железной дороги в грузовом и коммерческом отношении. Построен сетевой график работ, характеризующий специфику моделируемого процесса. Вычислены критический путь и минимальное время для рассматриваемых процессов.

Предлагаемая технология планирования перевозок и оформления документов во внутриреспубликанском сообщении предусматривает применение принципов электронного документооборота, и полученные результаты с помощью методов сетевого планирования и управления подтверждают эффективность этой технологии.

Статистические данные, необходимые для исследования, собраны с предприятий и структурных подразделений железной дороги, проводились оценка и анализ продолжительности технологических работ.

Процедуру формирования сетевой модели, соответствующей рассматриваемому процессу композитного документооборота, представим в виде следующих основных этапов.

1. Описание предлагаемой технологии процесса планирования и учета перевозок, а также оформления документации при отправлении грузов во внутриреспубликанском сообщении.

2. Составление таблиц последовательности проведения работ с указанием оптимистической, вероятностной и пессимистической оценки продолжительности выполнения. Применение метода ПЕРТ [9] для вычисления случайных временных характеристик. Расчет ожидаемого времени и дисперсии. Определение временных характеристик событий по методу критического пути.

3. Составляется сетевой график работ в соответствии с технологией документооборота.

4. С помощью сетевого графика оценивается срок выполнения каждой работы, входящей в процесс, определяется продолжительность критического и некритических путей.

Следует отметить, в предлагаемой технологии документооборота используется электронная цифровая подпись, чтобы документы имели юридическую силу. ЭЦП одновременно будет служить как фиксатор времени выполнения работ.

Планирование перевозок осуществляется на основе заявок грузоотправителей. Заявки на перевозку грузов ГУ-12 и графики подачи вагонов формы ГУ-11 в бумажной форме и в виде электронных юридически значимых документов, подписанных ЭЦП, подаются грузоотправителями посредством автоматизированной системы (АС). При подаче заявки в электронной форме справка о наличии денег на счету у клиента железной дороги не требуется. Необходимая общая информация о клиенте будет доступна в режиме реального времени. Основные и дополнительные заявки автоматически переносятся в специальную базу учета заявок на перевозку, доступ к которой будет предоставлен только лицам, участвующим в согласовании.

В отличие от старой технологии грузоотправитель не будет контролировать состояние заявки – результаты согласования, несогласования или частичного согласования заявок на перевозку грузов с указанием причин передаются в АС, которая будет оповещать грузоотправителя. В случае согласования перевозки грузоотправитель формирует графики подачи вагонов формы ГУ-11.

Графики подачи вагонов формы ГУ-11 формируются грузоотправителем в электронной форме и рассматриваются начальником станции. После подписания графика подачи вагонов начальником станции с ЭЦП информация из графика может быть перенесена в учетную карточку.

Результат выполнения запланированных объемов перевозок как по месячному, так и по дополнительному плану фиксируется в учетной карточке, которая отображается в АС и подписывается грузоотправителем.

После окончания планирования и учета перевозок рассмотрим технологию композитного документооборота в процессе заполнения перевозочных документов.

Подача порожних вагонов под погрузку осуществляется на основании ежесуточных планов в соответствии с графиками подачи вагонов и контейнеров формы ГУ-11.

Уведомление отправителей о предстоящей подаче вагонов под погрузку производится станцией не позднее чем за 2 часа до подачи с указанием номеров вагонов и предполагаемого времени подачи. Время передачи уведомления регистрируется в АС в книге уведомлений формы ГУ-2, которая заполняется автоматически и распечатывается каждые отчетные сутки.

При наличии ЭЦП у грузоотправителя памятка заполняется в электронном виде представлением времени выполнения погрузочных и выгрузочных работ. В противном случае процесс выполняется вручную.

Сообщение 1397 о подаче вагона отправляется приемосдатчиком после фактической подачи вагона. С помощью ЭЦП время завершения грузовой операции проставляется грузоотправителем в памятке приемосдатчика и подписывается. Приемосдатчик железной дороги получает информацию с АС для дальнейшего оформления.

По завершении приемосдаточных операций представитель грузоотправителя соответствующим образом расписывается в памятке ГУ-45, которая передается в товарную контору.

После уборки вагонов в памятке проставляется время уборки. Приемосдатчик станции составляет сообщение 1397 об уборке. Памятка распечатывается для передачи в товарную контору и составления ведомости подачи-уборки формы ГУ-46. Затем заполняется накопительная карточка ФДУ-92, где ведется расчет дополнительных сборов за предоставленные услуги.

По окончании приемосдаточных работ грузоотправитель заполняет накладную с помощью АС на основании сведений согласованной заявки формы ГУ-12 и подписывает ее своей ЭЦП. Товарный кассир получает уведомление о заполненных накладных посредством АС с

указанием информации о номере и изменении статуса документа или телефонного уведомления от грузоотправителя.

При правильном заполнении накладная подписывается грузоотправителем, затем загружается в систему и приобретает юридическую силу. Накладная дополняется данными, которые будут вестись товарным кассиром. Товарный кассир проставляет тарифные отметки, проверяет информацию о грузе, о вагоне, рассчитывает провозную плату, присваивает номер грузу и сохраняет его. Товарный кассир подписывает сообщение 410 с ЭЦП и отправляет его.

Грузоотправитель получает уведомление о готовой накладной и подписывается в корешке дорожной ведомости о получении квитанции о приеме груза.

С помощью АС приемосдатчик станции на основании сведений накладной формирует вагонный лист. Товарный кассир распечатывает корешок дорожной ведомости для дальнейшей передачи в ТехПД.

Следует отметить, вышеуказанная технология описывает только часть композитного документооборота, а именно ведение документов по принципам электронного документооборота (с применением ЭЦП). Подробная связь работ и переключения внутри композитного документооборота представлены в сетевой модели.

Сетевое планирование и управление (СПУ) представляет собой систему методов, с помощью которых производится планирование и управление разработкой и осуществлением крупных хозяйственных комплексов, научной и технологической подготовкой технологических процессов и т. п.

Для того чтобы составить план работ по осуществлению технологических процессов электронного документооборота, необходимо описать его с помощью сетевой модели. В источнике [8] даны основные определения и описания свойств методов сетевого планирования и управления для построения сетевой модели.

Математической основой методов сетевого планирования и управления является представление технологического процесса в виде сетевого графика, который отражает последовательность и временные характеристики работ и событий.

Исходным материалом для сетевого графика служит список работ, логически связанные между собой и имеющих определенную последовательность. В моделируемых процессах работы будут выполняться несколькими участниками. Некоторые работы имеют одинаковую цель, но будут выполняться разными способами. Так как на продолжительность работ, выполняемых в процессах планирования, учета перевозок и оформления перевозочных документов во внутриреспубликанском сообщении, влияют несколько факторов, а также учитывая, что данная технология предусматривает применение электронного документооборота, а раньше она не использовалась в данном направлении на железных дорогах Республики Узбекистан, определение точного завершения событий очень сложно.

Для определения продолжительности работ со случайной длительностью в системе сетевого планирования и управления существует метод ПЕРТ.

Применение метода ПЕРТ описано в работе [9]. Метод ПЕРТ предполагает, что длительность операций имеют β -распределение. Предположение о β -распределении продолжительности работы (i, j) позволяет получить следующие оценки ее числовых характеристик:

$$t_{ij} = \frac{1}{6} [a_{ij} + 4m_{ij} + b_{ij}]; \quad (1)$$

$$\sigma_{ij}^2 = \left(\frac{b_{ij} - a_{ij}}{6} \right)^2, \quad (2)$$

где a_{ij} – оптимистическая оценка времени; m_{ij} – наиболее вероятная оценка времени; b_{ij} – пессимистическая оценка времени.

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Располагая, таким образом, для каждой операции данными о среднем значении t_{ij} и σ_{ij}^2 дисперсии длительности операции, мы применяем для определения средних сроков наступления событий и критического пути метод, описанный в работе (9), приписывая каждой дуге среднее значение t_{ij} длительности работ. Результаты расчетов приведены в таблицах 1 – 4.

Таблица 1 – Планирование и учет перевозок без использования АС

Выполняемая работа	Участники процесса, выполняющие работы	Параметры				
		a_{ij}	m_{ij}	b_{ij}	t_{ij}	σ_{ij}^2
Получение от ТехПД справки	Грузоотправитель	15	30	120	43	306,2
Приехать на станцию и сдать заявки на перевозку	Грузоотправитель	20	30	60	33	44,44
Согласование в зависимости от груза. Подпись	Начальник станции	5	10	15	10	2,78
Приехать на станцию и формировать график подачи	Грузоотправитель	30	40	60	42	25,0
Согласование графика подачи вагонов	Начальник станции	5	7	9	7	0,44
Ведение учетной карточки	Товарный кассир	3	5	8	5	0,69
Подписание учетной карточки	Грузоотправитель	1	2	3	2	0,11

Таблица 2 – Планирование и учет перевозок с использованием АС

Выполняемая работа	Участники процесса, выполняющие работы	Параметры				
		a_{ij}	m_{ij}	b_{ij}	t_{ij}	σ_{ij}^2
Оформление заявки на перевозку	Грузоотправитель	5	7	15	8	2,78
Согласование в зависимости от груза	Начальник станции	2	3	5	3	0,25
Формирование графика подачи	Грузоотправитель	2	5	7	5	0,69
Согласование графика подачи вагонов	Начальник станции	5	7	9	7	0,44
Ведение учетной карточки	Товарный кассир	1	2	3	2	0,11
Подписание учетной карточки	Грузоотправитель	1	2	2	2	0,03

Таблица 3 – Оформление документаций при отправлении грузов во внутриверхотранспортном сообщении без АС

Выполняемая работа	Участники процесса, выполняющие работы	Параметры				
		a_{ij}	m_{ij}	b_{ij}	t_{ij}	σ_{ij}^2
1	2	3	4	5	6	7
Уведомление, запись в Книгу уведомлений о времени подачи ГУ-2	Приемосдатчик	2	5	15	6	4,69
Заполнение памятки приемосдатчика. Подпись в памятке приемосдатчика ГУ-45 (после приема вагонов в коммерческом отношении)	Приемосдатчик	2	3	5	3	0,25
Подпись в памятке приемосдатчика ГУ-45 (после приема вагонов в коммерческом отношении)	Грузоотправитель	0,3	2	2	2	0,08
Отправка сообщения 1397 о подаче (после подачи вагонов)	Приемосдатчик	3	7	10	7	1,36
Уведомление об окончании погрузки	Грузоотправитель	1	3	5	3	0,44
Запись в Книгу уведомлений о завершении грузовой операции ГУ-2а (после погрузки вагона)	Приемосдатчик	1	2	5	2	0,44
Проставление в памятке приемосдатчика времени уведомления об окончании грузовых операций и подпись (после приема вагонов в коммерческом отношении)	Приемосдатчик	1	2	3	2	0,11
Подпись в памятке приемосдатчика ГУ-45	Грузоотправитель	1	2	3	2	0,11
Подпись в памятке приемосдатчика ГУ-45	Приемосдатчик	1	2	3	2	0,11
Отправка сообщения 1397 об уборке (после уборки вагона)	Приемосдатчик	3	7	10	7	1,36
Проставление в памятке времени уборки ГУ-45	Приемосдатчик	0,5	1	1,5	1	0,03

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
Формирование ведомости подачи и уборки вагонов, 3 экз. ГУ-46 (после передачи памяток приемосдатчика запись в Книгу передачи грузовых документов ГУ-45, ГУ-48)	Товарный кассир	7	10	15	10	1,78
Составление накопительной карточки за пользование вагонами, за подачу-уборку, за маневровые операции, печать 3 экз. ФДУ-92	Товарный кассир	10	20	30	20	11,1 1
Приехать на ствнию и поставить подпись на ведомости подачи и уборки, накопительных карточках ГУ-46, ФДУ-92	Грузоотправитель	20	30	60	33	44,4 4
Создание заготовки накладной САПОД	Грузоотправитель	15	25	30	24	6,25
Таксировка	Товарный кассир	10	15	18	15	1,78
Присвоение номера отправки и отправка сообщения 410	Товарный кассир	1	2	3	2	0,11
Подписание накладной с проставлением в ней фамилии грузоотправителя, ответственного за правильность внесенных сведений	Товарный кассир	3	5	10	6	1,36
Формирование вагонного листа	Приемосдатчик	2	5	7	5	0,69
Передача квитанции о приеме груза	Товарный кассир-	1	2	3	2	0,11

Таблица 4 – Оформление документации при отправлении грузов во внутривосударственном сообщении с АС

Выполняемая работа	Участники процесса, выполняющие работы	Параметры				
		a_{ij}	m_{ij}	b_{ij}	t_{ij}	σ_{ij}^2
1	2	3	4	5	6	7
Уведомление, запись в Книгу уведомлений о времени подачи ГУ-2	Приемосдатчик	1	2	2	2	0,03
Заполнение памятки приемосдатчика. Подпись в памятке приемосдатчика ГУ-45	Приемосдатчик	2	3	3	3	0,03
Подпись в памятке приемосдатчика ГУ-45 (после приема вагонов в коммерческом отношении)	Грузоотправитель	1	2	2	2	0,03
Сообщение 1397 о подаче (после подачи вагонов)	Приемосдатчик	3	7	10	7	1,36
Предварительное уведомление об окончании погрузки (после погрузки вагона)	Грузоотправитель	1	1	1	1	0,00
Проставление в памятке приемосдатчика времени уведомления об окончании грузовых операций, подпись ГУ-45 (после приема вагонов в коммерческом отношении)	Приемосдатчик	0,3	0,5	1	1	0,01
Подпись ЭЦП памятки приемосдатчика ГУ-45	Грузоотправитель	0,3	0,5	1	1	0,01
Отправка сообщения 1397 об уборке (после уборки вагона)	Приемосдатчик	2	3	5	3	0,25
Проставление в памятке времени уборки ГУ-45	Приемосдатчик	0,5	1	1,5	1	0,03
Формирование ведомости подачи и уборки вагонов, печать 3 экз. ГУ-46 (после передачи памяток приемосдатчика, запись в Книгу передачи грузовых документов ГУ-45, ГУ-48)	Товарный кассир	0,5	1	1	1	0,01
Составление накопительной карточки за пользование вагонами, за подачу-уборку, за маневровые операции, печать 3 экз. ФДУ-92	Товарный кассир	2	3	4	3	0,11
Подпись представителем грузоотправителя ведомостей подачи и уборки, накопительных карточек ГУ-46 ФДУ-92	Грузоотправитель	1	2	3	2	0,11
Создание заготовки накладной САПОД	Грузоотправитель	5	8	15	9	2,78
Получение заготовки накладной по АС	Товарный кассир	0,3	0,5	1	1	0,01
Проверка правильности заполнения накладной и комплекта перевозочных документов	Товарный кассир	1	2	3	2	0,11

Окончание таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7
Загрузка накладной в систему линейного уровня	Товарный кассир	0,1	0,2	0,3	0,2	0,00
Таксировка и подтверждение ЭЦП правильности внесенных сведений	Товарный кассир	2	5	6	5	0,44
Присвоение номера отправки и отправка сообщения 410	Товарный кассир	1	2	3	2	0,11
Подписание корешка дорожной ведомости	Грузоотправитель	0,2	0,3	0,5	0,2	0,00
Формирование вагонного листа	Приемосдатчик	2	3	4	3	0,11
Получение квитанции о приеме груза	Грузоотправитель	0,5	1	2	1	0,06

В работе [10] представлено описание метода критического пути для нахождения времени событий в сетевом графике.

В верхних частях кругов расположены номера событий (N), в левых – ранние сроки начала событий ($t_p(i)$), в правых – поздние сроки завершения событий ($t_n(i)$), внизу – резерв времени для исполнения работы ($R(i)$) (рисунок 1).

Результаты расчетов зафиксируем на сетевых графиках рисунков 2, 3. Критические пути сетевых графиков можно определить по событиям, у которых отсутствуют резервы времени.

Определив ранний срок наступления завершающего события сети, мы тем самым определяем длину критического пути, а выявив события с нулевыми резервами времени, определяем его топологию.

Понятие критического пути в рассматриваемых процессах означает последовательность событий с самым продолжительным временем. Критический путь в обоих сетевых графиках определен в работах с бумажной технологией. Анализируя все пути в сетевых графиках, можно заметить, что минимальные не критические пути определены в событиях с использованием безбумажной технологии. Выбираем минимальный путь среди не критических путей и сравним его с критическим путем.

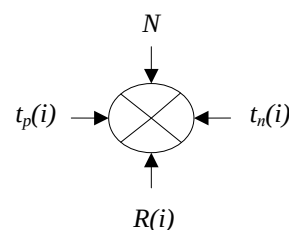


Рисунок 1 –
Расположение
параметров сетевой
модели на графике

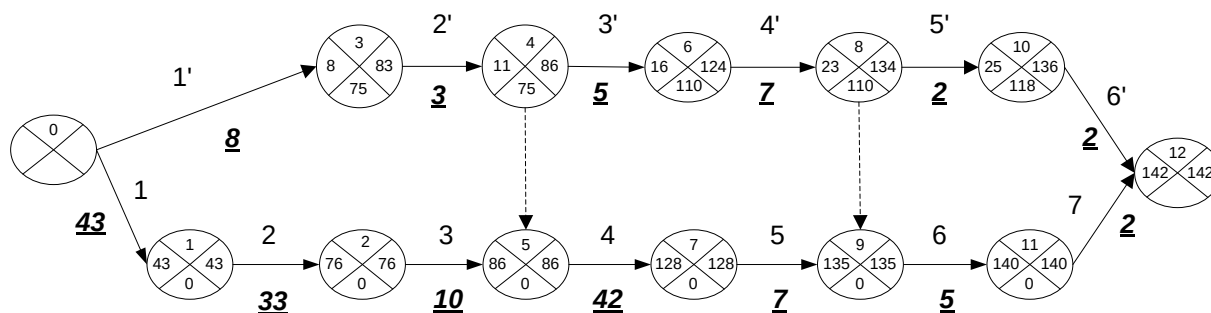


Рисунок 2 – Сетевой график документооборота при планировании и учете перевозок

Применение технологии электронного документооборота в процессе планирования и учета перевозок во внутриреспубликанском сообщении позволило сэкономить время на 115 мин (рисунок 4), а в процессе оформления перевозочных документов и станционной коммерческой отчетности – на 103,6 мин (рисунок 5).

Таким образом, в данной статье рассмотрены вопросы моделирования процессов композитного документооборота с применением технологии электронного документооборота методом сетевого моделирования для подробного представления преимуществ предлагаемой технологии.

В предлагаемой технологии композитного документооборота для обеспечения электронного документооборота предусматривается использование АС как инструмента для заполнения документов посредством электронной цифровой подписи, что позволит перевести ряд технологических процессов на новый уровень. Заполнением документов в электронной

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

форме с ЭЦП достигается зеркальное отражение выполняемых коммерческих работ с сохранением информации в единой базе.

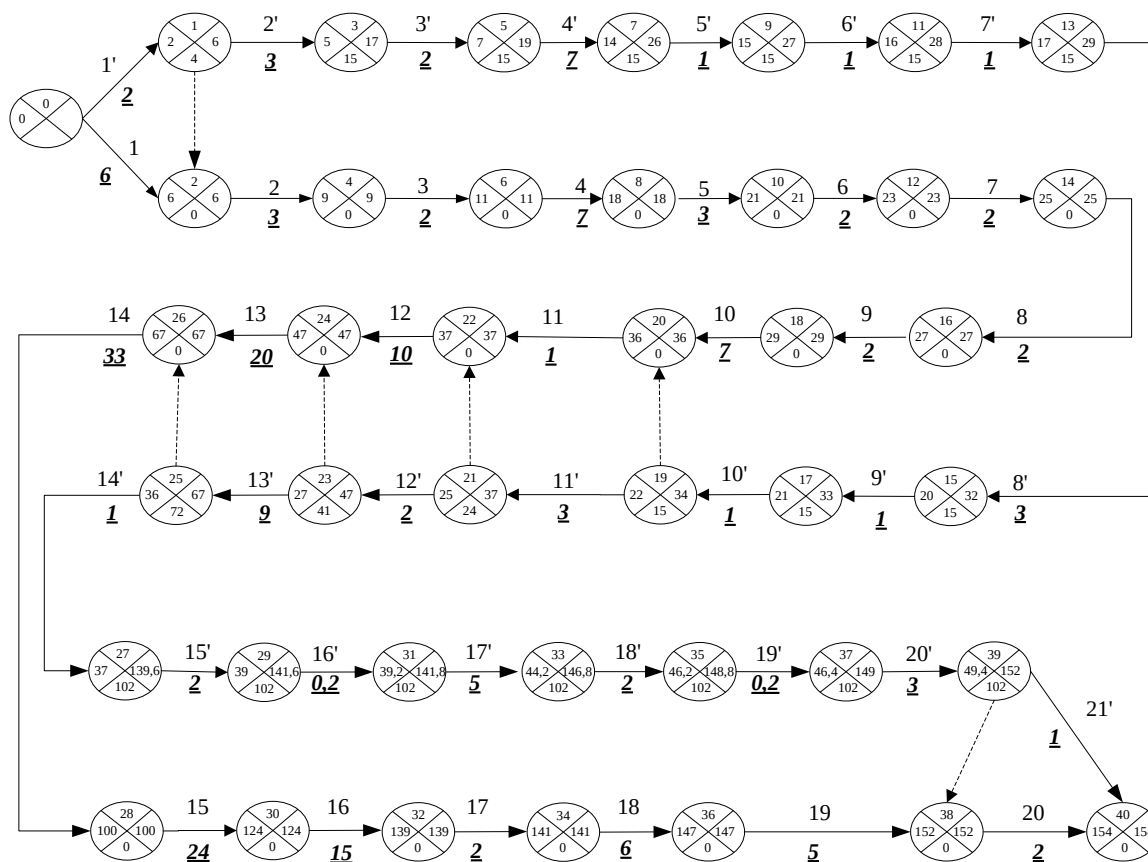


Рисунок 3 – Сетевой график документооборота при оформлении перевозочных документов и станционной коммерческой отчетности

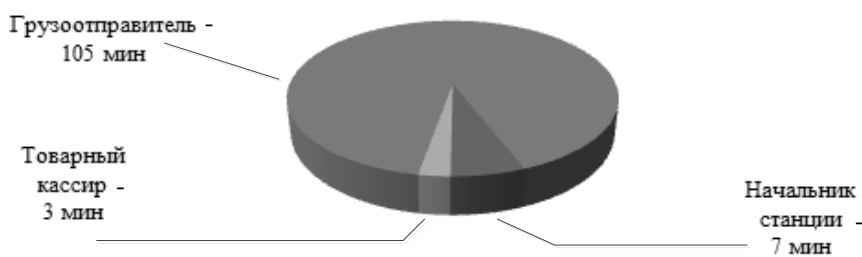


Рисунок 4 – Экономия времени при планировании и учете перевозок

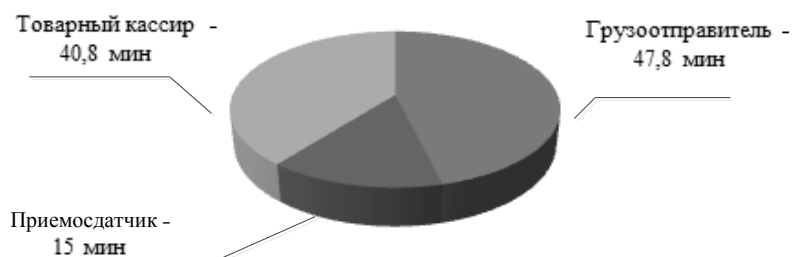


Рисунок 5 – Экономия времени при оформлении документации при отправлении грузов

По результатам исследования применения данной технологии ожидается снижение затрат времени грузоотправителей и железной дороги, повышение производительности работ и качества предоставляемых услуг, создание централизованной информационной базы.

Список литературы

1. Круковский, М. Ю. Графовая модель композитного документооборота [Текст] / М. Ю. Круковский // Математичні машини і системи / Институт проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины. – Киев, 2005. – №1. – С. 120 – 136.
2. Булавский, П. Е. Электронный документооборот технической документации [Текст] / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика, связь, информатика / Российские железные дороги. – М., 2012. – № 2. – С. 2 – 4.
3. Булавский, П. Е. Методика оценки временных характеристик процессов электронного документооборота технической документации [Текст] / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика на транспорте / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – СПб. – 2016. – №1. – С. 81 – 94.
4. Арипов, Н. М. Методика построения математической модели электронного документооборота технической документации железнодорожной автоматики [Текст] / Н. М. Арипов, Д. Х. Баратов // Автоматика на транспорте / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – СПб. – 2017. – №1. – С. 98 – 111.
5. Буценко, Е. В. Реализация сетевого экономико-математического моделирования для процесса бизнес-планирования [Текст] / Е. В. Буценко, А. Ф. Шориков // Вестник УРФУ. Сер. Экономика и управление / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург. – 2015. – № 6. – С. 935 – 953.
6. Организация грузовых перевозок с использованием электронных документов: Научная монография [Текст] / И. А. Еловой, Ж. И. Котова и др. / Белорусский гос. ун-т транспорта – Гомель, 2017. – 170 с.
7. Колос, М. М. Совершенствование технологии работы белорусской железной дороги в условиях применения электронных документов [Текст] / М. М. Колос, М. А. Гончар // Наука та прогресс транспорту / Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна. – Днепропетровск. – 2016 – № 4. – С. 24 – 36.
8. Плескунов, М. А. Задачи сетевого планирования: Учебное пособие [Текст] / М. А. Плескунов / Уральский гос. ун-т. – Екатеринбург, 2014. – 92 с.
9. Кофман, А. Сетевые методы планирования: Применение системы ПЕРТ и ее разновидностей при управлении производственными и науч.-исслед. проектами [Текст]: / А. Кофман, Г. Дебазей. – М.: Прогресс, 1968. – 181 с.
10. Исследование операций в экономике: Учебное пособие [Текст] / Н. Ш. Кремер, Б. А. Путко и др. – М.: Юнити, 2005. – 407 с.

References

1. Krukovskij M. Yu. Graph model of composite [Grafovaya model' kompozitnogo dokumentooborota]. *Matematichni mashini i sistemi*, 2005, no. 1, pp.120 – 136.
2. Bulavskij P. E., Markov D. S. Electronic document management of technical documentation [Elektronnyj dokumentooborot tekhnicheskoy dokumentacii]. *Avtomatika, svyaz', informatika*, 2012, no. 2, pp. 2 – 4.
3. Bulavskij P. E., Markov D. S. The method of estimation of time characteristics of electronic technical document management processes [Metodika ocenki vremennyh harakteristik processov elektronnoho dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentacii]. *Avtomatika na transporte*, 2016, no. 1, pp. 81 – 94.
4. Aripov N. M., Baratov D. H. Methods of building the mathematical mode of electronic document management of technical documentation for railway automation [Metodika postroeniya ma-

tematicheskoy modeli elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii zheleznodorozhnoy avtomatiki]. *Avtomatika na transporte*, 2017, no. 1, pp. 98 – 111.

5. Bucenko E. V., Shorikov A. F. Implementation of network economic-mathematical modeling for business planning process [Realizatsiya setevogo ekonomiko-matematicheskogo modelirovaniya dlya processa biznes-planirovaniya]. *Vestnik URFU. Seriya: Ekonomika i upravlenie*, 2015, no.6, pp. 935 – 953.

6. Elovoy I. A., Kotova Zh. I., Kolos M. M., Gonchar M. A. *Organizatsiya gruzovykh perevozok s ispol'zovaniem elektronnykh dokumentov* (The organization of freight transportation with use of electronic documents): monograph, Gomel, 2017, 170 p.

7. Kolos M. M., Gonchar M. A. Improving the technology of Belorussian railway in conditions of electronic documents usage [Sovershenstvovanie tekhnologii raboty belorusskoy zheleznoy dorogi v usloviyakh primeneniya elektronnykh dokumentov]. *Nauka ta progress transport*, 2016, no. 4, pp. 24 – 36.

8. Pleskunov M. A. *Zadachi setevogo planirovaniya* (Problems of network planning): Uchebnoe posobie. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2014, 92 p.

9. Kofman A., Debazej G. *Setevye metody planirovaniya* (Network planning methods): Primenenie sistemy PERT i ee raznovidnostey pri upravlenii proizvod. i nauch.-issled. proektami. Moscow: Progress Publ., 1968, 181 p.

10. Kremer N. Sh., Putko B. A., Trishin I. M., Fridman M. N. *Issledovanie operatsiy v ekonomike* (Operations research in economy), Moscow: YuNITI Publ., 2005, 407 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Арипов Назиржон Мукарамович

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

Адылходжаева ул., д. 1, Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», ТашИИТ.

Тел.: +99890 933-10-93.

E-mail: aripov1110@gmail.com

Камалетдинов Шохрух Шухратович

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

Адылходжаева ул., д. 1, Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Докторант (PhD) кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», ТашИИТ

Тел.: +99893 583-45-69.

E-mail: shaxr2107@bk.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Арипов, Н. М. Моделирование процессов композитного документооборота в грузовых и коммерческих работах железных дорог Республики Узбекистан на основе сетевого планирования и управления [Текст] / Н. М. Арипов, Ш. Ш. Камалетдинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 140 – 149.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aripov Nazirzhon Mukaramovich

Tashkent railway engineering institute (TashREI).

1, Adylhodzhaev st., Tashkent, 100167, the Republic of Uzbekistan.

Dr. Sci. Tech., Professor, head of the department of the department «Automatic Equipment and Telemechanics on a Rail Transport», TashREI.

Phone: +99890 933-10-93.

E-mail: aripov1110@gmail.com

Kamaletdinov Shokhrux Shukhratovich

Tashkent railway engineering institute (TashREI).

1, Adylhodzhaev st., Tashkent, 100167, the Republic of Uzbekistan.

Doctoral candidate (PhD) of the department of the department « Automatic Equipment and Telemechanics on a Rail Transport», TashREI.

Phone: +99893 586-45-69.

E-mail: shaxr2107@bk.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Aripov N. M., Kamaletdinov Sh. Sh. Modeling of processes of composite document management in cargo and commercial works of the railroads of the republic of uzbekistan with methods of network planning and management, Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 2, no 34, pp. 140 – 149 (In Russian).

М. М. Соколов

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

ПОСТРОЕНИЕ УСЛОВНОГО АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТАНЦИОННЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ТОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

Аннотация. В статье рассматриваются возможность применения условного алгоритма диагностирования применительно к конкретной задаче поиска повреждения в станционной тональной рельсовой цепи. Целью работы является обоснование возможности применения алгоритмов диагностирования для снижения времени поиска и устранения повреждений. Показан порядок составления алгоритма диагностирования, рассчитаны условные вероятности, диагностические веса, частные и общие диагностические ценности. На основании проведенных вычислений составлен условный алгоритм диагностирования тональной рельсовой цепи. Выделены преимущества условного алгоритма диагностирования по отношению к безусловному алгоритму. Результаты, полученные в статье, могут быть использованы при техническом обслуживании систем автоматизации действующих железных дорог.

Ключевые слова: рельсовая цепь, путевого приемник, генератор, диагностирование, алгоритм диагностирования, диагноз, диагностический признак

Maxim M. Sokolov

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

CONSTRUCTION OF CONDITIONAL ALGORITHM FOR DIAGNOSTICS OF TONAL RAIL CIRCUITS ON STATION

Abstract. The article deals with the possibility of applying a conditional diagnostic algorithm, applied to a specific problem of searching for damage in a station's tonal track circuit. The aim of the work is to substantiate the possibility of applying diagnostic algorithms, in order to reduce the time of search and repair of damages. The order of compiling the diagnostic algorithm is shown, conditional probabilities, diagnostic weights, private and general diagnostic values are calculated. On the basis of the calculations performed, a conditional algorithm for diagnosing the tonal track circuit was compiled. The advantages of the conditional diagnostic algorithm in relation to the unconditional algorithm are demonstrated. The results obtained in the article can be used for technical maintenance of automation systems of operating railways.

Keywords: track circuit, a track receiver, a generator, diagnosing, diagnosis algorithm, diagnostic indication

Согласно «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» одними из целевых параметров ее реализации являются внедрение рельсовых цепей тональной частоты (ТРЦ) с цифровой обработкой информации и разработка принципиально новых комплексных систем диагностики и мониторинга объектов инфраструктуры.

Задачей, на которую направлено совершенствование технологии устранения повреждений в устройствах железнодорожной автоматики, является снижение времени устранения этих повреждений с целью минимизации времени простоя или времени нарушения условий безопасности движения поездов. Снижение времени устранения повреждения может быть достигнуто за счет оптимизации процесса локализации отказа (поиска места повреждения) путем применения оптимальной последовательности проверок и правил обработки их результатов (алгоритмов диагностирования) [1 – 3].

Выделяют три основных вида алгоритмов диагностирования: безусловный с безусловной остановкой, безусловный с условной остановкой и условный с условной остановкой [4]. Построение безусловного алгоритма диагностирования для схемы ТРЦ (рисунок 1) показано в работе [1]. В данной статье рассмотрим возможность применения более сложного, но и более эффективного условного алгоритма диагностирования с условной остановкой применительно к задаче поиска места повреждения в устройствах СЦБ.

В качестве объекта исследования продолжаем рассматривать станционную тональную рельсовую цепь приемоотправочного пути, упрощенная схема которой представлена на рисунке 1 [5].

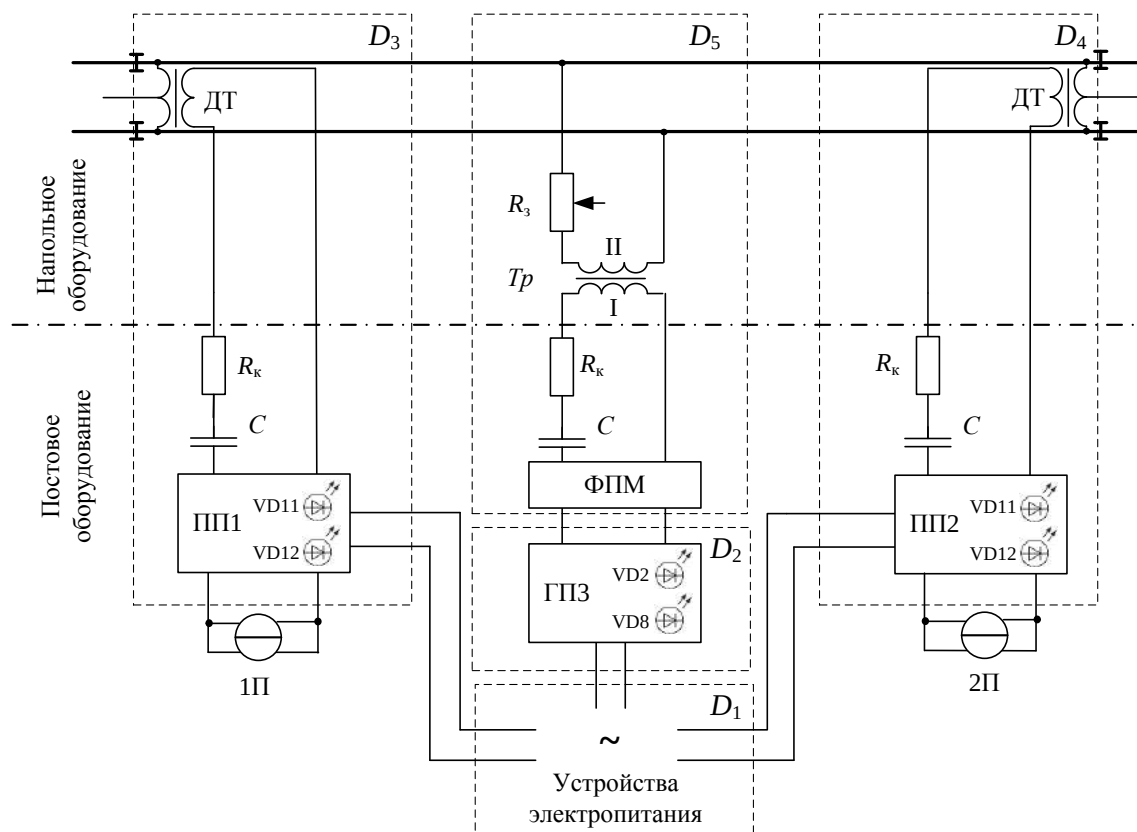


Рисунок 1 – Схема тональной рельсовой цепи

В работе [1] за исходные данные о проявлении отказа (диагностические признаки) принята информация о состоянии индикации на путевом генераторе (ГПЗ) и путевых приемниках (ПП) ТРЦ.

В нормальном режиме работы генератора светодиод VD2 излучает в мигающем режиме, обеспечивая индикацию о правильной работе задающего генератора, а светодиод VD8 излучает в непрерывном режиме, свидетельствуя о наличии питания постоянного тока на выходе усилителя. В случае появления отказа в схеме ГПЗ может прекратить излучать один из светодиодов или сразу оба.

При свободном и исправном состоянии рельсовой цепи (нормальный режим работы) светодиоды VD11 и VD12 путевых приемников попеременно мигают с частотой модуляции [6, 7].

Рассмотрим построение условного алгоритма диагностирования на основании информации, получаемой от светодиодов на лицевой панели ГПЗ, ПП1 и ПП2, при таких же ограничениях, которые поставлены в статье [1]:

Исследуем следующие диагностические признаки [1]:

k_1 – режим работы светодиода VD2 ГПЗ ($k_1 = 1$ – мигает, $k_1 = 0$ – не излучает);

k_2 – режим работы светодиода VD8 ГПЗ ($k_2 = 1$ – излучает, $k_2 = 0$ – не излучает);

k_3, k_4 – режим работы светодиодов VD11 и VD12 ПП1 ($k_3 = 1$ – хотя бы один излучает, $k_3 = 0$ – ни один не излучает, $k_4 = 1$ – оба светодиода излучают в мигающем режиме, $k_4 = 0$ – хотя бы один светодиод излучает, но не мигает. Признак k_4 рассматривается для случая $k_3 = 1$);

k_5 , k_6 – режим работы светодиодов VD11 и VD12 ПП2 ($k_5 = 1$ – хотя бы один излучает, $k_5 = 0$ – ни один не излучает, $k_6 = 1$ – оба светодиода излучают в мигающем режиме, $k_6 = 0$ – хотя бы один диод излучает, но не мигает. Признак k_6 рассматривается для случая $k_5 = 1$).

Суммарное проявление указанных шести диагностических признаков позволяет идентифицировать исследуемую систему (ТРЦ) в пяти состояниях (диагнозах) (см. рисунок 1) [1]:

D_1 – групповой отказ, связанный с электропитанием оборудования ТРЦ;

D_2 – отказ в схеме ГПЗ (в том числе его электропитание);

D_3 – отказ оборудования первого релейного конца ТРЦ;

D_4 – отказ оборудования второго релейного конца ТРЦ;

D_5 – отказ оборудования питающего конца ТРЦ.

Соответствие между значениями диагностических признаков и диагнозами приведено в таблице 1 [1].

Таблица 1 – Связь значений диагностических признаков с диагнозами

Диагноз	Значение признаков					
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
D_1	0	0	0	$\sim(0)$	0	$\sim(0)$
	1	1	0	$\sim(0)$	0	$\sim(0)$
D_2	0	0	1	0	1	0
	0	1	1	0	1	0
	1	0	1	0	1	0
D_3	1	1	0	$\sim(0)$	1	1
	1	1	1	0	1	1
D_4	1	1	1	1	0	$\sim(0)$
	1	1	1	1	1	0
D_5	1	1	1	0	1	0

На основании данных таблицы 1 в работе [1] были рассчитаны диагностические ценности обследования по выбранным признакам. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения информационного веса реализаций, частных и общих диагностических ценностей признаков

Признак	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
$P(k_j)$	0,7	0,7	0,7	0,2	0,7	0,2
$S_D(k_j)$	0,408	0,408	0,681	0,722	0,681	0,722

Из данных таблицы 2 видно, что наибольшее количество информации о состоянии ТРЦ может быть получено при оценке признаков k_4 и k_6 , а именно индикации светодиодов на ПП1 и ПП2 соответственно. Так как эти признаки имеют одинаковую диагностическую ценность, то не имеет значения, по какому из них нужно начинать ряд проверок. Выберем признак k_4 . При единичной реализации данного признака выявляется диагноз D_4 и алгоритм диагностирования прерывается. При нулевой реализации признака k_4 в случае последовательного выполнения проверок ценность оставшихся непроверенными признаков, как правило, изменяется [3].

Необходимо определить, какой из диагностических признаков является наиболее информативным с учетом полученной реализации признака $k_4 = 0$. Поставленная задача может быть решена путем вычисления условного диагностического веса, частной и общей диагнос-

тической ценности. Условный диагностический вес признаков может быть определен по выражению [8 – 10].

$$Z_{Di}(k_{2P} / k_{1S}) = \log_2 \frac{P(k_{2P} / D_i k_{1S})}{P(k_{2P} / k_{1S})}, \quad (1)$$

где k_{1S} – реализация S первого (по порядку) признака;

k_{2P} – реализации P второго (по порядку) признака;

$P(k_{2P} / D_i k_{1S})$ – условная вероятность появления признака k_{2P} для объектов с диагнозом D_i и реализацией признака k_{1S} ;

$P(k_{2P} / k_{1S})$ – условная вероятность появления признака k_{2P} для объектов с реализацией признака k_{1S} .

Общая диагностическая ценность обследования по признаку k_{2P} при условии, что результаты обследования по признаку k_{1S} известны (признак получил реализацию), с учетом всех возможных реализаций признака k_S может быть найдена по выражению:

$$S_D(k_{2P} / k_{1S}) = \sum_{i=1}^n P(D_i / k_{1S}) Z_{Di}(k_{2P} / k_{1S}), \quad (2)$$

где частная условная диагностическая ценность обследования по признаку k_P для диагноза D_i определяется выражением:

$$Z_{Di}(k_{2P} / k_{1S}) = \sum_{p=1}^m P(k_{2P} / D_i k_{1S}) \log_2 [P(k_{2P} / D_i k_{1S}) / P(k_{2P} / k_{1S})]. \quad (3)$$

На основании данных таблицы 1 рассчитаем значения условных вероятностей, информационного веса реализаций, частных и общих диагностических ценностей признаков для случая, когда по результатам обследования на первом этапе признак $k_4 = 0$. Результаты расчета сведены в таблицу 3.

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее количество информации о состоянии ТРЦ при условии, что признак $k_4 = 0$, может быть получено при оценке признаков k_5 или k_6 , а именно индикации светодиодов ПП2. Для дальнейших расчетов на втором этапе составления алгоритма диагностирования выберем признак k_6 . При единичной реализации данного признака выявляется диагноз D_3 и алгоритм диагностирования прерывается. При нулевой реализации признака k_6 необходимо заново рассчитать условный диагностический вес признаков, общую диагностическую ценность обследования и частную условную диагностическую ценность обследования при известной реализации двух признаков ($k_4 = 0$, $k_6 = 0$) по формулам:

$$Z_{Di}(k_{3Q} / k_{1S} k_{2P}) = \log_2 \frac{P(k_{3Q} / D_i k_{1S} k_{2P})}{P(k_{3Q} / k_{1S} k_{2P})}; \quad (4)$$

$$S_D(k_{3Q} / k_{1S} k_{2P}) = \sum_{i=1}^n P(D_i / k_{1S} k_{2P}) Z_{Di}(k_{3Q} / k_{1S} k_{2P}); \quad (5)$$

$$Z_{Di}(k_{3Q} / k_{1S}k_{2P}) = \sum_{p=1}^m P(k_{3Q} / D_i k_{1S}k_{2P}) \log_2 [P(k_{3Q} / D_i k_{1S}k_{2P}) / P(k_{3Q} / k_{1S}k_{2P})], \quad (6)$$

где k_{3Q} – реализация Q третьего (по порядку) признака;

$P(k_{3Q} / D_i k_{1S}k_{2P})$ – условная вероятность появления признака k_{3Q} для объектов с диагнозом D_i и реализацией признаков k_{1S} и k_{2P} ;

$P(k_{3Q} / k_{1S}k_{2P})$ – условная вероятность появления признака k_{3Q} для объектов с реализацией признаков k_{1S} и k_{2P} .

Таблица 3 – Значения информационного веса реализаций, частных и общих диагностических ценностей признаков при условии реализации признака $k_4 = 0$

Признак				k_1	k_2	k_3	k_5	k_6
Диагноз	$D_1 / \overline{k_4}$	$P(D_1 / \overline{k_4}) =$ $2/8 = 0,25$	$P(k_j / D_1 \overline{k_4})$	0,5	0,5	0	0	0
			$P(\overline{k_j} / D_1 \overline{k_4})$	0,5	0,5	1	1	1
			$Z_{D1}(k_j / \overline{k_4})$	− 0,322	− 0,322	0	0	0
			$Z_{D1}(\overline{k_j} / \overline{k_4})$	0,415	0,415	1,415	2	0,415
			$S_{D1}(k_j / \overline{k_4})$	0,0465	0,047	1,415	2	0,415
	$D_2 / \overline{k_4}$	$P(D_2 / \overline{k_4}) =$ $3/8 = 0,375$	$P(k_j / D_2 \overline{k_4})$	0,33	0,33	1	1	0
			$P(\overline{k_j} / D_2 \overline{k_4})$	0,66	0,66	0	0	1
			$Z_{D2}(k_j / \overline{k_4})$	− 0,921	− 0,921	0,678	0,415	0
			$Z_{D2}(\overline{k_j} / \overline{k_4})$	0,816	0,816	0	0	0,415
			$S_{D2}(k_j / \overline{k_4})$	0,2346	0,235	0,678	0,415	0,415
	$D_3 / \overline{k_4}$	$P(D_3 / \overline{k_4}) =$ $2/8 = 0,25$	$P(k_j / D_3 \overline{k_4})$	1	1	0,5	1	1
			$P(\overline{k_j} / D_3 \overline{k_4})$	0	0	0,5	0	0
			$Z_{D3}(k_j / \overline{k_4})$	0,678	0,678	-0,322	0,415	2
			$Z_{D3}(\overline{k_j} / \overline{k_4})$	0	0	0,415	0	0
			$S_{D3}(k_j / \overline{k_4})$	0,678	0,678	0,047	0,415	2
	$D_4 / \overline{k_4}$	$P(D_4 / \overline{k_4}) =$ $0/8 = 0$	$P(k_j / D_4 \overline{k_4})$	0	0	0	0	0
			$P(\overline{k_j} / D_4 \overline{k_4})$	0	0	0	0	0
			$Z_{D4}(k_j / \overline{k_4})$	0	0	0	0	0
			$Z_{D4}(\overline{k_j} / \overline{k_4})$	0	0	0	0	0
			$S_{D4}(k_j / \overline{k_4})$	0	0	0	0	0
	$D_5 / \overline{k_4}$	$P(D_5 / \overline{k_4}) =$ $1/8 = 0,125$	$P(k_j / D_5 \overline{k_4})$	1	1	1	1	0
			$P(\overline{k_j} / D_5 \overline{k_4})$	0	0	0	0	1
			$Z_{D5}(k_j / \overline{k_4})$	0,678	0,678	0,678	0,415	0
			$Z_{D5}(\overline{k_j} / \overline{k_4})$	0	0	0	0	0,415
			$S_{D5}(k_j / \overline{k_4})$	0,678	0,678	0,678	0,415	0,415
$P(k_j / \overline{k_4})$				0,625	0,625	0,625	0,75	0,25
$S_D(k_j / \overline{k_4})$				0,354	0,354	0,704	0,811	0,811

В таблице 4 приведены результаты расчета общих диагностических ценностей обследования по признакам без указания результатов промежуточных вычислений.

Таблица 4 – Значения общих диагностических ценностей признаков при условии реализации признаков $k_4 = 0$ и $k_6 = 0$

Признак	k_1	k_2	k_3	k_5
$S_D(k_j / \bar{k}_4 \bar{k}_6)$	0,208	0,208	0,918	0,918

По результатам расчета видно, что на третьем этапе составления алгоритма диагностирования при известной реализации двух признаков ($k_4 = 0$, $k_6 = 0$) необходимо проводить обследование по признаку k_3 или k_5 . Выберем признак k_5 . При нулевой реализации данного признака выявляется диагноз D_1 и алгоритм диагностирования прерывается.

При единичной реализации признака k_5 необходимо снова рассчитать условный диагностический вес признаков, общую диагностическую ценность обследования и частную условную диагностическую ценность обследования при известной реализации уже трех признаков ($k_4 = 0$, $k_6 = 0$, $k_5 = 1$) по формулам, аналогичным формулам (4) – (6). Результаты расчета приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Значения общих диагностических ценностей признаков при условии реализации признаков $k_4 = 0$, $k_6 = 0$ и $k_5 = 1$

Признак	k_1	k_2	k_3
$S_D(k_j / \bar{k}_4 k_5 \bar{k}_6)$	0,208	0,208	0

На данном этапе видно, что обследование по признаку k_3 имеет нулевую диагностическую ценность и не принесет никакой дополнительной информации о состоянии диагностируемого объекта. Для обследования на четвертом этапе построения алгоритма диагностирования выберем признак k_2 . Нулевая реализация данного признака позволяет исключить диагнозы D_5 , и выявить диагноз D_2 . При единичной реализации данного признака остается провести проверку по последнему оставшемуся признаку – k_1 .

Полученный в результате расчета условный алгоритм диагностирования ТРЦ приведен на рисунке 2.

Согласно построенному алгоритму диагностирования оптимальный порядок проведения проверок при поиске причины ложной занятости ТРЦ следующий.

Этап 1. Посмотреть на лицевую панель ПП1 и оценить режим работы светодиодов VD11 и VD12. В случае если оба светодиода работают в мигающем режиме, исключаются все диагнозы кроме отказа оборудования второго релейного конца ТРЦ (D_4). При другой индикации перейти к этапу 2.

Этап 2. Посмотреть на лицевую панель ПП2 и оценить режим работы светодиодов VD11 и VD12. В случае если оба диода работают в мигающем режиме, исключаются все диагнозы кроме отказа оборудования первого релейного конца ТРЦ (D_3). При другой индикации перейти к этапу 3.

Этап 3. В случае если оба светодиода на лицевой панели ПП2 не излучают, то исключаются все диагнозы кроме групповых отказов, связанных с электропитанием оборудования ТРЦ (D_1) [11]. При другой индикации перейти к этапу 4.

Этап 4. Посмотреть на лицевую панель ГПЗ и оценить режим работы светодиода VD8. В случае если светодиод не излучает, исключаются все диагнозы кроме отказа в схеме ГПЗ (D_2). При другой индикации перейти к этапу 5.

Этап 5. Посмотреть на лицевую панель ГПЗ и оценить режим работы светодиода VD2. В случае если светодиод не излучает, значит произошел отказ в схеме ГПЗ (D_2), иначе – отказ оборудования питающего конца ТРЦ (D_5).

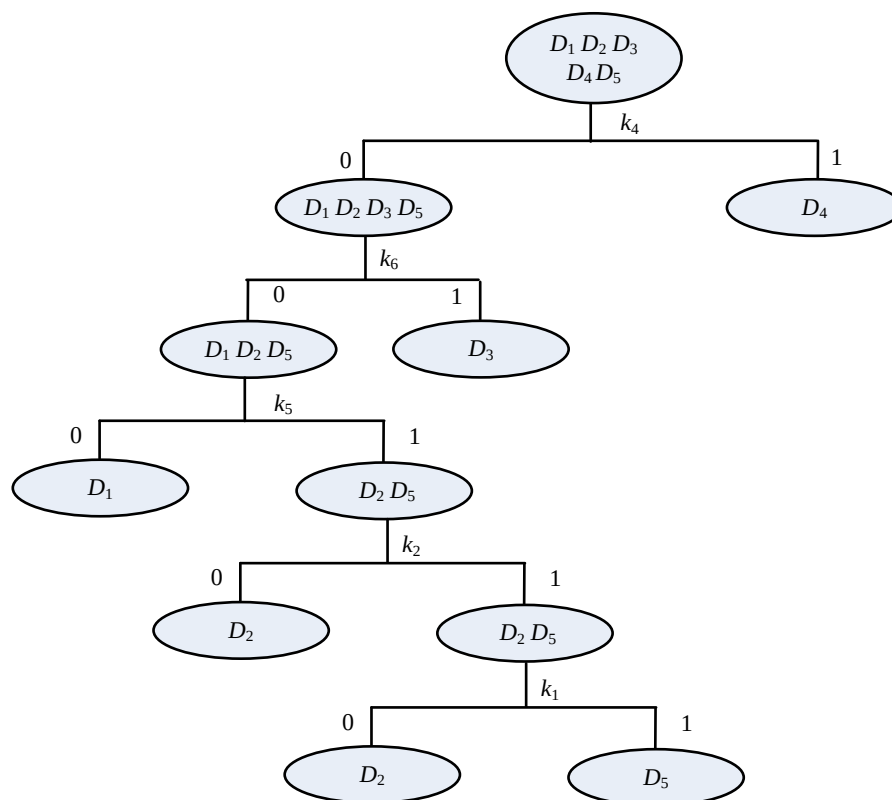


Рисунок 2 – Условный алгоритм диагностирования ТРЦ

Условный алгоритм диагностирования позволяет учитывать информацию, получаемую на предыдущих этапах, что дает возможность проводить обследования по наиболее ценным признакам на данном этапе и исключить ненужные обследования.

Для поставленной задачи диагностирования ТРЦ на основании индикации на путевом генераторе и путевых приемниках отличие условного алгоритма от безусловного не существенно. Вместе с тем при усложнении систем, подлежащих диагностированию, или для систем, рассматриваемых на качественном уровне подробнее, условный алгоритм позволит провести исследование более качественно.

Список литературы

1. Соколов, М. М. Построение безусловного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – №1 (33). – С. 139 – 145.
2. Соколов, М. М. Совершенствование технологии обслуживания станционных рельсовых цепей [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 124 – 132.
3. Филюшкина, Т. Напольному оборудованию – современные технологии [Текст] / Т. Филюшкина // Автоматика, связь и информатика. – М. – 2010. – № 9 (2010). – С. 2 – 6.

4. Сапожников, В. В. Основы технической диагностики: Учебное пособие [Текст] / В. В. Сапожников, В. В. Сапожников / УМЦ ЖДТ. – М., 2004. – 318 с.
5. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных дорог: Справочник [Текст] / В. С. Аркатов / ООО «Миссия-М». – М., 2006. – 496 с.
6. Сороко, В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики. Справочник: В 4 кн. [Текст] / В. И. Сороко, Ж. В. Фоткина. – М.: ООО «НПФ «ПЛАНЕТА», 2013. – Кн. 1. – 1060 с.
7. Аюпов, Р. Ш. Синтез системы пропуска обратного тягового тока в электротехническом комплексе электроснабжения железных дорог [Текст]: Автореферат дис... канд. тех. наук: 05.09.03 / Аюпов Роман Шамильевич. – Омск, 2009. – 19 с.
8. Биргер, И. А. Техническая диагностика [Текст] / А. И. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
9. Иванова, Е. Г. Построение алгоритма проверки технического состояния устройств числовой кодовой автоблокировки [Текст] / Е. Г. Иванова, Г. В. Ларионов, С. Л. Лисин // Сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. «Перспективные инновации в науке, образовании, на производстве и транспорте-2010». Одесса: Черноморье, 2010. – Т. 1. – С. 58 – 63.
10. Ларионов, Г. В. Построение алгоритмов диагностирования аппаратуры числовой кодовой автоблокировки на основе информационной ценности признаков [Текст] / Г. В. Ларионов, С. Л. Лисин // Эффективность и безопасность работы электротехнических комплексов и систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – С. 32 – 38.
11. Соколов, М. М. Контроль состояния системы электроснабжения устройств железнодорожной автоматики: Монография [Текст] / М. М. Соколов // Lambert Academic Publishing. – Саарбрюккен, 2012. – 161 с.

References

1. Sokolov M. M. Construction of conditional algorithm for diagnostics of tonal rail circuits on station [Postroenie uslovnogo algoritma diagnostirovaniya stantsionnykh rel'sovykh tsepej tonal'noj chastoty] *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 33, no 1, pp. 139 – 145
2. Sokolov M. M. Improvement of technology service of station track circuits railway automation [Sovershenstvovanie tehnologii obsluzhivaniya stacionnykh rel'sovykh cepej] *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 3 (27), pp. 124 – 132.
3. Filyushkina, T. Outdoor equipment - modern technology [Napol'nomu oborudovaniyu - sovremennye tekhnologii]. *Avtomatika, svyaz', informatika – Journal*, 2010, no. 9 (2010), pp. 2 – 6.
4. Sapozhnikov V. V. *Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki* (Basics of technical diagnostics). Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2004, 318 p.
5. Arkatov V. S. *Rel'sovye cepi magistral'nykh dorog* [Railways of main roads], Moscow: ООО «Missiia-M» publ., 2006, 496 p.
6. Soroko V. I., Fot'kina Zh. V. *Apparatura zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki* [Railway automation and telemechanics equipment]. Moscow: ООО «NPF «ПЛАНЕТА» Publ, 2013, 1060 p.
7. Ajupov R. Sh. *Sintez sistemy propuska obratnogo t'jagovogo toka v jelektrotehnicheskom komplekse jelektrosnabzhenija zhelezn'nykh dorog* (Synthesis of reverse traction current transmission system in the electrical power complex of railroad power supply). Candidate's thesis, Omsk, OmG-TU, 2009. 19 p.
8. Birger I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: «Mashinostroenie» publ., 1978, 240 p.
9. Ivanova E. G., Larionov G. V., Lisin S. L. Construction of an algorithm for checking the technical state of the devices of a numerical code lock [Postroenie algoritma proverki tehnic-

eskogo sostojanija ustrojstv chislovoj kodovoj avtoblokirovki]. *Abstracts of the Int. conference «Perspective Innovations in Science, Education, Production and Transport-2010»*. – Odessa, 2010. Т. 1., pp. 58 – 63.

10. Larionov G. V., Lisin S. L. The construction of algorithms for diagnosing the hardware of a numerical code lock on the basis of the information value of the signs [Postroenie algoritmov diagnostirovanija apparatury chislovoj kodovoj avtoblokirovki na osnove informacionnoj cennosti priznakov]. *Journal «Efficiency and safety of operation of electrical systems and automation and telemechanics systems in railway transport»*. Omsk, 2011, pp. 32 – 38.

11. Sokolov M. M. *Monitoring the state of the power supply system for railway automation devices* [Kontrol' sostojanija sistemy jelektrosnabzhenija ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki]. Saarbrücken; Lambert Academic Publishing, 2012, 161 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Соколов Максим Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 311872.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sokolov Maxim Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Соколов, М. М. Построение условного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 150 – 158.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sokolov M. M. Construction of conditional algorithm for diagnostics of tonal rail circuits on station. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 2, no 34, pp. 150 – 158 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог;
- транспортная энергетика;
- информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
- путь и искусственные сооружения;
- управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
- организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: 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 (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, подписанные подписи 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* (более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

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 (34) 2018

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-71514 от 1 ноября 2017 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 – Михалева С. С.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 27.09.2018.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 27.09.2018.

