

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 3(51)

2022

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ (Омск).
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
4. Алексеев Виктор Михайлович – профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТА (МИИТА), д.т.н., профессор (Москва).
5. Бессоненко Сергей Анатольевич – заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
7. Глинка Таласуш доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. Гуда Александр Николаевич – проректор по научной работе РГУПС, д.т.н., профессор (Ростов-на-Дону).
10. Зыкина Анна Владимировна – заведующая кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. Исаков Александр Леонидович – зав. кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. Ким Константин Константинович – заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. Комяков Александр Анатольевич – профессор кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
14. Косарев Александр Борисович – первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
15. Кузнецов Андрей Альбертович – заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
16. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
17. Никитин Александр Борисович – заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
18. Лившиц Александр Валерьевич – проректор по научной работе ИРГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
19. Лю Цзинькунь – доктор, профессор, заместитель декана Школы гражданского строительства университета Сунь Ятсена (Чжухай, Китай).
20. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
21. Сидоров Олег Алексеевич – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
22. Смердин Александр Николаевич – проректор по инновационному развитию ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
23. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Магистральная инженерия» АЛТ, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. Файзибаев Шерзод Сабирович – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПТрВ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
25. Харламов Виктор Васильевич – заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).

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 by scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Alekseev Viktor Mikhailovich – professor of the department of Information Control and Protection of RUT, D. Sc., professor (Moscow, Russia).
5. Bessonenko Sergey Anatolevich – head of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
8. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Huda Alexander Nikolaevich – Vice-rector for scientific-work of RSTU, D. Sc., professor (Rostov-on-Don, Russia).
10. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. Isakov Alexander Leonidovich – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
12. Kim Konstantin Konstantinovich – head of the department «Electrical Engineering and Heat Power Engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
13. Komyakov Aleksandr Anatolevich – professor of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
14. Kosarev Alexander Borisovich – senior deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
15. Kuznetsov Andrey Albertovich – head of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
16. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. Nikitin Aleksandr Borisovich – head of the department «Automation and telemechanics on railways» of PGUPS, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
18. Livshits Aleksandr Valerievich – vice-rector for scientific work of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
19. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
20. Paramonov Aleksandr Mikhailovich – professor of the department «Heat-power engineering» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
21. Sidorov Oleg Alexeevich – professor of the department «Power supply of railway transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
22. Smerdin Aleksandr Nikolaevich – vice-rector by innovation development of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
23. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Backbone Engineering» of ALT, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
24. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons and wagon facilities» of VTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
25. Kharlamov Viktor Vasilievich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnics» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

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

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Нехаев В. А., Николаев В. А., Леоненко Е. Г. Влияние сил сухого трения на устойчивость движения грузового вагона..... 2
- Лакин И. И. Аналитическая оценка автоматизации управления современным электровозом..... 10
- Незевак В. Л., Дмитриев А. Д. Совершенствование методов и алгоритмов расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения с регулируемыми устройствами..... 19
- Пляскин А. К., Бутусова В. А., Кушнрук А. С. Оптимизация норм межремонтных пробегов электровозов серии 2(3,4)ЭС5К на основе отказов тяговых электродвигателей..... 35
- Пирогов Е. Н., Медведева В. М., Науменко С. Н. Разработка технических решений для системы жизнеобеспечения пассажирских вагонов..... 43
- Лексутов И. С., Клока В. П. К возможности применения линейного сканера для создания средств технического контроля геометрических параметров продольного сечения поверхности катания колеса вагона..... 51
- Инагамов С. Г., Джаббаров Ш. Б., Абдуллаев Б. А. Анализ распределения тепловых напряжений в трехсекционных тормозных колодках грузовых вагонов при движении..... 63
- Галиев И. И., Минжасаров М. Х., Липунов Д. В. Оценка динамической нагруженности колесно-моторных блоков электровозов ЭЭСб..... 71
- Волчанова М. А. Статистические исследования сигналов акустического контроля при диагностировании силовых трансформаторов..... 80
- Кузнецов В. Ф., Шантаренко С. Г., Болотюк В. А., Савинкин С. В. Определение напряжений и глубины взаимного проникновения материалов головки рельса и гребня бандажа колеса локомотива в области их силового контакта..... 90
- Емельянов Д. О., Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю. Инновационная методика определения коэффициента трения в системе «колодка – колесо»..... 99
- Макашева С. И., Пинчуков П. С., Мельниченко О. В. Оценка потерь напряжения в тяговой сети при работе электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе тиристорных и IGBT-транзисторов..... 112
- Вильгельм А. С., Комяков А. А., Каштанов А. Л. Влияние технологии перевозочного процесса на эффективность эксплуатации грузовых электровозов..... 126

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

- Мухамедова З. Г., Бобоев Д. Ш., Якупова Х. М. Обоснование факторов, влияющих на технологию контейнерных перевозок..... 136
- Король Р. Г., Числов О. Н. Транспортно-логистическая архитектура мультимодальных перевозок Амурского бассейна..... 145

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»
Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный университет путей сообщения
(ОмГУПС (ОмИИТ))»
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

В. А. Нехаев, В. А. Николаев¹, Е. Г. Леоненко²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ СИЛ СУХОГО ТРЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Аннотация. В статье рассмотрены динамические процессы колебательной системы «вагон – путь», сформирована ее математическая модель и установлены ее особенности. Произведен анализ существующих подходов к рассмотрению влияния диссипативных сил на устойчивость подвижного состава, выявлены их недостатки. При составлении уравнений динамического процесса важно при рассмотрении кинетической и потенциальной энергии исходить из их точных выражений, т. е. учитывать связь между обобщенными координатами, что позволит детально рассмотреть процесс колебаний подвижного состава.

Найдена зона автопараметрического резонанса. Установлено, что силы сухого трения не препятствуют параметрическому резонансу. Составлены динамические уравнения с учетом сил рассеяния, возникающих в местах контакта элементов конструкции вагона. Определено влияние сил сухого трения на критический коэффициент параметрического возбуждения.

Определены области динамической неустойчивости вагона при движении по железнодорожному пути с различными характеристиками. Выявлены особенности поведения системы при влиянии сил сухого трения. Установлено, что силы сухого трения не уменьшают амплитуду подпрыгивания и могут привести к увеличению колебаний боковой качки за счет перекачки энергии.

Ключевые слова: вагон, диссипативные силы, колебания подпрыгивания, боковая качка, сухое трение, устойчивость движения.

Viktor A. Nekhaev, Viktor A. Nikolaev¹, Elena G. Leonenko²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation;

²Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – branch of the Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

INFLUENCE OF DRY FRICTION FORCES ON STABILITY MOVEMENT OF FREIGHT CARS

Abstract. The article considers the dynamic processes of the oscillatory system «wagon – way», its mathematical model is formed and its features are established. The analysis of existing approaches to the consideration of the influence of dissipative forces on the stability of rolling stock is carried out, their shortcomings are revealed. When composing dynamic process equations, it is important to proceed from their exact expressions when considering kinetic and potential energy, i.e. to take into account the relationship between generalized coordinates, which will allow us to consider in detail the process of rolling stock oscillations.

The zone of autoparametric resonance is found. It is established that dry friction forces do not interfere with parametric resonance. Dynamic equations are compiled taking into account the scattering forces arising in the contact points of the structural elements of the car. The influence of dry friction forces on the critical coefficient of parametric excitation is determined.

The areas of dynamic instability of a car when moving along a railway track with different characteristics are determined. The features of the behavior of the system under the influence of dry friction forces are revealed. It is established that dry friction forces do not reduce the amplitude of bouncing and can lead to an increase in lateral pitching vibrations due to energy pumping.

Keywords: freight car, dissipative forces, bouncing oscillations, rolling, dry friction, motion stability.

Динамические процессы взаимодействия подвижного состава и пути точно описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Однако вследствие значительных математических трудностей, возникающих при решении нелинейных задач, наибольшее число прак-

тически важных результатов получено на основе линейной теории. Для многих задач динамики линейные дифференциальные уравнения не только правильно описывают наиболее существенные стороны изучаемого явления, но и имеют некоторое экспериментальное обоснование. В данном случае будем считать железнодорожный путь по его протяженности равноупругим, что позволит не затемнять процессы параметрического взаимодействия колебаний подпрыгивания и боковой качки цистерны.

Проблема исследования динамического поведения узлов железнодорожного экипажа при его движении по пути имеет высокую значимость при определении устойчивости движения при различных скоростях и характеристиках подвижного состава. При составлении уравнений динамического процесса важно при рассмотрении кинетической и потенциальной энергии исходить из их точных выражений, т. е. учитывать связь между обобщенными координатами, что позволит детально рассмотреть процесс колебаний подвижного состава.

Большинство исследователей сразу получают линеаризованные уравнения, например, заменяя дугу хордой, что затеняет фактическое положение вагона и может привести к ошибкам при расчете значений, влияющих на динамику экипажа, и оказать существенное влияние на оценку его устойчивости [1, 2]. Поэтому при анализе колебательных процессов в задаче взаимодействия железнодорожных экипажей и пути важным моментом является не только учет неупругих сопротивлений, но и выбор частной теории, учитывающей рассеяние механической энергии при колебаниях вагона [3 – 5].

Необходимо более глубоко исследовать эти явления. Часть сил можно учесть и рассмотреть в реальной конструкции подвижного состава только при учете малых членов высшего порядка в разложениях кинетической и потенциальной энергии. Анализируя работы различных авторов, можно сделать заключение о том, что динамические процессы и колебания железнодорожных экипажей различного типа описываются подобными уравнениями, решения которых изучены недостаточно. В данной работе исследована динамика железнодорожного экипажа с учетом влияния диссипативных сил сухого трения в рессорном подвешивании.

При составлении уравнений приняты следующие допущения. Во-первых, чтобы не упустить качественной стороны вопроса, будем считать, что экипаж не совершает колебаний отбоя, хотя учет этого фактора вполне возможен, но качественная картина параметрического явления значительно усложнится. Во-вторых, траектории перемещения левого и правого колес колесной пары (возмущения на систему) примем одинаковыми, это уменьшит количество степеней свободы. В-третьих, учитывая, что в современных конструкциях вагона установлены скользуны постоянного контакта, будем полагать, что перевалка кузова на пятнике отсутствует, т. е. наддрессорная балка и кузов движутся как единое целое.

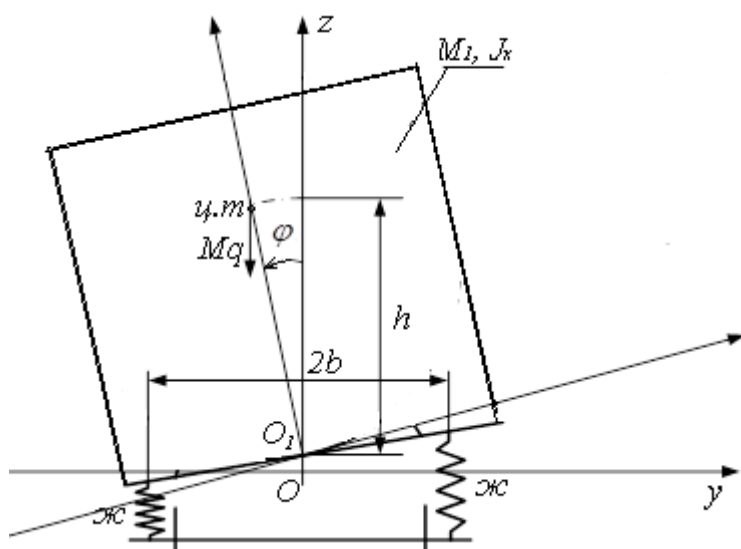


Рисунок 1 – Расчетная схема потенциальной и кинетической энергии для экипажа с высоким центром тяжести

Предположим при вертикальных и угловых колебаниях кузова кузов переместится на величину z и наклонится на угол φ (рисунок 1).

Кинетическая энергия системы складывается из кинетической энергии узлов железнодорожного экипажа. Для принятой расчетной схемы кинетическая энергия кузова как твердого тела равна сумме энергий в поступательном и вращательном движениях, т. е. определяется по известной формуле [6]:

$$T = \frac{M}{2}(\dot{z}_k^2 + \dot{y}_k^2) + \frac{J_x}{2}\dot{\varphi}^2, \quad (1)$$

где $\begin{cases} z_k = z - h(1 - \cos \varphi) \\ y_k = -h \sin \varphi \end{cases}$ – перемещения центра тяжести обрессоренных масс (надрессорной

балки и кузова относительно осей z и y соответственно (центр тяжести перемещается по дуге). Дифференцируя по времени эти перемещения и подставляя их в выражение (1), получим:

$$T = \frac{1}{2} [M\dot{z}^2 + (J_x + Mh^2)\dot{\varphi}^2] - Mh\dot{\varphi}\dot{z} \sin \varphi, \quad (2)$$

здесь M – масса кузова вагона; J_x – момент инерции относительно продольной оси вагона; h – расстояние центра масс до центра рессорного подвешивания.

Слагаемое $Mh\dot{\varphi}\dot{z} \sin \varphi$ в уравнении (2) характеризует кинематическую связь колебаний боковой качки и подпрыгивания. Для малых колебаний, когда угол $\varphi < 7^\circ$, выражение (2) может быть линеаризовано, т. е. можно принять $\sin \varphi \approx \varphi$ и $\cos \varphi \approx 1$, тогда

$$T = \frac{1}{2} [M\dot{z}^2 + (J_x + Mh^2)\dot{\varphi}^2] - Mh\dot{\varphi}\dot{z} \varphi. \quad (3)$$

Для вычисления потенциальной энергии необходимо определить прогибы рессор (движение системы будем считать линеаризованным):

$$\begin{cases} \Delta_1 = z - b\varphi - z_n; \\ \Delta_2 = z + b\varphi - z_n. \end{cases} \quad (4)$$

Составляя уравнение потенциальной энергии, необходимо учесть, что при повороте кузова вокруг продольной оси симметрии, проходящей через точку O_1 , сила тяжести совершит соответствующую работу, тогда

$$П = A + \frac{\mathcal{J}}{2} (2z^2 + 2b^2\varphi^2 + z_n^2 + z_n^2 - 2zz_n - 2zz_n + 2b\varphi z_n - 2b\varphi z_n), \quad (5)$$

где $\mathcal{J}$ – жесткость рессорного комплекта; $2b$ – база тележки вагона; z_n , z_n – перемещения левого и правого колес соответствующей колесной пары; $A \approx -\frac{Mgh\varphi^2}{2}$ – работа, совершаемая при перемещении экипажа.

Обратившись к алгоритму Лагранжа второго рода [6, 7], составим систему дифференциальных уравнений, которые позволят детально рассмотреть колебания подвижного состава с высоким центром тяжести с учетом параметрического взаимодействия между подсистемами:

$$\begin{cases} M\ddot{z} - Mh(\ddot{\varphi}\varphi + \dot{\varphi}^2) + 2\mathcal{J}z = \mathcal{J}z_n + \mathcal{J}z_n; \\ (J_x + Mh^2)\ddot{\varphi} + (2\mathcal{J}b^2 - Mgh - M\ddot{z}h)\varphi = -\mathcal{J}bz_n + \mathcal{J}bz_n. \end{cases} \quad (6)$$

Обозначим:

$$\omega_{0n}^2 = \frac{2\mathcal{J}}{M}; \quad \omega_{ок}^2 = \frac{2\mathcal{J}b^2 - Mgh}{J_x + Mh^2}; \quad 2\alpha = \frac{Mgh}{2\mathcal{J}b^2 - Mgh}; \quad \nu^2 = \frac{2\mathcal{J}b^2}{J_x + Mh^2};$$

$$F_1(t) = \omega_{0n}^2 \frac{z_n + z_n}{2}; \quad F_2(t) = \nu^2 \frac{z_n - z_n}{2b}.$$

Тогда после несложных преобразований система (6) примет вид:

$$\begin{cases} \ddot{z} - h(\ddot{\varphi} + \dot{\varphi}^2) + \omega_{on}^2 z = F_1(t) \\ \ddot{\varphi} + \omega_{ok}^2 (1 - 2\alpha \frac{\ddot{z}}{g}) \varphi = F_2(t). \end{cases} \quad (7)$$

В уравнениях (7) приняты во внимание малые члены высшего порядка в разложении выражений кинетической и потенциальной энергий. В эти уравнения легко ввести диссипативные силы, присутствующие в системе. Второе слагаемое в первом уравнении системы (7) характеризует нелинейную инерцию экипажа в результате действия колебаний боковой качки на величину колебаний подпрыгивания, и, как следствие, $h(\ddot{\varphi} + \dot{\varphi}^2)$.

Задача состоит в том, чтобы определить особенности поведения параметрической системы (7). Поставленный вопрос достаточно актуален и был частично рассмотрен А. М. Ляпуновым [8]. Он в научных трудах доказал, что подобное уравнение в системе (7) может иметь два решения – устойчивое и неустойчивое – при сколь угодно малых величинах $2\alpha\omega_{ok}^2 \frac{\ddot{z}}{g}$.

С точки зрения эксплуатационных показателей подвижного состава это замечание играет важную роль. При расчетах в некоторых случаях дугу заменяют хордой из-за малых углов, что может привести к ошибочным значениям расчетных параметров и, следовательно, к неверным выводам. При условии $2\alpha \frac{\ddot{z}}{g} = 0$, что, естественно, возможно при отсутствии колебаний под-

прыгивания кузова, система уравнений будет обладать только устойчивыми решениями.

При условии следования экипажа по эталонному железнодорожному пути цистерна некоторым возмущающим движением выводится из положения равновесия, тогда поведение экипажа может быть следующим:

при движении происходит так называемое «биение», т. е. происходит перекачка энергии из колебаний подпрыгивания к колебания боковой качки;

колебания подпрыгивания и боковой качки не связаны между собой, перекачка энергии отсутствует, система несвязанная. Ввиду того, что колебания при наличии сухого трения происходят в точке «седло», можно сделать вывод о том, что действующие силы вертикально неустойчивы [9, 10].

Примем состояние пути $F_1(t) \neq 0$ и $F_2(t) = 0$. При данном допущении малые угловые перемещения экипажа происходят неограниченно по времени, что приводит к возникновению

автопараметрических колебаний вагона с высоким расположением центра тяжести. Данные колебания можно исключить только двумя способами:

1) применением гасителей колебаний;

2) исключением попадания экипажа в зону резонанса демультипликатора, для чего необходимо подобрать параметры ходовой части экипажа так, чтобы $\omega_{on} \neq 2\omega_{ok}$. Результаты вычислений приведены на рисунке 2.

Отсюда можно сделать вывод: сухое трение не предотвращает развитие параметрического резонанса, а

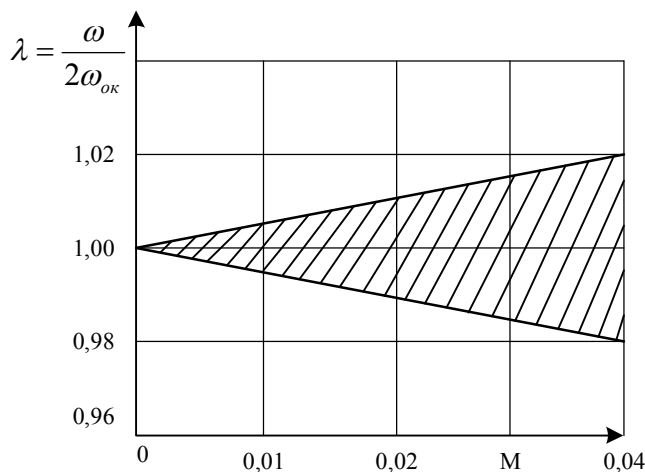


Рисунок 2 – Главная зона автопараметрического резонанса

лишь ограничивает амплитуду боковых колебаний подвижного состава. Здесь нужно отметить, что, как установлено профессором В. В. Болотиным [6], нелинейность системы всегда ограничивает амплитуду колебаний. Полученные результаты согласуются с теорией уравнений, изложенной в работах [10, 11].

Нелинейные коэффициенты в уравнениях с параметрическим возбуждением не оказывают существенного влияния на расположение устойчивой области колебаний кузова экипажа. Напротив, при определении амплитуд установившихся колебаний необходимо учитывать нелинейные величины в параметрических уравнениях возбуждения (на это указывалось выше).

Положим, что на систему действуют детерминированные возмущения при предположении, что неровности рельсовых нитей идентичны и изменяются по закону « $\cos pt$ ». В этом случае вместо системы уравнений (7) вынужденные колебания кузова описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} \ddot{z} - h(\ddot{\varphi}\varphi + \dot{\varphi}^2) + \omega_{0n}^2 z = \omega_{0n}^2 H \cos pt; \\ \ddot{\varphi} + \omega_{0k}^2 \varphi - 2\mu \frac{\ddot{z}}{h} \varphi = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где H – амплитуда возмущающего фактора, м; $p = \frac{2\pi v}{l_n}$ – частота внешнего воздействия;

v – скорость движения цистерны, м/с; l_n – длина геометрической неровности на пути, м;

$2\mu = \frac{\mu h^2}{J_x + \mu h^2}$ – малый безразмерный коэффициент.

Решение системы уравнений (8) дает две области неустойчивости экипажа, результаты расчетов представлены в виде графика на рисунке 3. Отметим, что при расчетах приняты экспериментальные данные, полученные из анализа реальных случаев сходов подвижного состава. Динамическая неустойчивость системы имеет две области колебаний: одна расположена вблизи $\lambda = \omega/2\omega_{0k}$, т. е. $p = \omega_{0n}$, а вторая, когда $\lambda = 2\beta$, т. е. $p = 2\omega_{0k}$.

При линеаризации потенциальной и кинетической энергии нельзя обнаружить колебания боковой качки, если $p \approx 2\omega_{0k}$. В том случае, когда величина коэффициентов возбуждения становится велика, существует одна область неустойчивости.

Силы трения в рессорном подвешивании, действующие в точках контакта системы «железнодорожный экипаж – путь», зависят от множества факторов, которые в настоящее время недостаточно изучены в качественном и количественном отношении.

Примерами являются трение между фрикционными клиньями и фрикционной планкой, между упомянутыми клиньями и боковыми наклонными поверхностями надрессорной балки. При этом величина сил сухого трения может зависеть от соотношения частот возмущающего воздействия и собственных частот колебаний экипажа. Существует также трение между рабочей поверхностью подошвы и рельсовым скреплением, между поверхностями шпалы и балластом балластной призмы, между нижней гранью рельса и подкладкой.

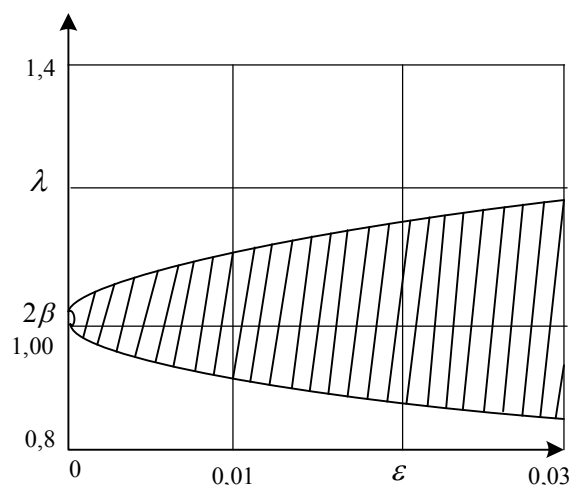


Рисунок 3 – Области динамической неустойчивости колебаний кузова ($\beta = 0,5036492$)

Помимо такого структурного демпфирования существует также внутреннее трение в элементах верхнего строения пути и балластной призмы.

В рессорных комплектах трехосных тележек при вертикальных колебаниях вагона силы сухого трения создают моменты трения, сопровождающиеся диссипацией энергии [12].

Рассмотрим влияние сил трения в упругом подвешивании вагона на характер его колебаний в вертикальной поперечной плоскости. В процессе движения подвижного состава по неравноупругому железнодорожному пути возникают колебания подпрыгивания, боковой качки и отбоя. Так как нас интересуют колебания вагона в вертикальной плоскости, то поперечные колебания отбоя здесь можно не принимать во внимание, однако учтем, что, как установлено еще в 30-х гг. прошлого века акад. В. П. Горячкиным [13], перекрестное трение снижает величину коэффициента трения при относительном движении тел (фрикционного клина в кармане надрессорной балки и фрикционной планки, закрепленной в проеме боковой рамы) в двух направлениях.

Итак, для оценивания влияния сил рассеяния на уровень колебаний вагона в динамическую систему (8) добавим силы сухого трения, в итоге получим:

$$\begin{cases} \ddot{z} - h(\ddot{\varphi} + \dot{\varphi}^2) + f_{01}[\text{sign}(\dot{z} - b\dot{\varphi} - \dot{z}_n) + \text{sign}(\dot{z} + b\dot{\varphi} - \dot{z}_n)] + \omega_{0n}^2 z = F_1(t); \\ \ddot{\varphi} + f_{02}b[\text{sign}(\dot{z} + b\dot{\varphi} - \dot{z}_n) - \text{sign}(\dot{z} - b\dot{\varphi} - \dot{z}_n)] + \omega_{0n}^2 \varphi - 2\mu \frac{\ddot{z}}{h} \varphi = F_2(t), \end{cases} \quad (9)$$

где $f_{01} = \frac{F_0}{M}$; $f_{02} = \frac{F_0}{J_x + Mh^2}$; F_0 – сила сухого трения.

Система дифференциальных уравнений (9) отличается от системы (8) наличием диссипативных сил сухого трения и внешним возмущением, вызывающим боковую качку кузова.

Анализ системы (9) произведем методом численного интегрирования, для чего воспользуемся методом Рунге – Кутты четвертого порядка, заменив график силы сухого трения графиком арктангенса.

Расчет произведен для параметров полувагона при движении его в порожнем режиме. При расчете принято, что перемещения левого и правого колес равны друг другу, т. е. $z_n = z_n$.

На рисунке 4 представлена величина ускорений колебаний подпрыгивания в виде графика. Зона параметрического резонанса на рисунке 4 заштрихована. Характер колебаний боковой качки представлен на рисунке 5.

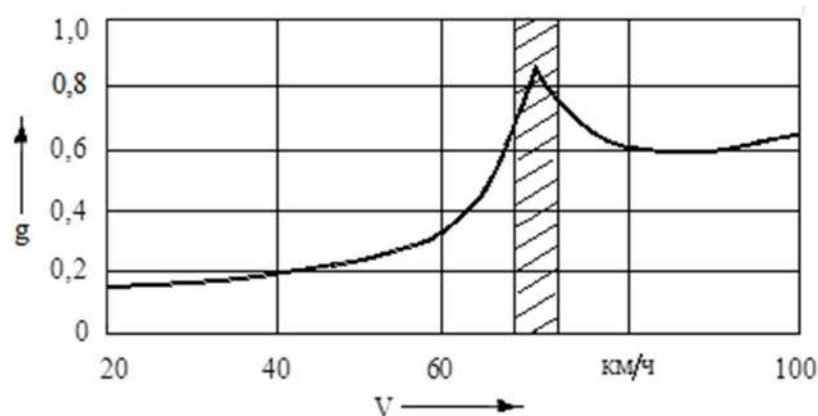


Рисунок 4 – Уровень ускорений подпрыгивания экипажа при демпфировании колебаний силами сухого трения (зона возбуждения интенсивных колебаний боковой качки заштрихована)

Силы сухого трения уменьшают колебания боковой качки, но когда система попадает в зону демумплекационного резонанса из-за наличия случайных возмущений при нарушении положения статического равновесия, колебания боковой качки интенсивно возрастают вследствие перекачки энергии подпрыгивания. Следовательно, в этой зоне амплитуды вертикальных ускорений колебаний подпрыгивания кузова и боковой качки недостаточно эффективно ограничиваются силами сухого трения, что отчетливо видно на рисунках 4 и 5.

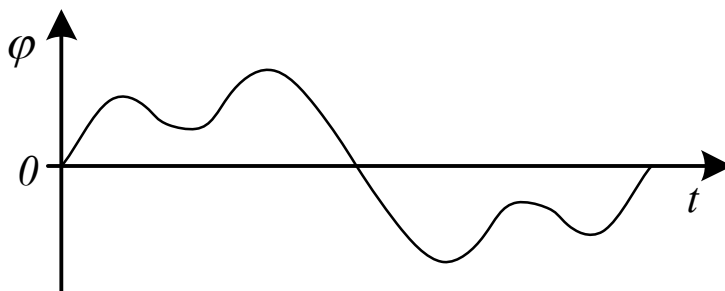


Рисунок 5 – Характер решений уравнения (9) в зоне главного параметрического резонанса

Отметим, что при наличии отступлений верхнего строения пути, особенно в кривых участках пути, движение экипажа в таком режиме может привести к значительным колебаниям силы давления колеса на рельс и существенному снижению коэффициента запаса устойчивости против вкатывания гребня колеса на головку рельса.

Список литературы

1. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. – Москва : Гостехиздат, 1956. – 600 с. – Текст : непосредственный.
2. Ганиев, Р. Ф. Колебания твердых тел / Р. Ф. Ганиев, В. О. Кононенко. – Москва : Наука, 1976. – 432 с. – Текст : непосредственный.
3. Болотин, В. В. Колебания линейных систем. Вибрации в технике : справочник / В. В. Болотин. – Москва : Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 352 с. – Текст : непосредственный.
4. Колебания нелинейных механических систем. Вибрации в технике : справочник / под ред. И. И. Блехмана. – Москва : Машиностроение, 1979. – Т. 2. – 351 с. – Текст : непосредственный.
5. Кононенко, В. О. Пространственные нелинейные колебания твердых тел / В. О. Кононенко. – Текст : непосредственный // Прикладная механика. – 1969. – Т. V. – № 2.
6. Сулов, Г. К. Теоретическая механика / Г. К. Сулов. – Москва-Ленинград : Гостехиздат, 1946. – 656 с. – Текст : непосредственный.
7. Курс теоретической механики / под ред. К. С. Колесникова. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 736 с. – Текст : непосредственный.
8. Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов. – Москва-Ленинград : Гостехиздат, 1950. – 472 с. – Текст : непосредственный.
9. Николаев, В. А. Разработка методов аналитического конструирования квазиинвариантных систем рессорного подвешивания железнодорожных экипажей : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Николаев Виктор Александрович; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2003. – 371 с. – Текст : непосредственный.
10. Неравноупругость пути и динамика железнодорожного экипажа с учетом нелинейной связи между обобщенными координатами / В. А. Нехаев, В. А. Николаев [и др.]. – Алматы : Казахская академия транспорта и коммуникаций, 2014. – 134 с. – Текст : непосредственный.

11. Шмидт, Г. Параметрические колебания / Г. Шмидт. – Москва : Мир, 1978. – 336 с. – Текст : непосредственный.
12. Нехаев, В. А. Определение резонансных скоростей подвижного состава / В. А. Нехаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 4 (28). – С. 11–23.
13. Горячкин, В. П. Земледельческая механика / В. П. Горячкин // Собр. соч. – Москва : Сельхозгиз, 1937. – Т. 2. – 258 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Bolotin V.V. *Dinamicheskaya ustoychivost' uprugikh sistem* [Dynamic stability of elastic systems]. Moscow: Gostekhizdat Publ., 1956, 600 p. (In Russian).
2. Ganiev R.F., Kononenko V.O. *Kolebaniya tverdykh tel* [Oscillations of rigid bodies]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 432 p. (In Russian).
3. Bolotin V.V. *Kolebaniya lineinykh sistem. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik* (Oscillations of linear systems. Vibration in technology). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978, vol. 1, 352 p. (In Russian).
4. Blekhmana I.I. *Kolebaniya nelineinykh mekhanicheskikh sistem. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik* [Oscillations of nonlinear mechanical systems. Vibration in technology]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979, vol. 2, 351 p. (In Russian).
5. Kononenko V.O. Spatial Nonlinear Oscillations of Solid. *Prikladnaya mekhanika – Applied mechanics*, 1969, vol. V, no. 2 (In Russian).
6. Suslov G.K. *Teoreticheskaya mekhanika* [Theoretical mechanics]. Moscow-Leningrad: Gostekhizdat Publ., 1946, 656 p. (In Russian).
7. Kolesnikov K.S. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* [Course of theoretical mechanics]. Moscow: MGTU Publ., 2002, 736 p. (In Russian).
8. Lyapunov A.M. *Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya* [The general problem of motion stability]. Moscow-Leningrad: Gostekhizdat Publ., 1950, 472 p. (In Russian).
9. Nikolaev V.A. *Razrabotka metodov analiticheskogo konstruirovaniya kvaziinvariantnykh sistem resornogo podveshivaniya zheleznodorozhnykh ekipazhej* (Development of methods of analytical design of quasi-invariant systems of spring suspension of railway carriages). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2003, 371 p. (In Russian).
10. Nekhaev V.A., Nikolaev V.A., Solonenko V.G., Makhmetova N.M. [Nonuniformity of the path and dynamics of the railway crew, taking into account the nonlinear connection between the generalized coordinates]. Almaty: KazATK Publ., 2014, 134 p. (In Russian).
11. Shmidt G. *Parametricheskie kolebaniya* [Parametric oscillations]. Moscow: Mir Publ., 1978, 337 p. (In Russian).
12. Nekhaev V.A. Determination of the resonant speeds of the rolling stock. *Izvestiya Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 4(28), pp. 11-23 (In Russian).
13. Goryachkin V.P. *Zemledel'cheskaya mekhanika* [Agricultural mechanics]. Moscow: Selkhozgiz Publ., 1937, vol. 2, 258 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нехаев Виктор Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: nehaevva@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nekhaev Viktor Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor Of Sciences in Engineering, Professor.

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

E-mail: nehaevva@rambler.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Николаев Виктор Александрович

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, заведую-
щий кафедрой «Теоретическая и прикладная меха-
ника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: nikolaev.nva1949@yandex.ru

Nikolaev Viktor Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federa-
tion.

Doctor Of Sciences in Engineering, Professor, head
of the department «Theoretical and applied mechanics»,
OSTU.

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

E-mail: nikolaev.nva1949@yandex.ru

Леоненко Елена Геннадьевна

Красноярский институт железнодорожного
транспорта – филиал Иркутского государственного
университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС).

Новая заря ул., д. 2и, г. Красноярск, 660028, Рос-
сийская Федерация.

Преподаватель отделения «Электромеханичес-
кое», КрИЖТ ИрГУПС.

Тел.: +7 (391) 248-16-44.

E-mail: leonenko-eg@mail.ru

Leonenko Elena Gennadievna

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – branch
of the Irkutsk State Transport University (KRIZHT
ISTU).

2i, Novaya zarya st., Krasnoyarsk, 660028, the Rus-
sian Federation.

Teacher of the department of «Electromechanical»,
KRIZHT ISTU.

Phone: +7 (391) 248-16-44.

E-mail: leonenko-eg@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Нехаев, В. А. Влияние сил сухого трения на
устойчивость движения грузового вагона /
В. А. Нехаев, В. А. Николаев, Е. Г. Леоненко. – Текст :
непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. –
№ 3 (51). – С. 2 – 10.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nekhaev V.A., Nikolaev V.A., Leonenko E.G. Influe-
nce of dry friction forces on stability movement of freight
cars. Journal of Transsib Railway Studies, 2022,
no. 3 (51), pp. 2-10 (In Russian).

УДК 629.471

И. И. Лакин

АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ), г. Москва, Российская Федерация

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫМ ЭЛЕКТРОВОЗОМ

Аннотация. Предметом рассмотрения статьи являются автоматизированные функции управления локомотивом на примере электровозов с целью оценки современного этапа развития интеллектуальной функциональности бортовых систем управления. В литературе часто говорят о создании «умного», или «цифрового» локомотива. Однако правильней говорить о внедрении кибернетических систем с обратными связями. Такие системы были на локомотиве с самого начала их появления и предназначались для автоматизации управления паром, позже для управления автоматическими тормозами. Эти системы автоматики были механическими и пневмомеханическими. С появлением электровозов внедряются электрические системы автоматики на базе электрических аппаратов, релейных схем, которые со временем заменяются на диодные, транзисторные схемы управления. Позже стали использоваться цифровые и аналоговые микросхемы. Современный этап развития автоматики связан с бортовыми микропроцессорными системами управления.

Автором предлагается интеллектуальные функции локомотива разбить на семь направлений, по каждому из которых оценить их реализацию: автоведение поезда, управление приводом и тормозами, диагностика, сбор аварийных схем, обеспечение безопасности движения поездов, управление комфортом работы локомотивной бригады.

Энтропию пространства интеллектуальных функций предлагается оценить по доработанной формуле Шеннона, где кроме вероятности востребованности функции за одну поездку учитывать степень повышения автоматизации процесса управления.

В результате анализа показано, что интеллектуальные функции локомотива развивались уже в XIX в., на сегодняшний день степень их реализации можно оценить в 60 %, а полную реализацию можно ожидать к середине XXI в. Результаты расчета сведены в две таблицы и один динамический график. Сделан вывод о том, что «интеллектуальный» локомотив есть этап эволюционного развития автоматизированных систем управления локомотивом.

Ключевые слова: локомотивы, системы управления, автоматизация, степень реализации интеллектуальных функций.

Igor I. Lakin

Transmashholding LLC (TMH), Moscow, the Russian Federation

MODERN ELECTRIC LOCOMOTIVE AUTOMATION CONTROL SYSTEMS ANALYSIS

Abstract. *The subject of the article is automated locomotive control functions on the example of electric locomotives in order to assess the current stage of development of the intellectual functionality of on-board control systems. The literature often talks about creating a «smart» or «digital» locomotive. However, it is more correct to talk about the introduction of cybernetic systems with feedback. Such systems were on the locomotive from the very beginning of their appearance and were designed to automate steam control, later to control automatic brakes. These automation systems were mechanical and pneumomechanical. With the advent of electric locomotives, electrical automation systems based on electrical devices, relay circuits are being introduced, which are eventually replaced by diode, transistor control circuits. Later, digital and analog chips were used. The current stage of automation development is associated with on-board microprocessor control systems.*

The author proposes to divide the intellectual functions of the locomotive into seven directions, for each of which to evaluate their implementation: train driving, drive and brake control, diagnostics, collection of emergency circuits, ensuring train safety, managing the comfort of the locomotive crew.

The entropy of the space of intelligent functions is proposed to be estimated according to the modified Shannon formula, where, in addition to the probability of the function being in demand for one trip, the degree of automation of the control process is taken into account.

As a result of the analysis, it is shown that the intellectual functions of the locomotive developed already in the 19th century, today the degree of their implementation can be estimated at 60 %, and full implementation can be expected by the middle of the 21st century. The calculation results are summarized in two tables and one dynamic graph. It is concluded that an "intelligent" locomotive is a stage in the evolutionary development of automated locomotive control systems.

Keywords: *locomotives, control systems, automation, degree of realization of intellectual functions.*

Применительно к информационным системам, в том числе на железнодорожном транспорте, часто используют термины «цифровизация», «интеллектуальный транспорт», «умный локомотив», «искусственный интеллект», «четвертая промышленная революция» и даже «киберфизические производственные системы» [1]. Понятие «цифровая железная дорога» узаконено распоряжением правительства [2]. Все перечисленные выше термины относятся к одной области знаний – «Кибернетика»: науке о закономерностях процессов, методах управления и связи в природе, машинах и механизмах, компьютерах и даже в живых организмах и в обществе [3]. Чаще используют термины «техническая кибернетика», автоматические (без участия человека) и автоматизированные (с участием человека) системы управления на базе IT-техники.

Главный признак кибернетической системы – наличие обратной связи, позволяющей принять управляющее решение и воздействовать на объект по результатам анализа управляющего воздействия и состояния системы [3]. Таким образом, «интеллектуальность» системы управления, степень ее автоматизации определяются наличием информации об объекте управления, сложности и комплексности алгоритмов принятия решений.

Следует отметить, что интеллектуальную функциональность в литературе обычно принято делить на две группы: это создание кибернетических систем автоматического управления с обратными связями, о которых идет речь в статье, и искусственный интеллект как способность выполнять творческие функции, свойственные человеку, живой природе. Норберт Винер дал оригинальное определение жизни как стремление к уменьшению энтропии [3], «нарушению второго закона термодинамики», которому подчиняется вся неживая природа. По мнению автора, это очень точное определение «живой» системы, споры о котором не прекращаются со времен Алана Тьюринга. В последнем смысле интеллектуальные системы в настоящей статье не рассматриваются.

В статье выполнена оценка «интеллектуальности» системы управления локомотивов, прежде всего – микропроцессорных систем управления [4, 5], в том числе при организации

технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов [6, 7]. В основу оценки интеллектуальности систем предлагается положить формулу Шеннона из теории информации [8, 9].

Для оценки информативности систем управления локомотивов применительно к задачам технического обслуживания и ремонта в работе [8] предложено брать отношение информативности бортовых диагностических систем I к общей энтропии диагностической информации H_{Σ} . При этом для оценки информативности и энтропии использована формула Шеннона [9]:

$$H = I = - \sum_{i=0}^N P_i \cdot \log_2 (P_i), \quad (1)$$

где P_i – вероятность наступления события i (в работе [8] это вероятность отказа i за *межремонтный период времени*).

Автором работы [8] справедливо отмечен недостаток формулы (1) как не учитывающей последствия отказа, стоимость восстановления работоспособного состояния, поэтому предложено внести в формулу Шеннона поправочный коэффициент:

$$H = - \sum_{i=0}^N (P_i \cdot (C_i/S) \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i/S))), \quad (2)$$

где C_i – стоимость восстановления работоспособности после отказа i ;

S – общая стоимость ТОиР.

Предложенный в работе [8] метод позволил автору оценить информативность основных видов систем диагностирования. Автором настоящей статьи предлагается применить аналогичный подход к оценке «интеллектуальности» локомотива как отношение текущей «интеллектуальности» системы управления C_i к абсолютной S , и оценить «интеллектуальность» локомотива по формуле информативности (2).

В таблице 1 приведено предлагаемое условное разбиение общей «интеллектуальности» локомотива S на подгруппы «интеллектуального» управления, каждая из которых имеет свой вес C_i . При этом вес C_i определен методом экспертной оценки по сложности реализации алгоритмов управления с использованием подходов теории нечетких множеств [11]. Предлагается разбиение задач автоматизации управления локомотивом на семь групп: $i \in \{1, 7\}$. Вероятность P_i определена как востребованность функции за одну поездку.

Таблица 1 – Интеллектуальные функции управления электровозом

№ п/п	Интеллектуальная функция S	Доля в общей «интеллектуальности» локомотива C_i/S	Вероятность востребованности P_i	Энтропия H_i
1	Автоведение CPPS	0,15	1	0,410545
2	Управление приводом	0,30	1	0,52109
3	Управление тормозами	0,15	1	0,410545
4	Диагностика	0,2	0,5	0,332193
5	Сбор аварийных схем	0,05	0,05	0,02161
6	Безопасность движения поезда	0,1	0,8	0,291508
7	Комфорт	0,05	1	0,216096
ВСЕГО		1	–	$H_{\Sigma} = 2,204$

Верхнеуровневая интеллектуальная функция – это автоведение поезда согласно графику во взаимодействии с АСУ диспетчерского центра управления полигона по технологии киберфизической производственной системы (Cyber Physical Production System – CPPS) [10]. Эта функциональность оценена как 15 % от общей интеллектуальности системы: $C_1/S = 0,15$. При этом вероятность востребованности функции за поездку $P_1 = 1$.

Самая значимая интеллектуальная функция – это управление приводом с автоматическим контролем токов, силы тяги, скорости движения, защитой от опасных режимов работы привода (боксование, перегрев, превышение параметров и др.). Эта функциональность оценена как 30 %: $C_2/S = 0,30$; $P_2 = 1$.

Не менее важная, но более простая функция – управление тормозами: $C_3/S = 0,15$; $P_3 = 1$.

Важное новое направление развития интеллектуальной функциональности локомотива – это бортовая техническая диагностика, позволяющая осуществлять техническое обслуживание и ремонт локомотивов с учетом технического состояния, повышать эффективность эксплуатации: $C_4/S = 0,20$; $P_4 = 0,5$.

В случае обнаружения отказа или предотказного технического состояния с использованием функциональности $i = 4$; важно автоматически или автоматизированно собрать аварийную схему управления: $C_5/S = 0,05$; $P_5 = 0,1$.

Следующая функциональность локомотива - обеспечение безопасности движения поездов (Safety): исключение крушений, аварий, столкновений, сходов и других событий нарушения безопасности: $C_6/S = 0,1$; $P_6 = 0,8$.

Последняя функциональность, которая рассматривается в статье, – управление комфортом работы машиниста: климат-контроль в кабине машиниста, защита от неправильных действий, эргономика управления, подсказки на бортовом компьютере и с использованием аудиосистем, внешняя безопасность (Security): $C_7/S = 0,05$; $P_7 = 1$. Можно предположить, что в полностью интеллектуальном локомотиве локомотивная бригада будет отсутствовать и эта функциональность станет не нужной.

Таким образом, энтропия интеллектуальной функциональности локомотива по формуле (2) будет такой:

$$H_{\Sigma} = - \sum_{i=1}^{N7} (P_i \cdot (C_i/S) \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i/S))) = \quad (3)$$
$$= 1 \cdot 0,15 \cdot \log_2(1 \cdot 0,15) + 1 \cdot 0,3 \cdot \log_2(1 \cdot 0,3) + 1 \cdot 0,15 \cdot \log_2(1 \cdot 0,15) + 0,1 \cdot 0,2 \cdot \log_2(0,2 \cdot 0,1) +$$
$$+ 0,05 \cdot 0,05 \cdot \log_2(0,05 \cdot 0,05) + 0,8 \cdot 0,1 \cdot \log_2(0,8 \cdot 0,1) + 1 \cdot 0,05 \cdot \log_2(1 \cdot 0,05) = \mathbf{2,2036}.$$

Расчет информативности интеллектуальных функций по формуле (2) приведен в таблице 1. В результате расчета энтропия информационного пространства интеллектуальных функций $H_{\Sigma} = 2,2$.

Далее по каждому виду функций будет рассмотрена хронология разработки оборудования локомотивов и оценено уменьшение энтропии функциональных функций. Каждая новая автоматизированная функция j будет оценена как уменьшающая энтропию пространства i -й интеллектуальной функции от 0 до 100 %.

Оценка уменьшения энтропии интеллектуальных функций при появлении на борту той или иной автоматической или автоматизированной системы управления выполнена автором экспертно на основании своего опыта практической (эмпирической) работы в локомотиворемонтном комплексе, в том числе при разработке алгоритмов для бортовых микропроцессорных систем управления локомотива (МСУ).

Автоматика присутствовала на локомотиве с момента появления первых паровозов. Автоматическое управление паром с помощью золотникового парораспределителя пришло на паровоз от стационарных паровых машин Джеймса Уатта (Англия, XVIII в.) и его последователей. С самого начала на паровозе были и другие системы механической и пневмомеханической автоматики: предохранительные клапаны, регуляторы уровня воды, центробежный регулятор скорости вращения и другие системы интеллектуального управления. Механическая автоматика есть и сейчас. Например, блокирование входа в высоковольтную камеру электропоездов при поднятом токоприемнике, и наоборот: блокирование поднятия токоприемника при открытой двери в высоковольтную камеру.

После 1872 г. на подвижном составе появляется пневмомеханическая автоматика в системах торможения с воздушным тормозом системы американского инженера и предпринимателя Джорджа Вестингауса («тройное клапанное устройство»). Автоматические тормоза – самая старинная интеллектуальная система на современном локомотиве: первая промышленная (паровая) революция стала и первым этапом создания интеллектуального управления на локомотиве.

Вторая промышленная революция – электротехническая – внесла свои элементы автоматического регулирования после появления электрического транспорта в XIX в. Это были аппараты защиты от опасных режимов работы электроаппаратуры и электрических машин: короткое замыкание, заниженное или повышенное напряжение, перегрев. Появились электротехнические реле. На этом этапе появляются и элементы «защиты от дурака»: логические схемы на базе реле, защищающие от неправильных действий. Например, сбор электрической цепи при выключенных вентиляторах. Панели с собранной на базе реле логикой управления до сих пор широко распространены на локомотивах, но постепенно заменяются на логические построения в программном обеспечении бортовых микропроцессорных систем управления.

Второму поколению автоматизированных систем свойственно применение электромагнитных реле для управления приводом с 50-х гг. XX в. Одно из самых распространенных – широко применяемые на трамваях, троллейбусах и электропоездах реле ускорения.

К началу третьего поколения интеллектуальных систем управления относится полупроводниковая электроника: диоды, транзисторы, тиристоры, затем цифровые и аналоговые микросхемы различной степени интеграции. А с 1972 г. начинается эпоха микропроцессорной техники.

Вершиной логических схем второго поколения стали блоки управления выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИПами) типа БУВИП. ВИПы позволили впервые реализовать плавное управление на электровозах переменного тока серии ВЛ80Р (1974 г.) и рекуперативное торможение. Однако управлять ВИПом вручную невозможно: принятие решения должно занимать не более 1 мс, а воздействие на ВИП – не более 10 мс. Поэтому был создан БУВИП-80, а потом по результатам эксплуатации БУВИП-100 и БУВИП-113. Позже БУВИП был переведен на цифровые микросхемы ТТЛ-логики серии 133 – БУВИП-133, ставший итогом долгой научно-практической работы НЭВЗ и ВЭлНИИ.

На 12-осных электровозах ВЛ85 (1983 г.) появляется еще один блок автоматического управления – БАУ-002, в котором на операционных усилителях (аналоговых микросхемах) серии 140УД6 были реализованы системы автоматического управления током и скоростью движения. Аналогичное управление было и на пассажирских 6-осных ВЛ65 (1992 г.).

Накопленный при создании БУВИП и БАУ опыт стал основой системы управления третьего (компьютерного) поколения: на пассажирских электровозах серии ЭП1 впервые в России (1998 г.) была установлена микропроцессорная система управления и диагностирования МСУД, которая не только программно повторила аппаратную логику БУВИП + БАУ, но и реализовала диагностическую функциональность с регистрацией данных в бортовом промышленном компьютере (традиционное название «блок индикации»), расположенном в каждой кабине машиниста. МСУД постоянно совершенствовались на электровозах ЭП1М, ЭП1М, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К. Появилась МСУ и на электровозах постоянного тока серий 2ЭС4К и 3ЭС4К. Локомотивы производства СТМ 2ЭС6 и 2ЭС10 изначально были микропроцессорными. Весь современный подвижной состав имеет систему управления на базе микропроцессоров, которую можно назвать «интеллектуальной и «цифровой».

Наряду с МСУ для управления приводом внедряется система автоведения поезда (АВП), которая по данным о профиле перегона, установленных скоростях, массе и длине поезда управляет энергооптимальным ведением поезда, позволяет повысить пропускную способность полигонов.

Параллельно с развитием систем управления приводом локомотивов интеллектуальная функциональность развивалась в рамках приборов безопасности, первым из которых следует отметить локомотивный скоростемер ЗСЛ2М. Прибор имеет механическую связь с первой по ходу движения колесной парой, стрелочный указатель скорости и часы с 24-часовым циферблатом. Имеется устройство записи параметров движения поезда на скоростемерной ленте (скорость, время, давление, показание бортового светофора АЛС и др.), расшифровкой которой в локомотивных депо занимался целый отдел. Умение расшифровывать ленты и находить нарушения безопасности движения входило в обязанности любого руководителя депо. Теперь

вместо бумажных лент используются электронные на flash-накопителях с автоматической расшифровкой параметров поездки на стационарных компьютерах.

В локомотивном хозяйстве шутят: на паровозе 5 минут ищешь неисправность и час ее устраняешь, а на электровозе час ищешь и 5 минут устраняешь. Поэтому важной интеллектуальной функцией современных локомотивов является диагностирование технического состояния оборудования с использованием МСУ и датчиков в оборудовании и цепях локомотива. Как конечная, но пока недостижимая цель – отказ от планово-предупредительной системы технического обслуживания и ремонта в пользу предиктивного ремонта. Уже сейчас планирование объема ремонта происходит с учетом данных МСУ, передаваемых в АСУ ТООиР автоматически. Такие системы, например, созданы в компаниях General Electric, Siemens и в отечественных «Трансмашхолдинг» и «Уральские локомотивы». Бортовая диагностика – одна из важнейших интеллектуальных функций современных локомотивов.

Революционным стало внедрение автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН) – комплекта оборудования для приема и расшифровки из рельсовой цепи кода показаний напольного светофора с отображением информации на светофоре в кабине машиниста с целью предотвращения возможного столкновения поездов (срыв автоматического клапана в случае нарушения скоростного режима).

Первая система блокировки была создана еще 1906 г. как механическая: при запрещающем показании семафора или светофора поворачивался напольный рычаг, при зацеплении с которым на локомотиве срабатывали автоматические тормоза. Такая система нашла широкое распространение в метро. На железных дорогах России внедрена электромагнитная система АЛС, когда железнодорожный путь разбивается на изолированные участки (за счет изолированных рельсовых стыков), в каждый из которых светофор посылает сигнал, соответствующий его цвету. От светофора с красным показанием сигнала нет. Также нет сигнала, если рельсовые цепи закорочены (например, колесной парой) или при обрыве цепи (лопнул рельс).

АЛС – это уже следующее поколение интеллектуальных систем управления локомотивом, так как предполагает взаимодействие с напольными устройствами. Системы безопасности локомотивов можно считать прообразом систем управления четвертого поколения – киберфизических, относящихся к четвертой промышленной революции. Главный прибор современных систем АЛС – это комплексное устройство безопасности КЛУБ-У. А в комплексе с системой автоматического управления торможением САУТ это система БЛОК, устанавливаемая на современных магистральных локомотивах.

Понимание киберфизических производственных систем (Cyber Physical Production Systems – CPPS) введено компанией Siemens в рамках четвертой промышленной революции и хорошо демонстрируется на примере станков. Первые станки имели паровой привод (первое поколение), затем электрический с элементами автоматики (второе поколение). После этого появились станки с цифровыми автоматизированным управлением, позже – микропроцессорным (третье поколение). Появилась возможность дистанционного перепрограммирования станков, это и стало основой для киберфизической системы, когда мастер уже не программирует каждый станок в отдельности, а на центральном компьютере дает общее задание на изготовление нужной детали, а компьютер сам дистанционно программирует все станки цеха под заданную программу производства. Это и есть киберфизическая производственная система (CPPS).

Аналогично станкам происходило развитие и локомотивной тяги от паровозов к электровозам и тепловозам, локомотивам с микропроцессорной системой управления, а теперь – к комплексной автоматизированной системе управления движением поездов на перегоне (цифровой железной дороге), когда центральный стационарный компьютер планирует движение поездов, собирает информацию об ограничениях движения (например, путевые работы) и передает по радиоканалу на МСУ каждого локомотива заданный график.

Примером CPPS железнодорожного транспорта может служить перспективная европейская система управления движением поездов ERTMS (European Rail Traffic Management

System). В основе ERTMS – путевые датчики (евробализы): автономные напольные приемопередающие устройства (транспондеры) с энергонезависимой памятью, а также система железнодорожной радиосвязи на базе стандарта GSM-R – ETCS (European Train Control System). Внедрение ERTMS рассчитано на несколько десятилетий и предполагает три этапа: установка евробализов и использованием национальных стандартов безопасности движения, передача информации с локомотива с использованием ETCS, полное комплексное взаимодействие с локомотивом с целью централизованного управления движением поездов на полигоне.

Стандарт ERTMS принят европейскими государствами, рассматривается в Китае, Казахстане и в других странах. В России стандарт пока не принят, так как система АЛС является более продвинутой, чем используемые в Европе системы. Основным направлением развития CPPS-систем на российских железных дорогах является внедрение систем интервального управления движением поездов: на стационарном сервере полигона собирается информация о дислокации поездов, их массе, составности, назначении, техническом состоянии локомотива, времени работы локомотивной бригады и др. Разрабатывается график прогнозного движения поездов с учетом профиля, постоянных и временных ограничений скоростей, после чего на локомотивы передается управляющая информация. Система автоведения поезда совместно с МСУ управляет движением поезда с учетом расстояния до впереди идущего поезда. Пример такой системы – «Виртуальная сцепка», разрабатываемая в НИИАС совместно с компанией «АВП-Технология».

CPPS-системы на железнодорожном транспорте дополняются разработкой и внедрением других современных информационных технологий, получивших общее название «Интернет вещей». Яркий пример таких разработок – «Машинное зрение». На локомотивах устанавливаются камеры, передающие цифровое видео в бортовой компьютер для дальнейшего распознавания образов: препятствий на пути, светофоров, другого подвижного состава. Машинное зрение после отладки позволит автоматизировать дистанционное управление локомотивами как на станции (маневровые работы), так и на перегоне (магистральное движение). Постепенный отказ от локомотивных бригад – ближайшая перспектива развития железнодорожного транспорта, уже нашедшая широкое применение на зарубежных метрополитенах и испытанная в России на электропоездах «Ласточка».

Дальнейшее развитие бортовых систем управления будет происходить по пути повышения функциональности бортовых микропроцессорных систем управления в результате как накопления опыта, так и повышения производительности МСУ. Важную роль должно сыграть развитие «Интернета вещей»: промышленное зрение с распознаванием образов, совершенствование, уменьшение стоимости и повышение надежности датчиков тока, напряжения, давления, температуры и др., развитие встроенных в оборудование микропроцессорных систем управления и диагностирования.

Как показано выше, «Интеллектуальный локомотив» – это название современных систем управления локомотивов применительно к очередному эволюционному этапу развития автоматизированных и автоматических (кибернетических) функций систем управления. Автором произведена экспертная оценка изменения интеллектуальной функциональности электровозов и оценен процент реализации интеллектуального локомотива как отношение информативности систем управления к общей энтропии интеллектуальных систем (таблица 2).

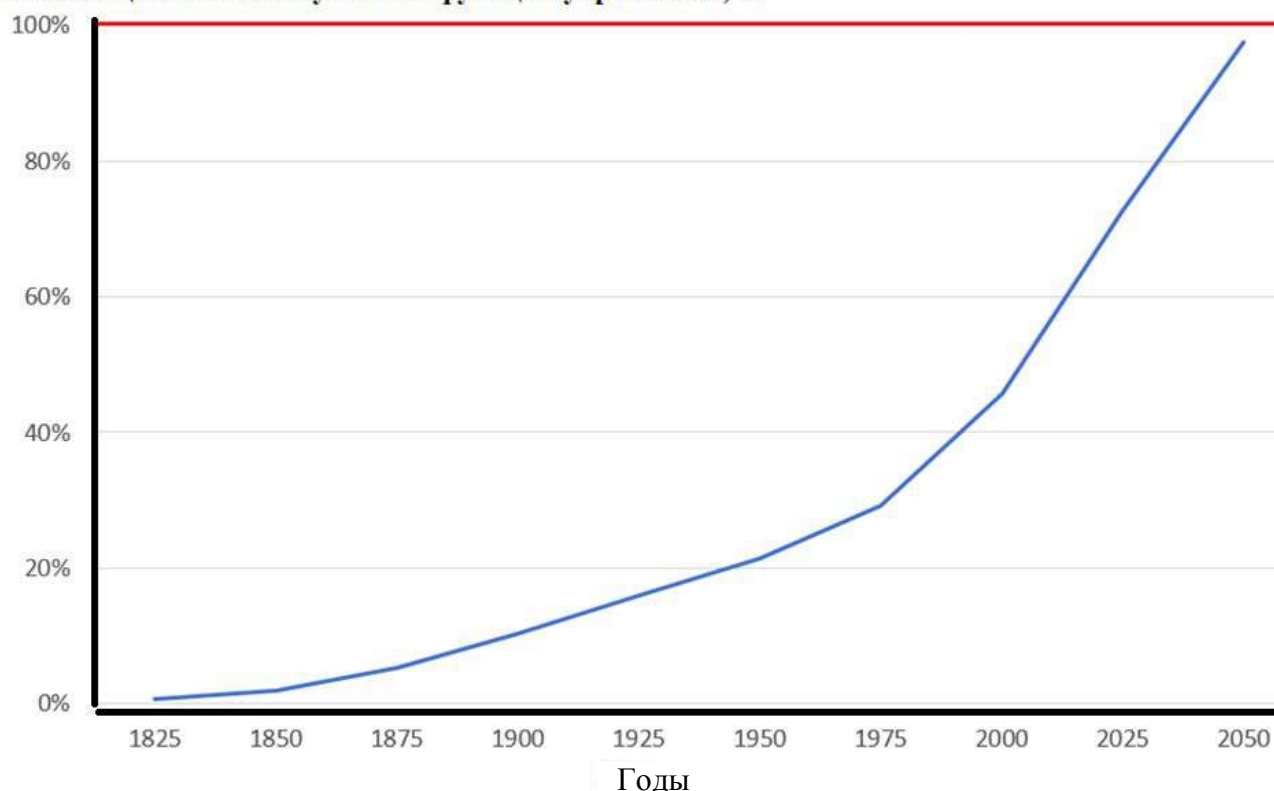
Энтропия интеллектуальных функций локомотива уменьшалась с самого начала локомотивостроения. Сначала за счет систем управления паром и защиты от опасных режимов, потом за счет автоматического управления тормозами. С появлением электровозов (рисунок) энтропия стала уменьшаться за счет автоматизации управления приводом, защиты от опасных режимов работы. Появляются автоматизированные функции управления на базе реле, электромагнитных систем, позже – диодов, транзисторов, аналоговых и цифровых микросхем. Современный этап уменьшения энтропии связан с микропроцессорными системами управления, позволившими перейти от систем автоматики локомотива к киберфизическим производственным системам – управлению движением поездов на полигоне.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Динамика изменения интеллектуальных функций электровозов

Год	Функциональность, %							I	$\Pi = I / H_{\Sigma},$ %
	1	2	3	4	5	6	7		
1825		3						0,02	1
1850		5		5	5			0,03	2
1875		6	10	10	10	5		0,12	6
1900		10	20	15	15	10	5	0,23	10
1925		15	30	25	20	15	10	0,35	16
1950		20	35	30	30	30	15	0,47	22
1975	5	30	40	40	40	40	20	0,64	29
2000	25	60	50	50	60	50	30	1,01	46
2025	30	90	85	70	80	75	90	1,60	73
2050	99	99	99	99	99	99	99	2,18	99

Реализация интеллектуальных функций управления, %



Динамика изменения интеллектуальных функций на электровозах по данным таблицы 2 (последний столбец)

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Развитие интеллектуальной функциональности управления локомотивом происходит постоянно с момента его изобретения.
2. Степень интеллектуальности систем управления локомотивов можно оценить как уменьшение энтропии управления по формуле Шеннона.
3. Развитие интеллектуальных функций носит экспоненциальный характер.
4. На 2022 г. реализацию интеллектуальных функций на электровозе можно оценить как 70 %.
5. Реализацию всех основных интеллектуальных функций на локомотиве следует ожидать в середине XXI в.

1. Семенов, А. П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Семенов Александр Павлович ; Российский университет транспорта. – Москва, 2021 – 379 с. – Текст : непосредственный.
2. Долгосрочная программа развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года. Переход на «цифровую железную дорогу». Распоряжение правительства РФ от 19 марта 2019 г. № 466 // rulaws.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://rulaws.ru/government/Rasporyazhenie-Pravitelstva-RF-ot-19.03.2019-N-466> (дата обращения: 30.05.2022).
3. Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине / Н. Винер; пер. с англ.; 2-е издание. – Москва : Наука, 1983. – 344 с. – Текст : непосредственный.
4. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К. В. Липа, А. А. Белинский, В. Н. Пустовой [и др.]. – Москва: ООО «Локомотивные технологии», 2015. – 212 с. – Текст : непосредственный.
5. Лакин, И. И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лакин Игорь Игоревич ; Московский университет путей сообщения. – Москва, 2016. – 195 с. – Текст : непосредственный.
6. Лакин, И. К. Разработка теории и программно-технических средств комплексной автоматизированной справочно-информационной и управляющей системы локомотивного депо : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лакин Игорь Капитонович, МИИТ. – Москва, 1997. – 377 с. – Текст : непосредственный.
7. Патент № 2569216 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 К 11/00, 2006.01. Способ управления обслуживанием и ремонтом тягового подвижного состава железнодорожного транспорта и система для его осуществления : № 2013147471/11 : заявлено 24.10.2013 : опубликовано : 20.11.2015 / Липа К. В., Гриненко А. В., Лянгасов С. Л., Лакин И. К., Аболмасов А. А., Мельников В. А. – 13 с. : ил. – Текст : непосредственный.
8. Семенов, А. П. Информационная энтропия систем технического диагностирования локомотивов / А. П. Семенов, И. К. Лакин, И. Ю. Хромов. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3 (67). – С. 42–53. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).42-53.
9. Теорема Шеннона – Хартли // wikipedia.org : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Шеннона-Хартли (дата обращения: 30.05.2022).
10. Промышленная революция // krugosvet.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: http://www.krugosvet.ru/enc/gumanitarnye_nauki/ekonomika_i_pravo/PROMISHLENNAYA_REVOLYUTSIYA.html (дата обращения: 25.05.2022).
11. Заде, Л. А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. – Текст : непосредственный // Математика сегодня / Л. А. Заде. – Москва : Знание, 1974. – С. 5–49.

References

1. Semenov A.P. *Model' upravleniia zhiznennym tsiklom lokomotivov s ispol'zovaniem sovremennykh metodov tekhnicheskogo diagnostirovaniia* (A model for managing the life cycle of locomotives using modern methods of technical diagnostics). Doctor's thesis, Moscow, RUT (MIIT), 2021, 379 p. (In Russian).
2. *Dolgosrochnaia programma razvitiia OAO «Rossiiskie zheleznye dorogi» do 2025 goda. Perekhod na «tsifrovuiu zheleznuiu dorogu»*. *Rasporyazhenie pravitel'stva RF ot 19 marta 2019 g. № 466* [Long-term development program of JSC «Russian Railways» until 2025. Transition to a «digital railway». Decree of the Government of the Russian Federation no. 466 dated March 19, 2019]. Available at: <https://rulaws.ru/government/Rasporyazhenie-Pravitelstva-RF-ot-19.03.2019-N-466> (accessed 30.05.2022).
3. Viner N. *Kibernetika ili upravlenie i sviaz' v zhivotnom i mashine* [Cybernetics or control and communication in an animal and a machine]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 344 p. (In Russian).

4. Lipa K.V., Belinskii A.A., Pustovoi V.N. *Monitoring tekhnicheskogo sostoianiia i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov. Teoriia i praktika* [Monitoring of the technical condition and operating modes of locomotives. Theory and practice]. Moscow, LLC «Locomotive Technologies» Publ., 2015, 212 p. (In Russian).
5. Lakin I.I. *Monitoring tekhnicheskogo sostoianiia lokomotivov po dannym bortovyykh apparatno-programmnykh kompleksov* (Monitoring of the technical condition of locomotives according to on-board hardware and software systems). Doctor's thesis, Moscow, MSTU, 2016, 195 p. (In Russian).
6. Lakin I.K. *Razrabotka teorii i programmno-tekhnicheskikh sredstv kompleksnoi avtomatizirovannoi spravochno-informatsionnoi i upravliaiushchei sistemy lokomotivnogo depo* (Development of the theory and software and hardware of a complex automated reference, information and control system of a locomotive depot). Doctor's thesis, Moscow, MIIT, 1997, 377 p. (In Russian).
7. Lipa K.V., Grinenko A.V., Liangasov S.L., Lakin I.K., Abolmasov A.A., Mel'nikov V.A. *Patent RU 2569216*, 20.11.2015.
8. Semenov A.P., Lakin I.K., Khromov I.Iu. Information entropy of locomotive technical diagnostics systems. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2020, no. 3(67), pp. 42-53 (In Russian).
9. *Teorema Shennona – Khartli* [The Shannon – Hartley Theorem]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Шеннона-Хартли (accessed 30.05.2022).
10. *Promyshlennaia revoliutsiia* [The Industrial Revolution]. Available at: http://www.krugosvet.ru/enc/gumanitarnye_nauki/ekonomika_i_pravo/PROMISHLENNAYA_REVOLYUTSIYA.html (accessed 25.05.2022).
11. Zade L.A. *Osnovy novogo podkhoda k analizu slozhnykh sistem i protsessov priniatiia reshenii. Matematika segodnia* [Fundamentals of a new approach to the analysis of complex systems and decision-making processes. Mathematics today]. Moscow, Znanie Publ., 1974, pp. 5-49 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лакин Игорь Игоревич
АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ).
Ефремова ул., д. 10, г. Москва, 119048, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, руководитель направления по техническому управлению.
Тел.: +7 (916) 383-6443.
E-mail: i.lakin@tmholding.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lakin Igor Igorevich
Transmashholding LLC (TMH)
10 Efremova st. Moscow 119048, the Russian Federation.
Ph. D. in Engineering, head of technical management department.
Phone.: +7 (916) 383-6443.
E-mail: i.lakin@tmholding.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лакин, И. И. Аналитическая оценка автоматизации управления современным электровозом / И. И. Лакин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 10 – 19.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lakin I.I. Modern electric locomotive automation control systems analysis. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 3 (51), pp. 10-19 (In Russian).

УДК 621.331

В. Л. Незевак, А. Д. Дмитриев

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Аннотация. Выполнение расчетов показателей работы системы тягового электроснабжения в установленных режимах ориентировано на решение широкого круга задач, связанных с выбором параметров силового оборудования тяговых подстанций, размещением линейного оборудования, сечения контактной подвески, сравнением вариантов по технико-экономическим показателям. В настоящее время появление различных регулируемых устройств в системе тягового электроснабжения обуславливает необходимость совершенствования методов и алгоритмов расчета, используемых в различных программных комплексах.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В настоящей работе рассмотрены вопросы построения схем замещения при моделировании работы системы тягового электроснабжения в установившихся режимах с учетом устройств автоматического включения-отключения резервного преобразовательного агрегата тяговой подстанции и накопления электроэнергии. Представлены соответствующие схемы замещения и фрагменты алгоритмов расчета, учитывающие характеристики и режимы работы указанных устройств. Применение предложенных схем замещения позволяет учесть в расчетах различие внешних характеристик преобразовательных агрегатов, оценить соответствие уставок автоматики уровню электротяговой нагрузки и влияние работы устройства на уровень напряжения на шинах подстанции и в контактной сети, нагрузочную способность тяговых подстанций, а для устройства накопления с учетом зарядной и разрядной характеристик дополнительно оценить влияние на эффективность применения рекуперативного торможения. Предложенные алгоритмы работы устройств предназначены для совершенствования методов расчетов показателей системы тягового электроснабжения. В работе предложен усовершенствованный метод расчета показателей системы тягового электроснабжения, основанный на одновременном проведении тягового и электрического расчета, базирующийся на базе данных расчетов, выполненных для различных условий следования электроподвижного состава на участке железной дороги.

Ключевые слова: схема замещения, алгоритм работы, характеристики, автоматика, система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, электроподвижной состав, уровень напряжения, токоприемник, автоматика включения-отключения резерва, система накопления электроэнергии, мощность, энергоемкость, степень заряженности.

Vladislav L. Nezevak, Alexander D. Dmitriev

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

IMPROVEMENT OF METHODS AND ALGORITHMS FOR CALCULATING ENERGY INDICATORS OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM WITH ADJUSTABLE DEVICES

Abstract. The calculation of the performance indicators of the traction power supply system in steady-state modes is focused on solving a wide range of tasks related to the choice of parameters of the power equipment of traction substations, the placement of linear equipment, the cross section of the contact suspension, the comparison of options for technical and economic indicators. Currently, the appearance of various regulated devices in the traction power supply system necessitates the improvement of calculation methods and algorithms used in various software complexes.

In this paper, the issues of constructing substitution schemes for modeling the operation of the traction power supply system in steady-state modes, taking into account the devices for automatic switching on and off of the backup converter unit of the traction substation and the accumulation of electricity. The corresponding substitution schemes and fragments of calculation algorithms that take into account the characteristics and operating modes of these devices are presented. The use of the proposed substitution schemes allows us to take into account in the calculations the difference in the external characteristics of the converter units, to assess the compliance of the automation settings with the level of electric traction load and the effect of the device on the voltage level on the substation tines and in the contact network, the load capacity of traction substations, and for the accumulation device, taking into account the charging and discharge characteristics, to additionally assess the impact on the effectiveness of regenerative braking. The proposed algorithms of the devices are designed to improve the methods of calculating the indicators of the traction power supply system. The paper proposes an improved method for calculating the indicators of the traction power supply system, based on simultaneous traction and electrical calculations, based on the database of calculations performed for various conditions of electric rolling stock on the railway section.

Keywords: replacement circuit, operation algorithm, characteristics, automation, traction power supply system, traction substation, electric rolling stock, voltage level, current collector, automatic switching on and off of reserve, power storage system, power, energy intensity, degree of charge.

Определение энергетических показателей и показателей нагрузочной способности (далее – показателей работы) системы тягового электроснабжения необходимо для сравнительного анализа работы оборудования в различных условиях эксплуатации, выбора его параметров и вариантов размещения, определения пропускной и провозной способности участка и решения подобных задач [1 – 5].

Методы расчета показателей системы тягового электроснабжения опираются на результаты тяговых расчетов, позволяющих определить нагрузку электроподвижного состава в любой ординате. К настоящему времени известны методы расчета, которые можно разбить на группу методов, основанных на определении нагрузок подстанций и электроподвижного состава на основе предварительно выполненных тяговых расчетов, и группу методов, в которых

расчет показателей системы тягового электроснабжения выполняется одновременно с тяговым расчетом.

Совершенствование первой группы методов привело к широкому использованию метода равномерных сечений, где точность расчетов повышается путем уменьшения интервала времени, с которым выполняются интегрирование уравнения движения поезда и расчет показателей системы тягового электроснабжения. В настоящее время указанный интервал времени составляет несколько секунд или десятков секунд. Например, в программном комплексе «Комплекс тяговых и электрических расчетов», разработанном для определения показателей системы тягового электроснабжения, пропускной способности, расчета схем плавки гололеда и уставок релейной защиты, минимальный интервал времени для выполнения тяговых расчетов составляет 15 с, что определяет точность расчетов. Дальнейшее совершенствование указанного метода связано с уменьшением шага расчетов, но ограничено методологически. Указанное обстоятельство связано с тем, что метод предназначен для расчета статического режима и не позволяет выполнить расчет переходных электромагнитных и электромеханических процессов. Для расчета переходных процессов в системе тягового электроснабжения используются другие методы, учитывающие динамику изменения электрических величин.

Вторая группа методов ориентирована не на повышение точности путем уменьшения интервала расчетов, а на снижение методологической погрешности. Если первая группа методов использует допущение о постоянстве или о заданном уровне напряжения, что вводит погрешность расчетов, то вторая группа методов направлена на учет изменения напряжения на этапе тяговых расчетов и при выполнении электрических расчетов.

Учет изменения напряжения позволяет повысить точность расчета показателей работы системы тягового электроснабжения и необходим для двух случаев:

1) при выполнении тяговых расчетов в условиях изменения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, обусловленного поездной ситуацией в границах межподстанционных зон;

2) при выполнении электрических расчетов в условиях изменения напряжения на шинах подстанций в течение суток, обусловленного режимом нагрузки подстанции и изменения режима напряжения на вводах тяговых подстанций.

Необходимость совершенствования методов расчета связана с появлением регулируемых устройств, характеристики и режимы работы которых оказывают влияние на показатели работы системы тягового электроснабжения, как это показано на примере устройств накопления электроэнергии [6].

Широкое распространение регулируемых устройств и необходимость повышения точности методов расчетов для установившихся режимов работы обуславливает актуальность вопросов совершенствования методов и алгоритмов расчета показателей работы системы тягового электроснабжения.

Повышение точности расчетов сопряжено с уменьшением шага расчетов, а также с модификацией методов, связанных с одновременным пошаговым выполнением тяговых и электрических расчетов. Преимуществом указанных методов является учет уровня напряжения при проведении тяговых расчетов, недостатком – повышение вычислительной сложности алгоритма расчетов.

Как показывают исследования, учет изменения напряжения на этапе проведения тяговых расчетов позволяет повысить точность расчетов энергетических показателей поезда, однако не оказывает существенного влияния на точность расчета технической скорости движения, ординаты поезда, времени следования поезда по участку, энергетических показателей системы тягового электроснабжения.

При оценке влияния напряжения на токоприемнике на техническую скорость и время следования электроподвижного состава по участку для допустимого диапазона напряжения (2700 – 4000 В) определено, что указанные показатели отклоняются от аналогичных, полученных для номинального напряжения, на 1 – 1,5 %, как это показано на примере электропоезда

Сапсан в работе [7]. При определении энергетических показателей системы тягового электроснабжения в условиях изменения расчетного напряжения на токоприемнике в зависимости от поездной ситуации необходимо использовать обоснованный уровень напряжения на токоприемнике на этапе проведения тяговых расчетов.

Существует ряд программных продуктов, предназначенных для выполнения тяговых расчетов и моделирования систем тягового электроснабжения, к которым следует отнести программные комплексы: комплекс программ РУТ (МИИТ); MATLAB SimPowerSystems; ETAP с модулем eTraX; ENOTRAC AG; «Комплекс расчетов тягового электроснабжения» ВНИИЖТ; Fazonord software complex и др. [8]. Исследователи отмечают несовершенство действующих мировых стандартов по расчету систем тягового электроснабжения.

Одним из недостатков известных методов расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения, имеющих программную реализацию, например, программный комплекс «Комплекс программ тяговых и электрических расчетов», является отсутствие возможности учитывать работу ряда регулируемых устройств с учетом их алгоритмов работы [9]. К последним следует отнести автоматику включения/отключения резерва на тяговых подстанциях, устройства автоматического регулирования напряжения силовых понижающих трансформаторов, системы накопления электроэнергии, управляемые устройства компенсации реактивной мощности (с плавным или ступенчатым регулированием), устройства бесконтактного регулирования напряжения и др.

Дополнительным фактором, позволяющим повысить точность расчетов, является учет изменения напряжения на шинах тяговых подстанций с учетом нагрузки подстанций и мощности транзита в линиях электропередач, как это показано в работах [10, 11].

Реализация в схемах замещения моделей указанных устройств и алгоритмов их работы позволяет учесть изменение напряжения на шинах тяговых подстанций, линейных устройств и на токоприемнике электроподвижного состава.

Порядок расчета показателей с устройствами автоматического включения/отключения резерва. Способы расчета показателей работы системы тягового электроснабжения основаны на решении мгновенных схем замещения, предполагающих нахождение токов в ветвях и напряжений в узлах схем. Наиболее распространенными применяемыми методами расчета являются методы узловых потенциалов и контурных токов. Указанные методы относятся к вышеупомянутой первой группе, ориентированных на расчет установившихся значений электрических величин. Метод равномерных сечений графика движения поездов среди аналогичных методов показывает наибольшую точность расчетов, повышающуюся при уменьшении интервала расчетов. В результате расчетов по указанному методу с заданным интервалом времени выполняется определение скорости, пути, ординаты и нагрузки электроподвижного состава, на основе которых определяется нагрузка в границах межподстанционной зоны между подстанциями А и В (постоянный ток) в каждый момент времени t_i :

$$\forall t_i: I_{Ai} + I_{Bi} = \sum_{k=1}^n I_{ki} + I_{yi}, \quad (1)$$

где I_A, I_B – нагрузка тяговых подстанций А и В соответственно, ограничивающих межподстанционную зону (для двухстороннего питания), А;

I_k – нагрузка электроподвижного состава, А;

I_y – уравнивающий ток, обусловленный различием напряжения на шинах подстанций А и В, А.

Различие внешних характеристик тяговых подстанций учитывается при составлении схемы замещения, в которой сопротивления выпрямительных преобразователей задаются постоянными или в виде нелинейных характеристик.

При наличии двух и более преобразовательных агрегатов схема замещения предусматривает наличие соответствующего количества источников напряжения, сопротивление которых изменяется по заданной характеристике или учитывает включенное и отключенное положение агрегатов [12].

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Рассмотрим алгоритм расчета токов преобразовательных агрегатов при работе автоматики включения/отключения резерва (АВОР). При работе АВОР в зависимости от уровня нагрузки подстанции изменяется количество работающих преобразователей. В случае, если уровень нагрузки ниже уровня тока уставки АВОР резервного трансформатора, в работе находится один агрегат, а напряжение на шинах подстанции для неуправляемых выпрямителей определяется по формуле:

$$I < I_{уст} : U_{dш} = U_{d0} - I_d r_{э.в}, \quad (2)$$

где U_{d0} – выпрямленное напряжение холостого хода преобразователя, В;

I_d – ток выпрямителя, А.

$r_{э.в}$ – эквивалентное сопротивление преобразователя, Ом:

$$r_{э.в} = \sin \frac{\pi}{m} \frac{u_k U_{d0}}{I_{dном}}; \quad (3)$$

u_k – приведенное напряжение короткого замыкания трансформатора, о. е.;

m – количество пульсаций;

$I_{dном}$ – номинальный ток выпрямителя, А.

В случае, если ток нагрузки I_d равен или превышает ток уставки, в работе находится два преобразовательных агрегата, токи которых и напряжение на шинах подстанции определяются по выражениям:

$$I \geq I_{уст} : \begin{cases} U_{dш} = U_{d01} - I_{d1} r_{э.в1}; \\ I_d = I_{d1} + I_{d2}; \\ I_{d1} = \frac{1}{r_{э.в1}} (I_{d2} r_{э.в2} + \Delta U); \\ I_{d2} = \frac{I_d r_{э.в1} - \Delta U}{r_{э.в1} + r_{э.в2}}, \end{cases} \quad (4)$$

где U_{d01} – выпрямленное напряжение холостого хода преобразователя 1.

В схеме замещения тяговой подстанции работа АВОР имитируется с помощью ключа, принимающего включенное и отключенное положения в зависимости от уровня нагрузки (рисунок 1, а).

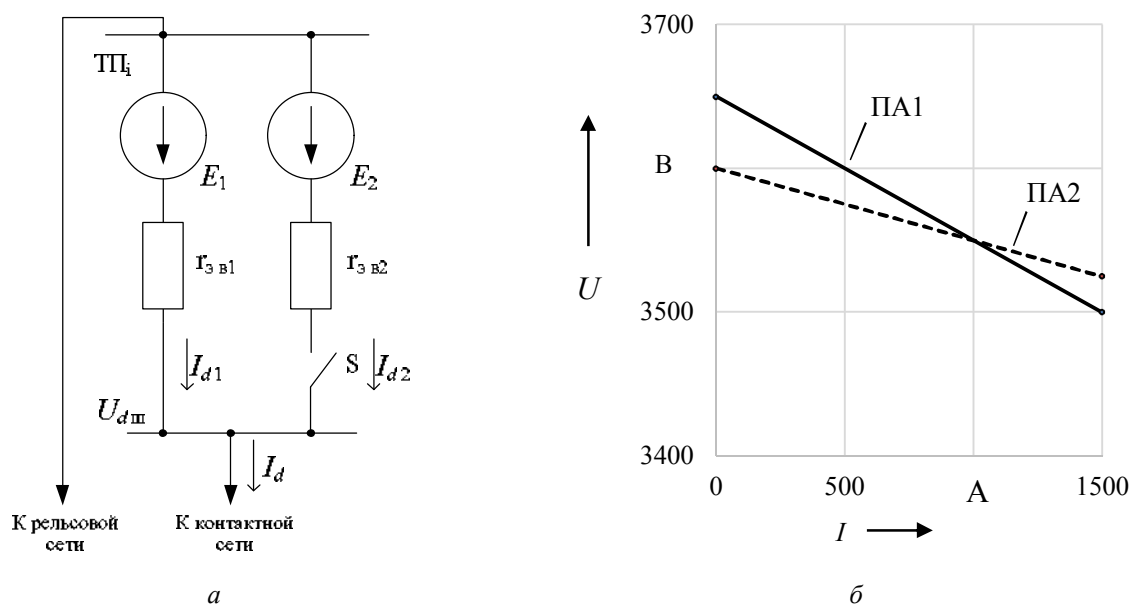


Рисунок 1 – Схема замещения тяговой подстанции с неуправляемыми выпрямителями и устройствами АВОР

При выполнении имитационного моделирования указанная схема замещения позволяет учесть в расчетах различие внешних характеристик преобразовательных агрегатов (ПА) (рисунок 1, б) и определить ток и напряжение на шинах подстанции, потери мощности и электроэнергии с учетом их одиночной или параллельной работы.

Дополнительными параметрами для расчета показателей и построения модели тяговой подстанции с АВОР являются номинальные токи преобразователей, ток уставки включения/отключения резерва, время задержки включения/отключения резерва [13].

Фрагмент алгоритма расчета энергетических показателей и показателей нагрузочной способности с устройством АВОР приведен на рисунке 2.

Указанный алгоритм является базовым для формирования модифицированных алгоритмов расчетов в условиях увеличения количества преобразовательных агрегатов до трех, изменения уставок по току включения/отключения и времени, использования показателя скорости нарастания тока нагрузки и др.

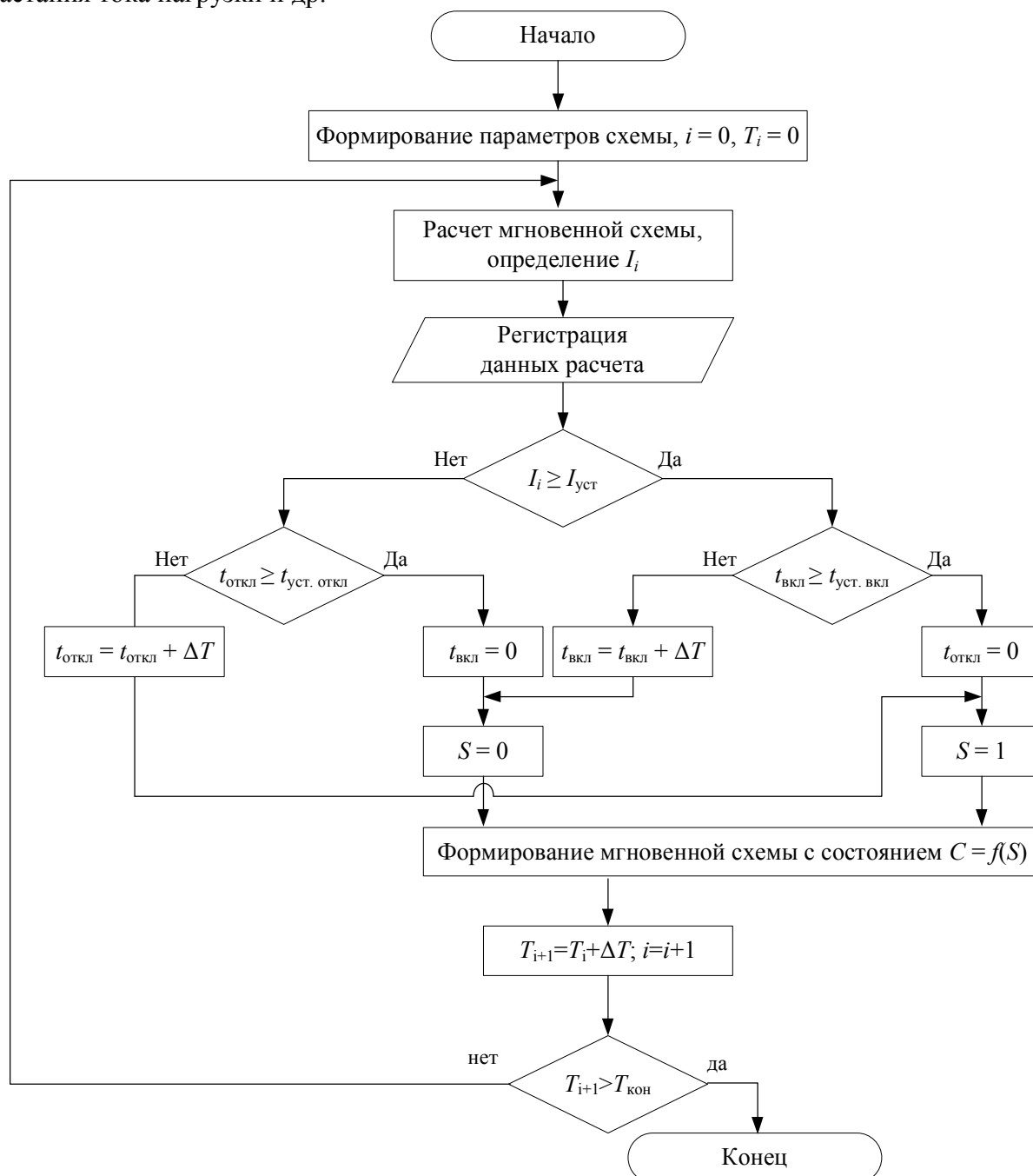


Рисунок 2 – Фрагмент алгоритма расчета показателей работы с автоматикой включения/отключения резерва на подстанциях

Порядок расчета показателей с устройством накопления электроэнергии. Моделирование работы устройств накопления электроэнергии основано на определении включенного и отключенного состояния и расчета по зарядным и разрядным характеристикам с учетом энергоемкости и допустимых режимов работы [14]. К основным настройкам и характеристикам моделей устройств накопления электроэнергии относятся следующие: пороговые значения зарядного и разрядного напряжений, ограничения по току в режимах заряда и разряда с учетом нагрузочной характеристики контактной сети, номинальная энергоемкость, допустимая глубина разряда.

Отличием указанной модели от рассмотренной выше будет являться изменение ее структуры, предусматривающей две ветви, соответствующие режимам работы (заряд и разряд), нелинейные сопротивления ветвей, соответствующие характеристикам, учет параметров контактной сети при ограничении зарядной характеристики, различные номинальные токи режимов, энергоемкость и допускаемая глубина разряда. При уточнении формирования модели уточняются зарядные и разрядные характеристики. Для режима заряда уточняется протокол: CC-CV, MCC-CM, CP-CV, импульсная и бустерная зарядка, VCP [15, 16].

Для проведения расчетов для установившихся режимов указанные модели должны учитывать характер зарядной характеристики с учетом нагрузочной характеристики контактной сети [17, 18]. Зарядный ток устройства накопления электроэнергии, определяемый на основе допустимого падения напряжения в контактной сети, должен удовлетворять неравенству:

$$I_{з\max} \leq \frac{U_{\max} - U_{\min}}{r_{к.с}}, \quad (5)$$

где $U_{\max}$ – максимальное напряжение на шинах тяговой подстанции или линейного устройства с учетом рекуперативного торможения электроподвижного состава;

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

$r_{к.с}$ – активное сопротивление контактной сети, определяемое для режима заряда.

При линейном увеличении тока заряда, ограниченного нагрузочной характеристикой контактной сети, до номинального значения ток будет определяться в зависимости от уровня напряжения:

$$I_{zi} = \begin{cases} 0, U_{ш i} < U_{\min}; \\ \frac{U_{ш i} - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot I_{\max}, U_{\min} < U_{ш i} < U_{\max}; \\ I_{\max}, U_{ш i} > U_{\max}, \end{cases} \quad (6)$$

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

Ток в режиме разряда определяется аналогично. Изменение сопротивления устройства, определяемое линейной зарядной характеристикой, описывается кусочно-нелинейной функцией и рассчитывается в соответствии с диапазонами напряжения на шинах, к которому оно подключено.

Схема замещения системы накопления (СНЭ) для проведения расчетов содержит в себе две ветви, соответствующие режиму заряда и разряда (рисунок 3, а). Ветвь разряда подключается ключом S_1 и включает в себя источник ЭДС E_1 , соответствующий напряжению разомкнутой цепи накопителя, переменное сопротивление цепи разряда $r_{зп1}$, счетчик количества электричества или ватт-часов Р11. Ветвь заряда содержит аналогичные элементы: ключ управления S_2 , переменное сопротивление цепи заряда $r_{зз1}$, счетчик количества электричества или ватт-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

часов PI2. Сопротивление ветвей цепи разряда и заряда является нелинейной величиной, зависит от напряжения на шинах, состава оборудования и задается в соответствии с характеристиками системы накопления по выражениям (7). Графики изменения сопротивления и тока СНЭ в зависимости от уровня напряжения приведены на рисунке 3, б.

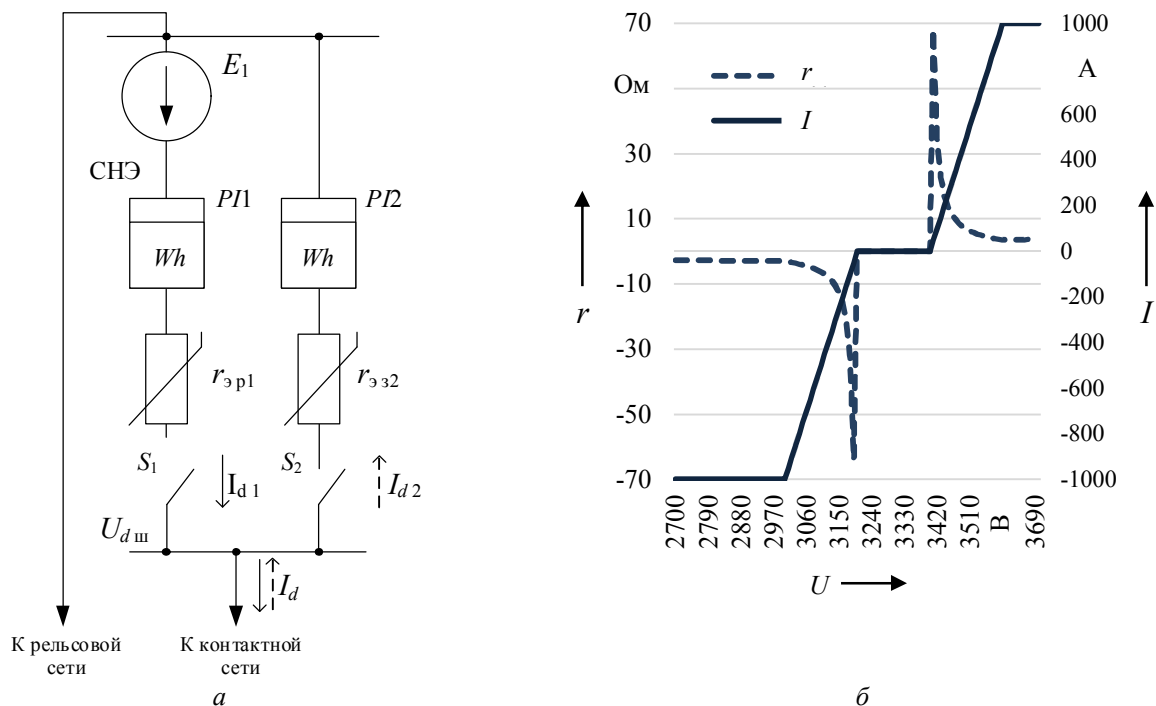


Рисунок 3 – Схема замещения устройства накопления

Для зарядной характеристики (6) сопротивление определяется следующим образом:

$$r_{\text{э}} = \begin{cases} U_{\text{ш } i} \geq U_{\text{max } 3} : I_{\text{max } 3}; \\ U_{\text{min } 3} < U_{\text{ш } i} < U_{\text{max } 3} : \frac{U_{\text{max } 3} - U_{\text{min } 3}}{U_{\text{ш } i} - U_{\text{min } 3}} \frac{U_{\text{ш } i}}{I_{\text{max } 3}}; \\ U_{\text{max } p} \leq U_{\text{ш } i} \leq U_{\text{min } 3} : \infty; \\ U_{\text{min } p} < U_{\text{ш } i} < U_{\text{max } p} : \frac{U_{\text{max } p} - U_{\text{min } p}}{U_{\text{ш } i} - U_{\text{min } p}} \frac{U_{\text{ш } i}}{I_{\text{max } p}}; \\ U_{\text{ш } i} < U_{\text{min } p} : I_{\text{max } p}. \end{cases} \quad (7)$$

Алгоритм расчета показателей работы системы тягового электроснабжения с устройством накопления строится с учетом следующих положений. Управление режимами работы СНЭ осуществляется по уровню напряжения на шинах устройства, к которому он подключен. В зависимости от уровня напряжения осуществляется управление ключами S_1 и S_2 , которые включаются поочередно. Сопротивление ветви заряда или разряда определяется по выражениям (7). Смена положения ключей по уровню напряжения осуществляется с учетом степени заряженности, рассчитываемой с помощью счетчика ватт-часов. Фрагмент расчета показателей с учетом режимов работы СНЭ приведен на рисунке 4, где в качестве упрощения не приведена часть алгоритма, определяющая продолжительность режимов и переключение ключей управления с учетом уровня напряжения.

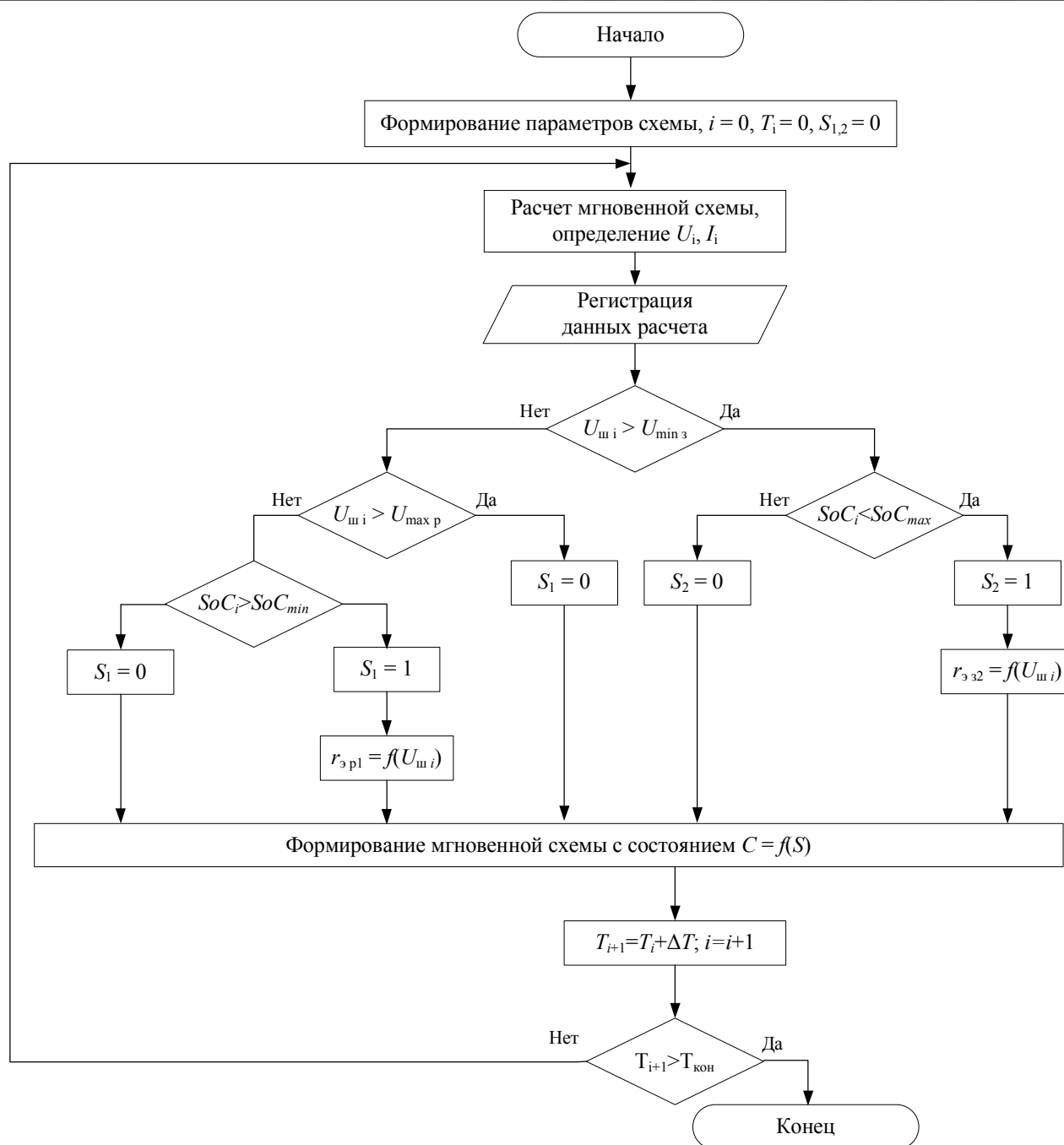


Рисунок 4 – Фрагмент алгоритма расчета показателей работы с устройством накопления электроэнергии

Для гибридных устройств накопления, содержащих два различных вида накопителя электроэнергии, например, электрохимического и электрического вида, приведенная схема замещения (см. рисунок 3) и алгоритм расчета (см. рисунок 4) соответственно дополняются ветвями и блоками, позволяющими учесть совместную работу накопителей с различными характеристиками.

Аналогичным образом для выполнения расчетов по определению показателей работы системы тягового электроснабжения формируются схемы замещения и алгоритмы расчета, учитывающие условия и режимы работы различных регулируемых устройств (вольтодобавочных устройств, устройств бесконтактного автоматического регулирования напряжения, пунктов преобразования напряжения, регулируемых устройств компенсации реактивной мощности, автоматики управления режимами работы устройств и др.).

При совершенствовании методов расчета второй группы для решения задач установившихся режимов одним из ключевых положений является порядок определения нагрузки и ординаты нахождения электроподвижного состава в заданный момент времени. Решение указанной задачи привело к появлению методов расчета, в которых стадии тяговых расчетов и расчетов показателей работы системы тягового электроснабжения не разделяются. Это позволяет учесть изменение напряжения на токоприемнике электроподвижного состава и выполнить расчет нагрузки.

Недостатком указанного способа расчета является повышение вычислительной сложности алгоритма расчета. Одним из вариантов решения рассматриваемой задачи является применение метода расчета, основанного на базе данных тяговых расчетов, выполненных для различных скоростей движения и напряжений на токоприемнике для рассматриваемого участка. Указанное разделение этапов расчета позволяет существенно упростить алгоритм расчета и сохранить приемлемую точность. Ранее было отмечено, что уровень напряжения на токоприемнике электропоезда ввиду возможности регулирования силы тяги не оказывает существенного влияния на техническую скорость и время следования на участке железной дороги, изменение которых для различных уровней напряжения не превышает 1,5 %. Указанные расхождения результатов расчета в части отклонения скорости и ординаты получено для граничных значений напряжения от значений, полученных для номинального напряжения [7]. Указанная точность расчета достаточна для определения показателей и выбора параметров оборудования системы тягового электроснабжения.

Отмеченные особенности расчетов позволяют модифицировать известные методы расчета показателей системы тягового электроснабжения в установившихся режимах для снижения вычислительной сложности. В основе существующих методов лежит метод расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения, основанный на результатах решения мгновенных схем, нагрузка для которых определяется на основе предварительно выполненных тяговых расчетов с заданным напряжением на токоприемнике [19].

Недостатком указанного способа является относительно высокая погрешность расчетов, связанная с принятым допущением о постоянном значении напряжения на токоприемнике электроподвижного состава в течение поездки. Указанный способ приводит к относительно высокой погрешности в расчетах при определении энергетических показателей вследствие изменения напряжения в широких пределах. Совершенствование в части пошагового выполнения тяговых и электрических расчетов привело к появлению способа расчета, в котором тяговый расчет на каждом следующем шаге выполняется на основе расчетного уровня напряжения, полученного при электрическом расчете [20]. Данный способ характеризуется высокой вычислительной сложностью, пропорционально возрастающей при увеличении размеров движения и применении в системе тягового электроснабжения регулируемых устройств, изменяющих свои параметры в зависимости от уровня напряжения в контактной сети, нагрузки или других показателей. Предложенный способ имеет свои недостатки и не позволяет учесть особенности работы регулируемых устройств.

Развитие рассматриваемого способа расчета выполнено в части учета работы системы тягового электроснабжения с устройствами накопления электроэнергии [21].

Совершенствование метода расчета показателей системы тягового электроснабжения в установившихся режимах связано со следующими направлениями: дополнение схемы замещения системы тягового электроснабжения схемами и алгоритмами работы регулируемых устройств; использование базы данных тяговых расчетов при проведении вычислений показателей работы системы тягового электроснабжения.

Примером реализации первого направления являются рассмотренные в статье схемы и алгоритмы работы регулируемых устройств. Для реализации второго направления предлагается следующий порядок расчета.

Исходя из допустимого диапазона напряжений на токоприемнике в диапазоне от $U_{\min}$ до $U_{\max}$ перед проведением электрических расчетов формируется база данных тяговых расчетов

для вариантов, отличающихся уровнем напряжения на токоприемнике и технической скоростью движения поезда. Полученный массив поездок формирует базу данных по маркерам напряжения, скорости и ординаты, которая в дальнейшем используется для проведения электрического расчета. Тяговые расчеты проводятся для допустимых значений уровня напряжения на токоприемнике и скоростей движения, изменяющихся с заданным шагом ΔU и ΔV соответственно.

База данных тяговых расчетов представляет собой массив данных размером $n \times m$, в каждой ячейке которых хранится ряд данных тяговых расчетов, содержащих информацию об уровне напряжения и скорости движения, ординате и токе поезда.

Количество строк n и столбцов m массива данных определяется по выражениям соответственно:

$$\begin{aligned} n &= \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\Delta U}; \\ m &= \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\Delta V}. \end{aligned} \quad (8)$$

Формирование базы данных осуществляется для каждого типа электроподвижного состава, массы и других параметров поезда в обоих направлениях движения.

На каждом шаге электрического расчета для единицы электроподвижного состава выбирается тяговый расчет, который по уровню напряжения и скорости движения наиболее близок к расчетным значениям. По данным расчета определяется ток поезда. Нагрузка поезда принимается для расчета мгновенной схемы, по результатам решения которой определяются токи во всех ветвях схемы на текущем шаге и напряжения во всех узлах. Расчетный уровень напряжения на токоприемниках используется на следующем шаге для выбора тягового расчета, наиболее близкого к расчетному значению.

На первом шаге расчетов (рисунок 5) напряжение на токоприемнике каждой единицы электроподвижного состава U_1 принимается равным номинальному значению $U_{\text{ном}}$:

$$U_1 = U_{\text{ном}}. \quad (9)$$

На втором и последующем шагах электрических расчетов напряжение на токоприемнике определяется на основе нагрузки поезда, находящегося на определенной ординате j :

$$I_i = f(j, U_m, V_n), \quad (10)$$

определяемой по тяговому расчету, выбираемому по наиболее близким к расчетным значениям напряжению U_n и скорости V_m .

Напряжение U_n и скорость V_m тягового расчета на i -м шаге выбираются по критерию минимального отклонения расчетных значений U_i и V_i от значений тягового расчета соответственно:

$$|U_n - U_i| \rightarrow \min; \quad (11)$$

$$|V_m - V_i| \rightarrow \min. \quad (12)$$

Ток поезда определяется из массива данных соответствующего расчета для определенных n и m значений для j -й ординаты в расчетный момент времени на i -м шаге расчетов:

$$\forall n, m, j, i \rightarrow I_{ijmn} . \quad (13)$$

На начальном этапе расчетов выполняется подготовка расчетных данных и параметров схемы замещения системы тягового электроснабжения (блок 1). На следующем шаге реализации способа выполняются тяговые расчеты для формирования базы данных по заданным диапазонам изменения напряжения на токоприемнике и скорости движения (блок 2). Определение показателей работы начинается с начального времени расчетов (блок 3), являющегося точкой отсчета, и определения ординаты j электроподвижного состава в границах расчетного участка (блок 4). На следующем этапе выполняется расчет электрических величин на основе мгновенных схем (блок 5), в ходе которого определяются напряжения на токоприемниках электроподвижного состава. Результаты расчетов по мгновенной схеме на i -м шаге расчетов записываются для последующего расчета интегральных показателей работы (блок 6). Выбор тягового расчета в зависимости от уровня напряжения и скорости выполняется в блоке 7. По результатам выбора определяется нагрузка поезда (блок 8), используемая на следующем шаге расчетов. Блок 9 увеличивает расчетное время на шаг расчетов, для последующей проверки окончания расчетов (блок 10). На заключительном этапе выполняется расчет интегральных энергетических показателей (блок 11) на основе записанных данных расчета.

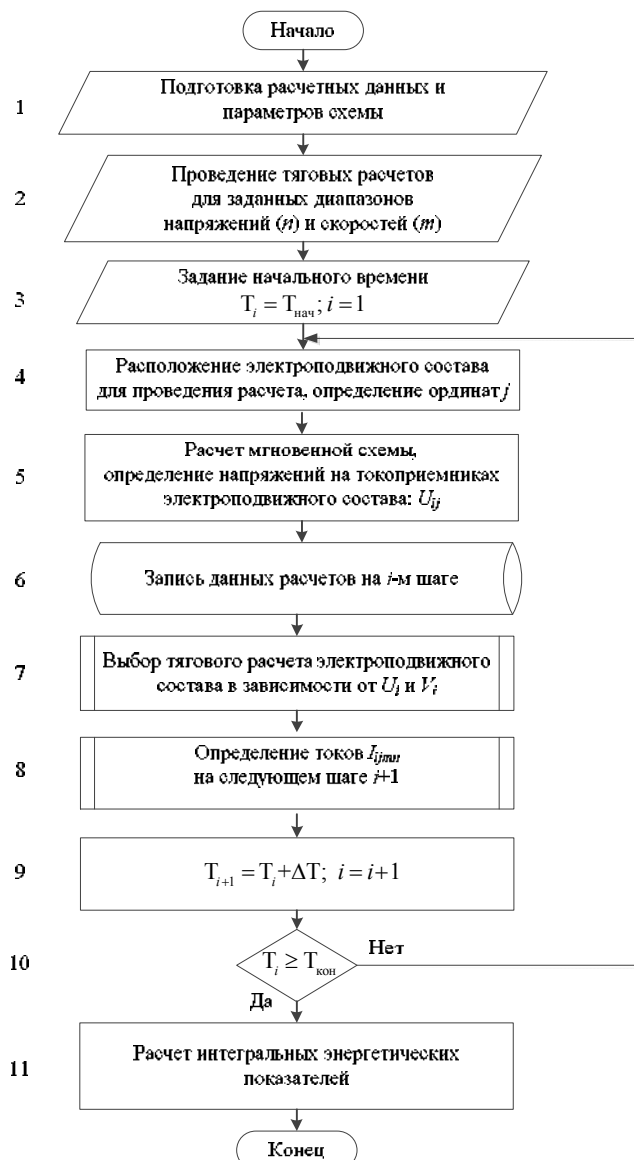


Рисунок 5 – Алгоритм расчета показателей работы системы тягового электроснабжения

Предложенный способ позволяет определить энергетические показатели системы тягового электроснабжения на основе сформированного массива данных тяговых расчетов с учетом изменяющихся нагрузки и напряжения на токоприемнике электроподвижного состава.

Перспективными исследованиями в области совершенствования методов расчета являются разработка и дополнение схемы замещения системы тягового электроснабжения следующими устройствами: автоматического бесконтактного регулирования напряжения; управляемыми выпрямительными и инверторными преобразователями; автоматического регулирования напряжения под нагрузкой силовых понижающих трансформаторов; регулируемые средствами компенсации реактивной мощности (статическими компенсаторами и дискретно регулируемые устройствами); вольтодобавочными трансформаторами; пунктами преобразования напряжения и др.

Представленные алгоритмы расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения с регулируемые устройствами позволяют реализовать расчет показателей работы системы тягового электроснабжения с учетом работы регулируемых устройств. Разработаны модели устройств режимной автоматики включения/отключения резерва и накопления электроэнергии, предназначенные для расчета установившихся режимов. Для разработанных моделей представлены схемы замещения и алгоритмы, реализующие режимы работы рассмотренных устройств. Разработан усовершенствованный метод расчета показателей тягового электроснабжения, позволяющий учитывать нагрузку электроподвижного состава в условиях работы регулируемых устройств.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00002, <https://rscf.ru/project/22-29-00002/>».

Список литературы

1. Марский, В. Е. Определение пропускной способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения / В. Е. Марский. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – № 1. – С. 40–46.
2. Крюков, А. В. Энергетическая эффективность перспективных систем тягового электроснабжения / А. В. Крюков, А. В. Черепанов, И. А. Фесак. – Текст : непосредственный // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Иркутск, 20–24 апреля 2021 года. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. – С. 220–224.
3. Бадер, М. П. Энергосберегающие технологии интеллектуального железнодорожного транспорта / М. П. Бадер, Ю. М. Иньков, Е. Н. Розенберг. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 4. – С. 36–43.
4. Незевак, В. Л. Мониторинг выполнения норм удельной рекуперации в границах производственной зоны мониторинга участка постоянного тока / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 2 (22). – С. 87–96.
5. Герман, Л. А. Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 1. – С. 16–21.
6. Незевак, В. Л. Совершенствование методов и алгоритмов расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения / В. Л. Незевак, В. Т. Черемисин. – Текст : непосредственный // Материалы междунар. науч.-практ. конф. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 204–210.
7. Незевак, В. Л. Анализ характеристик тяговой нагрузки на скоростных участках для определения условий работы устройств накопления электроэнергии / В. Л. Незевак,

А. Д. Дмитриев, С. С. Самолинов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 12–29.

8. Анализ программного обеспечения для моделирования электрификации железных дорог / А. А. Королев, Д. С. Плетнев, М. Н. Белов [и др.]. – Текст : непосредственный // Наукосфера. – 2022. – № 1-1. – С. 175–181.

9. Аржанников, Б. А. Влияние регулирования напряжения на пропускную способность электрифицированных участков постоянного тока и на расход электрической энергии на тягу поездов / Б. А. Аржанников, И. А. Баева. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2017. – № 4 (55). – С. 71–75.

10. Черемисин, В. Т. Оценка регулирования напряжения на стороне высшего напряжения тяговых подстанций в аспекте энергетической эффективности / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2017. – № 3 (54). – С. 75–81.

11. Крюков, А. В. Программный комплекс для имитационного моделирования систем тягового электроснабжения / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2006. – № 1 (6). – С. 103–108.

12. Комяков, А. А. Оценка эффективности параллельной работы выпрямительных преобразователей тяговых подстанций на основе данных измерительных систем / А. А. Комяков, В. В. Эрбес, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 2 (46). – С. 137–143.

13. Каштанов, А. Л. Управляющий алгоритм системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / А. Л. Каштанов, Ю. В. Плотников, А. В. Пономарев. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 512–518.

14. Незевак, В. Л. Моделирование режимов нагрузки на шинах постов секционирования при работе в системе тягового электроснабжения накопителей электроэнергии / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4 (68). – С. 159–170.

15. Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X. and all. (2019). Lithium-Ion Battery Fast Charging: A Review. *eTransportation*, 2019, №100011. pp/ 1-28. doi:10.1016/j.etrans.2019.100011.

16. Незевак, В. Л. О сравнении энергетических параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81. – № 1. – С. 38–52.

17. Nezevak, V., & Shatokhin, A. (2019). Interaction's Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019, pp. 1-10. doi:10.1109/uralcon.2019.8877672.

18. Nezevak V., Cheremisin V., Shatokhin A. Electric Energy Storage Units Applicability Assessment of Different Kinds in the Conditions of Moscow Central Ring. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, № 1115 AISC, pp. 42-51. doi:10.1007/978-3-030-37916-2_5.

19. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт. – 1982. – 528 с. – Текст : непосредственный.

20. Вильгельм, А. С. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока / А. С. Вильгельм, А. А. Комяков, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19). – С. 54–65.

21. Патент № 2 690 126 Российская Федерация, МПК В60М 3/00 (2006.01), В60L 3/12 (2006.01), G01R 21/133 (2006.01). Способ определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения : № 2016119647/11 : заявлено 23.07.2018 : опубликовано 30.05.2019. Бюл. № 16. / Незевак В. Л., Черемисин В. Т., Шатохин А. П. – Текст : непосредственный.

1. Marskii V.E. Determination of the capacity of railway sections by traction power supply devices. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*, 2014, no. 1, pp. 40-46 (In Russian).
2. Kriukov A.V., Cherepanov A.V., Fesak I.A. [Energy efficiency of advanced traction power supply systems]. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniia energii v usloviakh Sibiri : materialy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Improving the efficiency of energy production and use in Siberia : materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2021, pp. 220-224 (In Russian).
3. Bader M.P., In'kov Iu.M., Rozenberg E.N. Energy-saving technologies of intelligent railway transport. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2012, no. 4, pp. 36-43 (In Russian).
4. Nezevak V.L., Shatokhin A.P. The monitoring of the execution of the specific regeneration's norms within the ambit of the arbitrary monitoring's area of the DC area. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 2(22), pp. 87-96 (In Russian).
5. German L.A., Kishkurno K.V. Comparison of methods for calculating the traction power supply system with different methods of accounting for the parameters of the external network. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*, 2013, no. 1, pp. 16-21 (In Russian).
6. Nezevak V.L., Cheremisin V.T. [Improvement of methods and algorithms for calculating energy indicators of traction power supply system]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Materials of the international scientific and practical conference]. Omsk, 2020, pp. 204-210 (In Russian).
7. Nezevak V.L., Dmitriev A.D., Samolinov S.S. Analysis of the characteristics of the traction load on high-speed sections to determine the operating conditions of power storage devices. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2(50), pp. 12-29 (In Russian).
8. Korolev A.A., Pletnev D.S., Belov M.N. and others. Analysis of software for modeling railway electrification. *Naukosfera – Sciencosphere*, 2022, no. 1-1, pp. 175-181 (In Russian).
9. Arzhannikov B.A., Baeva I.A. The effect of voltage regulation on the capacity of electrified DC sections and on the consumption of electric energy for train traction. *Transport Urala – Transport Of The Urals*, 2017, no. 4(55), pp. 71-75 (In Russian).
10. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Erbes V.V. Evaluation of voltage regulation on the high voltage side of traction substations in the aspect of energy efficiency. *Transport Urala – Transport Of The Urals*, 2017, no. 3(54), pp. 75-81 (In Russian).
11. Kriukov A.V., Zakariukin V.P. Software package for simulation of traction power supply systems. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2006, no. 1(6), pp. 103-108 (In Russian).
12. Komyakov A.A., Erbes V.V., Nezevak V.L. Evaluation of the efficiency of parallel operation of rectifier converters of traction substations based on data from measuring systems. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2015, no. 2(46), pp. 137-143 (In Russian).
13. Semenov A.P., Lakin I.K., Khromov I.Iu. Information entropy of locomotive technical diagnostics systems. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2020, no. 3(67), pp. 42-53 (In Russian).
14. Nezevak V.L. Modeling of load modes on the tires of partitioning posts when working in the traction power supply system of electric power storage devices. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – Bulletin of the Rostov State University of Railways*, 2017, no. 4(68), pp. 159-170 (In Russian).

15. Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X. and all. (2019). Lithium-Ion Battery Fast Charging: A Review. *eTransportation*, 2019, №100011. pp/ 1-28. doi:10.1016/j.etrans.2019.100011.
16. Nezevak V.L. Comparison of energy parameters of electric power storage systems for DC and AC traction power supply systems. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*, 2022, vol. 81, no. 1, pp. 38-52 (In Russian).
17. Nezevak, V., & Shatokhin, A. (2019). Interaction's Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019, pp. 1-10. doi:10.1109/uralcon.2019.8877672.
18. Nezevak V., Cheremisin V., Shatokhin A. Electric Energy Storage Units Applicability Assessment of Different Kinds in the Conditions of Moscow Central Ring. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, № 1115 AISC, pp. 42-51. doi:10.1007/978-3-030-37916-2_5.
19. Markvardt K.G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* [Electricity supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982, 528 p. (In Russian).
20. Vilgelm A.S., Komyakov A.A., Nezevak V.L. Improvement in the calculation methods for the traction power system. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 3(19), pp. 54-65 (In Russian).
21. Nezevak V.L., Cheremisin V.T., Shatokhin A.P. *Patent RU 2690126*, 30.05.2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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.

Дмитриев Александр Дмитриевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7-908-117-96-71.

E-mail: alexandrorado@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Незевак, В. Л. Совершенствование методов и алгоритмов расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения с регулирующими устройствами / В. Л. Незевак, А. Д. Дмитриев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 19 – 34.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: nezevakwl@mail.ru.

Dmitriev Alexander Dmitrievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: +7-908-117-96-71.

E-mail: alexandrorado@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nezevak V.L., Dmitriev A.D. Improvement of methods and algorithms for calculating energy indicators of traction power supply system with adjustable devices. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 3 (51), pp. 19-34 (In Russian).

УДК 62-192

А. К. Пляскин, В. А. Бутусова, А. С. Кушнирук

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

ОПТИМИЗАЦИЯ НОРМ МЕЖРЕМОНТНЫХ ПРОБЕГОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ СЕРИИ 2(3,4)ЭС5К НА ОСНОВЕ ОТКАЗОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. Система планово-предупредительного ремонта и обслуживания обеспечивает работоспособное состояние тягового подвижного состава (ТПС). Предметом исследования выступает распределение отказов тяговых электродвигателей по причине пробоя изоляции на территории СЛД Дальневосточное и Приморское за 2019 год. Целью исследования является определение возможности оптимизации норм межремонтных пробегов по рассматриваемому узлу для снижения количества заходов локомотивов на неплановый ремонт. В работе рассматривается нормальный закон распределения отказов тяговых электродвигателей (ТЭД), определение коэффициентов Старджесса, Пирсона и другие методы математической статистики и теории надежности технических систем. В статье определен элемент, лимитирующий нормы межремонтных пробегов тяговых электродвигателей, получено теоретическое распределение отказов тяговых электродвигателей по причине снижения сопротивления изоляции его обмоток. В рамках исследования проведена оптимизация норм межремонтных пробегов по условиям проведения ТР-1 относительно тяговых электродвигателей. В результате анализа причин отказов установлено, что большее количество случаев постановки локомотивов на неплановый ремонт приходится на первый интервал пробега локомотивов по причине некачественного проведения диагностики при ТР-1 по факту измерения сопротивления обмоток изоляции. Большинство отказов, приходящихся на первый период эксплуатации, не связано с изменением надежности рассматриваемого узла. При рассмотрении двух нормальных пиков отказов, приходящихся на интервалы наработки 14 – 21 и 28 – 35, обуславливается необходимость оптимизации норм межремонтных пробегов. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования варианта оптимизации норм межремонтных пробегов для корректировки норм периодов проведения технического обслуживания и ремонта в рамках конкретных депо.

Ключевые слова: безотказность, тяговые электродвигатели, распределение отказов, техническое состояние, межремонтные пробеги.

Artem K. Plyaskin, Valeriia A. Butusova, Alexey S. Kushniruk

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

OPTIMIZATION OF STANDARDS OF REPAIR RUNS IN LOCOMOTIVES SERIES 2(3,4)ES5K ON THE BASIS OF FAILURES OF THE TRACTION MOTOR

Abstract. System of preventive maintenance and maintenance of the operable condition of the traction rolling stock. The subject of a global study of failures of traction motors in the event of a breakdown on the territory of the service locomotive depot «Dalnevostochnoye» and «Primorskoye» for 2019. The purpose of the study is to determine the possible norms of overhaul runs for the considered node in order to achieve the optimal number of locomotive calls for unscheduled repairs. In the work, the correct law of distribution of traction motor (TED) failures, the determination of the Sturges, Pearson coefficients and other methods of mathematical statistics and the theory of justification of systems. The article defines an element that limits the norms of overhaul runs of traction motors; the theoretical distribution of traction motor failures due to a decrease in the insulation resistance of its windings has been obtained. As part of the study, the optimization of the norms of overhaul runs was carried out according to the conditions for conducting maintenance regarding the traction motor. As a result of the analysis of the causes of failures, it was found that more cases of placing locomotives for unscheduled repairs occur in the first mileage interval of locomotives due to poor quality diagnostics at TR-1 upon measuring the resistance of the insulation windings. Most of the failures occurring in the first period of operation are not associated with a change in the reliability of the considered node. When considering two normal peaks of failures, falling on the operating time intervals 14-21 and 28-35, the necessity of optimizing the norms of overhaul runs is determined. When considering two normal peaks of failures, falling on the operating time intervals 14-21 and 28-35, the necessity of optimizing the norms of overhaul runs is determined. The practical significance of the study lies in the possibility of using the option of optimizing the norms of overhaul runs to adjust the norms of maintenance and repair periods within specific depots.

Keywords: reliability, traction motors, distribution of failures, technical condition, overhaul runs.

Одним из показателей надежности технологической системы в процессе эксплуатации является качественное обслуживание и своевременное проведение профилактических работ по поддержанию работоспособности технологической системы. Планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта узлов локомотивов представляет одной из важных задач управления техническим состоянием узлов тягового подвижного состава оптимальных значений норм межремонтного пробега.

Определение норм межремонтных пробегов выполняется на основе результатов анализа показателей надежности технических узлов и агрегатов, а также на основе экономических составляющих обслуживания и ремонта локомотивов. На сети российских железных дорог установление межремонтных пробегов осуществляется на основании распоряжения ОАО «РЖД» 2796р. Основным недостатком такого подхода является различие условий эксплуатации на участках железных дорог, условий обслуживания и ремонта, что в конечном счете воздействует на отклонение в расчете показателей надежности узлов локомотивов и на их нерациональное обслуживание или ремонт, а в некоторых случаях и на их отказы. Данные условия влекут за собой финансовые издержки и определяют актуальность и значимость рассматриваемой проблемы.

Для решения проблемы надежности узлов локомотивов авторами предлагается модель управления техническим состоянием локомотивного парка, базирующаяся на анализе показателей безотказности узлов локомотивов, исследовании гипотез о распределении отказов, установлении закона их распределения и оптимизации норм межремонтных пробегов относительно отдельных ремонтных предприятий.

Рассмотрим распределение отказов тяговых электродвигателей электровоза серии 2(3, 4)ЭС5К по причине пробоя изоляции обмоток и проведем анализ показателей их безотказности. В таблице 1 представлены данные об отказах ТЭД на Дальневосточной железной дороге за 2019 г. В ней l_i – i -й интервал наработки на отказ l ; $\sum r(\Delta l_i)$ – практическое количество отказов на рассматриваемом расчетном i -м интервале наработки.

Таблица 1 – Распределение отказов ТЭД локомотивов в сервисных локомотивных депо Дальневосточное и Приморское

Параметр	Количество отказов на интервале наработки						
l_i , тыс. км	0 – 7	7 – 14	14 – 21	21 – 28	28 – 35	35 – 42	42 – 49
$\sum r(\Delta l_i)$	8	5	8	7	9	4	4

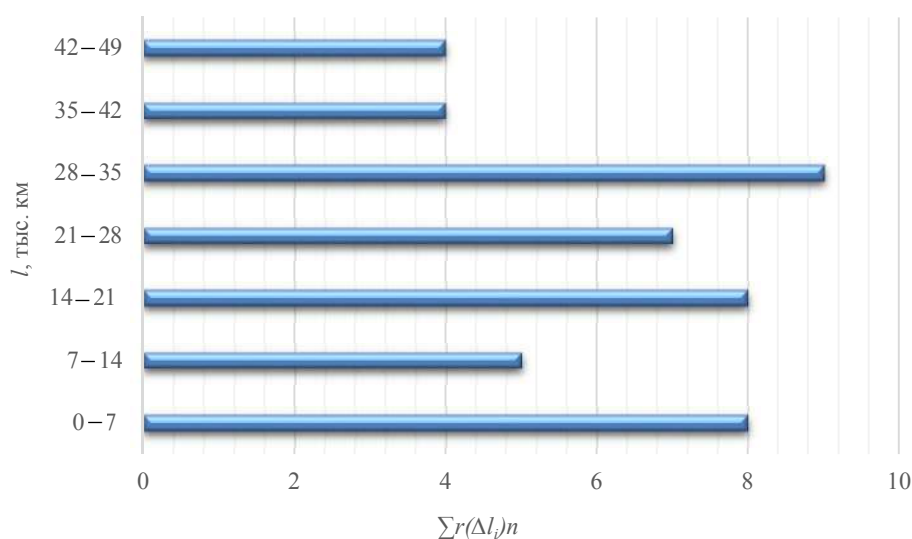


Рисунок 1 – Графическое представление распределения отказов ТЭД локомотивов в сервисных локомотивных депо Дальневосточное и Приморское

Наработка разбита на семь интервалов в соответствии с законом Старджесса [1]:

$$\Delta l_1 = \frac{l_{\max} - l_{\min}}{1 + 3,322 \cdot \lg \sum r}, \quad (1)$$

где $l_{\max}$ – максимальная наработка до отказа, которая на основании статистических данных об отказах составляет 47,71 тыс. км;

$l_{\min}$ – минимальная адекватная наработка до отказа, которая на основании статистических данных составляет 0,68 тыс. км;

$\sum r$ – общее количество отказов по причине выхода из строя ТЭД (пробой изоляции), которое на основании данных таблицы 1 составляет 45 отказов.

$$\Delta l_1 = \frac{47,71 - 0,68}{1 + 3,322 \cdot \lg 45} = 7 \text{ тыс. км.}$$

Характер процессов выхода из строя ТЭД локомотива по причине пробоя изоляции имеет два нормальных пика распределения, которые приходятся соответственно на третий и пятый интервалы наработки с пробегом 14 – 21 тыс. км и 28 – 35 тыс. км. Первый экспоненциальный пик приходится на период наработки 0 – 7 тыс. км. В этот период наблюдается значительное количество отказов ТЭД по причине приработки после ремонта.

Произведем расчет основного показателя безотказности ТЭД – средней наработки на отказ по формуле:

$$L = \frac{\sum l}{\sum r}, \quad (2)$$

где $\sum l$ – сумма всех наработок до каждого отказа ТЭД вследствие пробоя изоляции, которая составляет (на основании статистических данных об отказах) 917,32 тыс. км.

Средняя наработка на отказ равна 22,37 тыс. км. На основании данного показателя можно сказать, что в среднем отказ ТЭД по причине пробоя изоляции происходит через каждые 22,37 тыс. км наработки, когда нормы межремонтных пробегов по целевому виду ремонта относительно данного узла и элемента с производством диагностических работ приходится на 50 тыс. км пробега. Данный факт обуславливает необходимость оптимизации норм межремонтных пробегов при условии, что данное распределение отказов подчиняется какому-либо закону распределения и не изменится с течением рассматриваемого периода времени. Для проверки данного условия необходимо произвести исследование гипотезы о нормальном распределении отказов, так как в целом распределение имеет нормальный вид.

Нормальное распределение характеризуется двумя статистическими параметрами – математическим ожиданием m , тыс. км, и среднеквадратическим отклонением S . Для определения математического ожидания необходимо перейти к вариационному ряду и вычислить выборочный средний интервал наработки Δl , тыс. км, который определяется по формуле:

$$\Delta l = \frac{\Delta l_1}{2}. \quad (3)$$

На основании значения выборочной средней интервала наработки Δl строится матрица зависимости средних выборочных интервалов наработки от количества отказов на них. При этом выборочные средние интервалы наработки $\Delta l_{\text{ср } i}$, тыс. км, определяются по формуле:

$$\Delta l_{\text{ср } i} = \Delta l_i - \Delta l, \quad (4)$$

где Δl_i – i -й расчетный интервал наработки, тыс. км пробега.

Для дальнейшего определения математического ожидания m , тыс. км, необходимо найти сумму произведений количества отказов на интервалах наработки $\sum r(\Delta l_i)$ на выборочные средние интервалы этих наработок $\Delta l_{\text{ср } i}$.

$$\sum_{i=1}^x \left(\sum r(\Delta l_i) \cdot \Delta l_{cp i} \right), \quad (5)$$

где x – последний рассматриваемый интервал наработки Δl_i ;

$\sum r(\Delta l_i)$ – количество отказов на рассматриваемом расчетном i -м интервале наработки, шт.
Математическое ожидание отказа m , тыс. км, определяется по формуле:

$$m = \frac{1}{\sum r} \cdot \sum_{i=1}^x \left(\sum r(\Delta l_i) \cdot \Delta l_{cp i} \right). \quad (6)$$

Для исследования гипотезы о нормальном распределении [2] помимо математического ожидания необходимо определить дисперсию S^2 и среднеквадратическое отклонение S наработки до отказа соответственно:

$$S^2 = \frac{1}{\sum r - 1} \cdot \sum_{i=1}^x [(m - \Delta l_i)^2 \cdot \sum r(\Delta l_i)]; \quad (7)$$

$$S = \sqrt{S^2}. \quad (8)$$

Результаты показателей исследования гипотезы о нормальном распределении отказов ТЭД представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты показателей исследования гипотезы о нормальном распределении отказов ТЭД

Показатель	Значение
Средний интервал наработки	3,5
Среднее значение наработки до отказа	26,21
Стандартная ошибка	1,74
Медиана	26,27
Стандартное отклонение	10,28
Математическое ожидание наработки до отказа	22,48
Дисперсия выборки наработки	105,58
Минимальное значение наработки до отказа	0,68
Максимальное значение наработки до отказа	47,71

Для расчета плотности распределения и определения теоретических отказов нормального распределения необходимо определить нормированные переменные b_i по формуле:

$$b_i = \frac{\Delta l_i - m}{S}. \quad (9)$$

Плотность нормированного нормального распределения $\phi(b_i)$ определяется по формуле:

$$\phi(b_i) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e\left(-\frac{b_i^2}{2}\right). \quad (10)$$

Значение теоретических отказов нормального распределения $\sum r_n(\Delta l_i)$ рассчитывается по уравнению:

$$\sum r_n(\Delta l_i) = \frac{\sum r \cdot \Delta l_i}{S} \cdot \phi(b_i). \quad (11)$$

На основании значений теоретических отказов нормального распределения можно определить принадлежность практического распределения отказов к нормальному закону по критерию Пирсона, который можно описать формулой:

$$\chi^2(\Delta l_i) = \frac{(\sum r(\Delta l_i) - \sum r_n(\Delta l_i))^2}{\sum r_n(\Delta l_i)}. \quad (12)$$

Распределение практических и теоретических отказов ТЭД электровозов серии 2(3, 4)ЭС5К по причине пробоя изоляции обмоток в сервисных локомотивных депо (СЛД) Дальневосточное и Приморское представлено на рисунке 2.

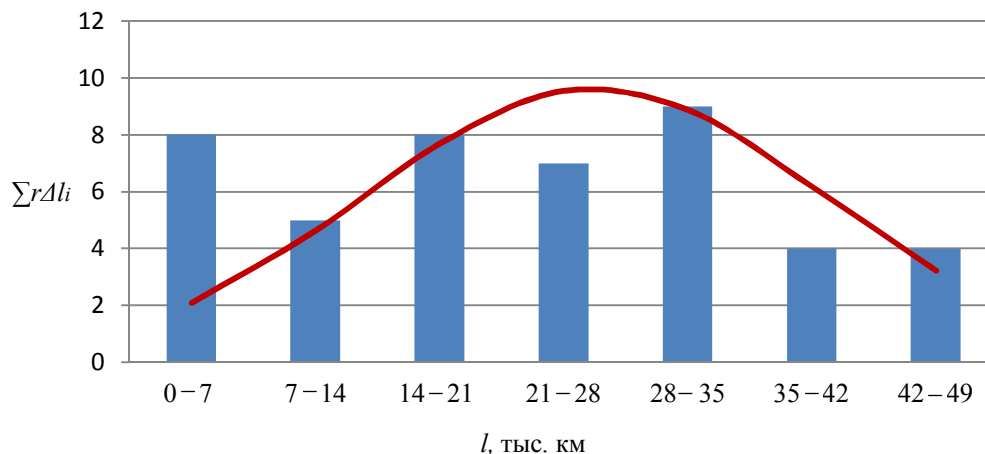


Рисунок 2 – Распределение практических и теоретических отказов ТЭД электровозов серии 2(3, 4)ЭС5К по причине пробоя изоляции обмоток в СЛД Дальневосточное и Приморское

Для вывода по соответствию практического распределения экспоненциальной модели необходимо определить сумму коэффициентов Пирсона $\sum \chi^2$ по всем интервалам наработки Δl_i :

$$\sum \chi^2 = \sum_{i=1}^x \chi^2(\Delta l_i) \quad (13)$$

и сравнить полученное значение с критическим коэффициентом Пирсона.

Если $\sum \chi^2$ больше $\chi^2_{\text{крит}}$, то практическое распределение не подчиняется экспоненциальному закону. Если $\sum \chi^2$ меньше или равно $\chi^2_{\text{крит}}$, то практическое распределение соответствует экспоненциальной модели, что позволяет произвести оптимизацию норм межремонтных пробегов. Коэффициент Пирсона для каждого интервала наработки представлен в таблице 3. Суммарное значение коэффициентов Пирсона 18,2, в то время как критический коэффициент Пирсона равен 9,49.

Таблица 3 – Результаты исследования гипотезы о нормальном распределении отказов ТЭД электровозов серии 2(3,4)ЭС5К по причине пробоя изоляции обмоток

Левые границы	Правые границы	$\Delta l_{\text{ср}, i}$	b_i	$\phi(b_i)$	$\sum r_n(\Delta l_i)$	$\sum r(\Delta l_i)$	$\sum_{i=1}^x \chi^2(\Delta l_i)$
0	7	4	0,0067	0,0468	2,1043	8	16,52
7	14	11	0,0148	0,1033	4,6507	5	0,03
14	21	18	0,0245	0,1712	7,7022	8	0,01
21	28	25	0,0303	0,2124	9,5584	7	0,68
28	35	32	0,0282	0,1975	8,8886	9	0,00
35	42	39	0,0197	0,1376	6,1938	4	0,78
42	49	46	0,0103	0,0719	3,2341	4	0,18

С учетом полученных результатов на основании критерия Пирсона:

$$\chi^2(\Delta l_2) = \frac{(5 - 3,367)^2}{3,367} = 0,79;$$

$$\sum \chi^2 = 3,76$$

можно сделать вывод о том, что распределение отказов не подчиняется нормальному закону, однако если учитывать влияние некачественного проведения диагностики при ТР-1 по факту измерения сопротивления обмоток изоляции, то большинство отказов, приходящихся на первый период эксплуатации после ТР-1 (первый интервал наработки $\Delta l_1 = 7$ тыс. км, где $\sum r(\Delta l_1) = 8$, когда максимальное количество отказов из рассматриваемых интервалов составляет $\sum r(\Delta l_5) = 9$), не связано с изменением надежности рассматриваемого узла. Поэтому при исключении из исследования распределения отказов первого интервала наработки $\Delta l_1 = 7$ тыс. км, теоретическая кривая примет вид, представленный на рисунке 3.

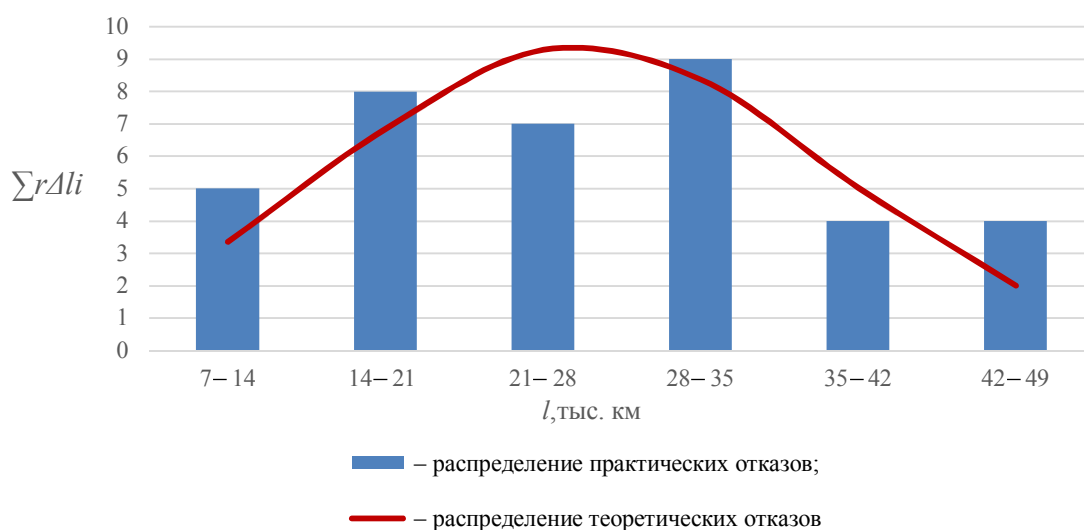


Рисунок 3 – Распределение практических и теоретических отказов ТЭД электровозов серии 2(3,4)ЭС5К по причине пробоя изоляции обмоток в СЛД Дальневосточное и Приморское при исключении из исследования первого интервала наработки

При этом расчетное значение коэффициента Пирсона составит 3,76, а критический коэффициент Пирсона составляет 5,992, что подтверждает соответствие практического распределения отказов нормальному закону. Статистические характеристики с учетом исключения первого интервала представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты исследования гипотезы о нормальном распределении отказов ТЭД электровозов серии 2(3, 4)ЭС5К по причине пробоя изоляции обмоток при исключении из исследования первого интервала наработки

Левые границы	Правые границы	$\Delta l_{ср i}$	b_i	$\phi(b_i)$	$\Sigma r_{н}(\Delta l_i)$	$\sum r(\Delta l_i)$	$\sum_{i=1}^x \chi^2(\Delta l_i)$
7	14	11	0,0130	0,0910	3,3670	5	0,79
14	21	18	0,0265	0,1853	6,8579	8	0,19
21	28	25	0,0359	0,2513	9,2985	7	0,57
28	35	32	0,0324	0,2268	8,3931	9	0,04
35	42	39	0,0195	0,1363	5,0433	4	0,22
42	49	46	0,0078	0,0545	2,0174	4	1,95

На основе формулы (2) средняя наработка на отказ при исключении из исследования первого интервала наработки

$$L = \frac{970,79}{37} = 26,24 \text{ тыс. км.}$$

С учетом результатов исследования гипотезы отказов ТЭД 2(3, 4)ЭС5К по причине пробоя изоляции обмоток можно сделать вывод о возможности оптимизации норм межремонтных пробегов рассматриваемого вида ремонта (ТР-1). Карта возможной оптимизации норм межремонтных пробегов по ТР-1 представлена на рисунке 4.

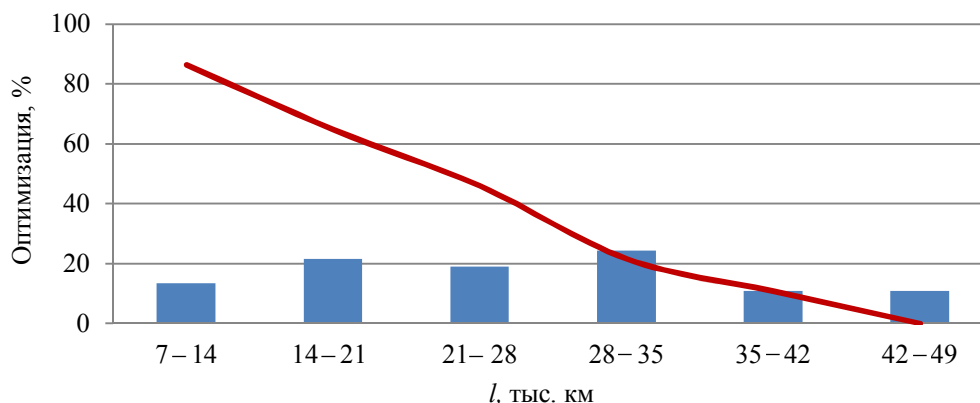


Рисунок 4 – Карта возможной оптимизации норм межремонтных пробегов по ТР-1

На рисунке 4 на интервале 28 – 35 в точке пересечения представлен максимально возможный оптимум.

Так как расчетное значение критерия согласия Пирсона не превышает критического коэффициента, то можно сделать вывод о том, что распределение отказов ТЭД по причине пробоя изоляции подчиняется нормальному закону распределения и гипотеза подтверждается. Следовательно, предполагается, что управление техническим состоянием изоляции ТЭД локомотивов посредством изменения норм межремонтных пробегов является возможным. Таким образом, предлагается изменение норм межремонтных пробегов в меньшую сторону на 20 %. Данный процесс будет способствовать снижению количества отказов ТЭД электровозов 2(3, 4)ЭС5К по причине пробоя изоляции на 11 %. Такой подход поможет наиболее оптимальным образом организовать процесс технического обслуживания и ремонта ТПС.

Список литературы

1. Колемаев, В. А. Теория вероятностей и математическая статистика / В. А. Колемаев, В. Н. Калинина; под ред. В. А. Колемаева. – Москва : Инфра-М, 1997. – 302 с. – Текст : непосредственный.
2. Четвергов, В. А. Надежность локомотивов / В. А. Четвергов, А. Д. Пузанков; под ред. В. А. Четвергова. – Москва : Маршрут, 2003. – 413 с. – Текст : непосредственный.
3. Четвергов, В. А. Анализ факторов, определяющих надежность тепловозов на различных стадиях жизненного цикла / В. А. Четвергов, Д. В. Балагин, О. В. Балагин – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 4 (20). – С. 72–79.
4. Математическая статистика : учебное пособие / Д. К. Агишева, С. А. Зотова, Т. А. Матвеева, В. Б. Светличная. – Волгоград : Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского гос. техн. ун-та, 2010. – 160 с. – Текст : непосредственный.
5. Савастенко, Н. А. Математическая статистика : учебно-методическое пособие / Н. А. Савастенко. – Минск : Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, 2015. – 72 с. – Текст : непосредственный.

6. Крохалев, В. Я. Статистика : учебное пособие / В. Я. Крохалев, С. А. Скопинов, В. А. Телешев. – Екатеринбург : Уральский государственный медицинский университет, 2018. – 114 с. – Текст : непосредственный.

7. Система мониторинга состояния изоляции / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева [и др]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 3. – С. 50–52.

8. Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». Распоряжения. О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов : Распоряжение № 2796р. – Принято ОАО «РЖД» 21 сентября 2018 г. – Москва : ОАО «РЖД», 2018. – 23 с. – Текст : непосредственный.

9. Подлесный, О. В. Исследование закона распределения отказов тяговых электродвигателей электропоездов / О. В. Подлесный, Е. Г. Зенина. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного университета. – 2013. – № 2 (9). – С. 149–155.

10. Давыдов, Ю. А. Контроль фактического состояния локомотивов на основе диагностики / Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин, А. С. Кушнирук. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 3 (59). – С. 38–47.

References

1. Kolemaev V.A., Kalinina V.N. *Teoriia veroiatnostei i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Infra-M Publ., 1997, 302 p. (In Russian).

2. Chetvergov V.A., Puzankov A.D. *Nadezhnost' lokomotivov* [Reliability of locomotives]. Moscow, Marshrut Publ., 2003, 413 p. (In Russian).

3. Chetvergov V.A., Balagin D.V., Balagin O.V. The analysis of the factors defining reliability of locomotives at various stages of their life cycle. *Izvestiya Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 4(20), pp. 72-79 (In Russian).

4. Agisheva D.K., Zotova S.A., Matveeva T.A., Svetlichnaia V.B. *Matematicheskaya statistika: uchebnoe posobie* [Mathematical Statistics : textbook]. Volgograd, Volga Polytechnic Institute Publ., 2010, 160 p. (In Russian).

5. Savastenko N.A. *Matematicheskaya statistika: uchebno-metodicheskoe posobie* [Mathematical statistics: educational and methodical manual]. Minsk, A. D. Sakharov International State Ecological Institute Publ., 2015, 72 p. (In Russian).

6. Krokhaliev V.Ia., Skopinov S.A., Teleshev V.A. *Statistika: uchebnoe posobie* [Statistics: Study guide]. Yekaterinburg, Ural State Medical University Publ., 2018, 114 p. (In Russian).

7. Dul'skii E. Iu., Ivanov P.Iu., Khamnaeva A.A. and others. Insulation condition monitoring system. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2021, no. 3, pp. 50-52 (In Russian).

8. Open Joint Stock Company «Russian Railways». Orders. On the system of maintenance and repair of locomotives: Order No. 2796r. – Adopted by JSC «Russian Railways» on September 21, 2018. Moscow, JSC «Russian Railways» Publ., 2018. 23 p. (In Russian).

9. Podlesnyi O.V., Zenina E.G. Investigation of the law of distribution of failures of traction electric motors of electric locomotives. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Volgograd State University*, 2013, no. 2(9), pp. 149-155 (In Russian).

10. Davydov Iu.A., Pliaskin A.K., Kushniruk A.S. Monitoring of the actual condition of locomotives based on diagnostics. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, no. 3(59), pp. 42-53 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пляскин Артем Константинович

Дальневосточный государственный университет
путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Рос-
сийская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Plyaskin Artem Konstantinovich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

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

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Транспорт железных дорог», ДВГУПС.
Тел.: +7 (4212) 40-75-14.
E-mail: ido@festu.khv.ru

Ph. D. in Engineering, associate professor of the de-
partment «Railway transport», FESTU.
Phone: +7 (4212) 40-75-14.
E-mail: ido@festu.khv.ru

Бутусова Валерия Алексеевна
Дальневосточный государственный университет
путей сообщения (ДВГУПС).
Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Рос-
сийская Федерация.
Аспирант кафедры «Транспорт железных до-
рог», ДВГУПС.
Тел.: +7 (914) 169-96-60.
E-mail: va.butusova@yandex.ru

Butusova Valeriia Alekseevna
Far Eastern State Transport University (FESTU).
47, Seryshev st., Khabarovsk, 680021, the Russian
Federation.
Postgraduate student of the department «Railway
transport», FESTU.
Phone: +7 (914) 169-96-60.
E-mail: va.butusova@yandex.ru

Кушнирук Алексей Сергеевич
Дальневосточный государственный университет
путей сообщения (ДВГУПС).
Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Рос-
сийская Федерация.
Кандидат технических наук, ДВГУПС.
Тел.: +7 (963) 751-65-23.
E-mail: Alexey.kushniruk@mail.ru

Kushniruk Alexey Sergeevic
Far Eastern State Transport University (FESTU).
47, Seryshev st., Khabarovsk, 680021, the Russian
Federation.
Ph. D. in Engineering of Far Eastern State Transport
University, FESTU.
Phone: +7 (963) 751-65-23.
E-mail: Alexey.kushniruk@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Пляскин, А. К. Оптимизация норм межремонт-
ных пробегов электровозов серии 2(3,4) ЭС5К на ос-
нове отказов тяговых электродвигателей / А. К. Пляс-
кин, В. А. Бутусова, А. С. Кушнирук. – Текст : непосред-
ственный // Известия Транссиба. – 2022. –
№ 3 (51). – С. 35 – 43.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Plyaskin A.K., Butusova V.A., Kushniruk A.S.
Optimization of standards of repair runs in locomotives
series 2(3,4) ES5K on the basis of failures of the traction
motor. Journal of Transsib Railway Studies, 2022,
no. 3 (51), pp. 35-43 (In Russian).

УДК 697.911

Е. Н. Пирогов¹, В. М. Медведева¹, С. Н. Наumenko²

¹Российский университет транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация;

²Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), г. Москва,
Российская Федерация

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Аннотация. В статье рассмотрены технические решения, позволяющие повысить качество системы жизнеобеспечения в пассажирских вагонах поездов дальнего следования (ПВПДС), в частности, в системах водоснабжения и вентиляции, обеспечивающих безопасные и комфортные условия проезда пассажиров. Качество воды в вагоне определяется условиями заправки исходной водой на промежуточных станциях, на которое может оказывать негативное влияние санитарное состояние емкости для ее хранения. В настоящее время в системе вентиляции устанавливаются фильтры, эффективность которых в условиях пандемии сомнительна.

При написании статьи использовались научные труды и разработки отечественных и зарубежных ученых, современные концепции организации комфортных условий в ПВПДС, а также методические и нормативно-справочные материалы по данной тематике. Эффективность предложенного метода подтверждена в ходе экспериментальных исследований, результаты которых использованы при реализации инвестиционного проекта «Чистая вода» ОАО «РЖД».

Предложены технические решения повышения качества системы жизнеобеспечения с применением технологии озонирования. Их реализация позволит системе жизнеобеспечения работать как в режиме очистки и обеззараживания воды, так и стерилизации воздушной среды в ПВПДС. Условием эффективного использования

является наличие сжатого воздуха для работы эжектора в режиме подачи озono-воздушной смеси, необходимой для очистки и обеззараживания воды и воздуха в вагоне. Озонирование производится отдельно в автоматическом режиме.

Применение метода озонирования для решения задач жизнеобеспечения в пассажирских вагонах является перспективным направлением, учитывая его универсальность, а следовательно, и возможность использования на объектах инфраструктуры с целью обеззараживания и стерилизации помещений, замкнутых объемов и производственных технологических емкостей.

Ключевые слова: пассажирский вагон поезда дальнего следования, система жизнеобеспечения, озонирование, озono-воздушная смесь, критерий стерилизации, эжектор, обеззараживание, концентрация озона.

Evgeny N. Pirogov¹, Vera M. Medvedeva¹, Sergey N. Naumenko²

¹Russian University of Transport (ROAT RUT (MIIT), Moscow, the Russian Federation;

²Research Institute of Railway Transport (JSC «VNIIZHT»), Moscow, the Russian Federation

DEVELOPMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR THE SYSTEM LIFE SUPPORT OF PASSENGER CARS

Abstract. The article considers technical solutions to improve the quality of life support system in long-distance passenger trains (PVPDS), in particular in the water supply and ventilation systems, which ensure safe and comfortable passenger travel conditions. The quality of water in the coach is determined by the conditions of initial water filling at the intermediate stations, which can be adversely affected by the sanitary condition of the storage tank. Currently filters are installed in the ventilation system, efficiency of which is questionable in pandemic conditions.

Scientific works and elaborations of native and foreign scientists, up-to-date concepts of organizing comfortable conditions in the PVPDS, as well as methodical and normative-reference materials on the given theme were used when writing the article. The effectiveness of the proposed method was confirmed in the course of experimental research, the results of which were used in the implementation of the investment project "Clean Water" of JSC "Russian Railways".

Technical solutions have been proposed to improve the quality of life support systems using ozonization technology. Their realization will allow the life support system to operate in the water purification and disinfection mode and sterilization the air environment in the PVPDS. The condition for the efficient use is the availability of compressed air for the ejector operation in the mode of supplying the ozone-air mixture required for water and air cleaning and disinfection in the car. Ozonization is performed separately in the automatic mode.

The ozone method for solving the problems of life support in coach cars is a perspective direction consider its generality and, therefore, ability of using it on the infrastructure objects for disinfection and sterilization of premises, reserved volumes and production capacities.

Keywords: long-distance passenger train car/coach car, life support system, ozonization, ozone-air mixture, sterilization criterion, ejector, disinfection, ozone concentration

Создание безопасных условий жизнеобеспечения в ПВПДС является приоритетной задачей на железнодорожном транспорте. Такие условия формируются при проектировании и учитывают различные факторы, к которым следует отнести санитарное состояние систем водоснабжения и вентиляции пассажирских вагонов. Применяющиеся сегодня инженерные системы непосредственно влияют на создание комфортных условий пассажиров в течение всей поездки.

Несмотря на жесткие требования [1] нормативной документации и органов Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзора) качество водоподготовки на железнодорожном транспорте не всегда соответствует этим требованиям.

В работе [2] на основе системного подхода установлен комплекс возможных причин периодического ухудшения показателей качества питьевой воды в пассажирских вагонах в процессе перевозок и мер по их устранению. Основные причины снижения качества питьевой воды разделены на три группы: территориальные, конструктивно-эксплуатационные и организационно-планировочные.

На качество воды влияют такие факторы, как протяженность маршрутов движения поездов дальнего следования, широкий диапазон климатических параметров, а также нарушения,

возникающие при проведении профилактической и плановой дезинфекции систем водоснабжения. Совокупность действия этих обстоятельств является благоприятной средой для размножения вредных микроорганизмов и источником вторичного загрязнения.

В настоящее время в ПВПДС для решения названных выше задач используется ультрафиолетовое излучение. Для этого в системах водоснабжения и вентиляции установлены две автономные системы обеззараживания на основе ультрафиолетовых ламп (УФ-стерилизация).

Применение системы УФ-стерилизации требует не только ее интеграции в существующую конструкцию вагона, но и дополнительных затрат электроэнергии на ее функционирование. Общим недостатком применяемой на ПВПДС системы является низкая эффективность облучения воды, при которой необходимо эту воду многократно пропускать через ультрафиолетовый стерилизатор. В связи с этим разработка энергоэффективного устройства для очистки воды в ПВПДС является актуальной задачей, в внедрение системы контроля позволит обоснованно совершенствовать технические устройства водоподготовки [3].

В системе водоснабжения существенное влияние на эффект обеззараживания воды УФ-лучами оказывает мутность и цветность воды, уменьшающие интенсивность излучения в ее толще. Степень этого влияния может быть оценена по коэффициенту пропускания (поглощения) воды в ультрафиолетовой области [4]. Влияние сопутствующих параметров воды – жесткости, значения pH и температуры здесь незначительно.

При обеззараживании воды контроль над выполнением норм подачи дезинфектанта является обязательным требованием. В случае применения ультрафиолета необходим контроль над дозой УФ-излучения. Практика применения способа УФ-облучения показывает, что основными причинами снижения дозы облучения в УФ-реакторе являются выход из строя ламп (контролируется по напряжению или току на одной или группе ламп) и снижение их интенсивности за счет старения (современные УФ-источники обладают стабильным временем работы ~ один год). Их ресурс может оцениваться по счетчику времени наработки, загрязнение кварцевых чехлов или резкое ухудшение качества воды (коэффициент поглощения УФ-лучей) – по показаниям ультрафиолетового селективного датчика.

Несмотря на значительные преимущества, обусловленные конструктивным исполнением, УФ-обработка воды характеризуется слабовыраженным последствием. Поэтому, как правило, для предупреждения вторичного загрязнения в водопроводных сетях при сомнительном их санитарно-техническом состоянии используется дополнительное хлорирование воды.

Существуют ограничения и по качеству обрабатываемой воды. Приемлемым с точки зрения энергетической целесообразности принято считать следующие характеристики воды: цветность – менее 50 – 60 град, содержание взвешенных веществ – менее 30, содержание солей железа – менее 2 – 3 мг/дм³. Именно в этих границах УФ-технология дезинфекции остается конкурентоспособной.

Для обеззараживания воздушной среды в ПВПДС согласно Техническим требованиям к оборудованию для обеззараживания воздуха и внутренних поверхностей стационарных объектов массового сосредоточения людей, эксплуатируемых ОАО «РЖД» [5] применяются физические методы воздействия, среди которых наибольшее распространение получила технология с использованием УФ-излучения. Бактерицидным действием обладает ультрафиолетовое излучение с диапазоном длин волн 205 – 315 нм, оно вызывает деструктивно-модифицирующее фотохимическое повреждение ДНК клеточного ядра микроорганизма. Изменения в ДНК микроорганизмов накапливаются и приводят к замедлению темпов их размножения и дальнейшему вымиранию в первом и последующем поколениях. В результате ряда наблюдений было отмечено, что воздействие энергии в диапазоне спектра UVC наиболее эффективно с бактерицидной точки зрения при длине волны в 254 нм [6].

Основная проблема заключается в том, что, попадая внутрь рециркулятора, воздух подвергается УФ-облучению всего 1 – 2 с. Какие точно повреждения вирус получает за столь короткое время контакта с УФ-лампой, остается неизвестным.

Кроме того, все рециркуляторы воздуха относятся к приборам закрытого типа, т. е. при их использовании УФ-воздействие осуществляется только на воздух, проходящий непосредственно через прибор, и не оказывают воздействия на поверхности внутренних конструкций.

Учитывая изложенное выше можно утверждать, что УФ-облучатели и рециркуляторы имеют ограничения по эффективности обеззараживания помещений.

Перспективным направлением в комплексной обработке воды системы водоснабжения и воздушной среды ПВПДС представляется озонирование, которое также относится к физическим методам воздействия [7]. Обеззараживающий эффект озона в три – пять раз выше, чем ультрафиолетового излучения [8]. При введении в водную или воздушную среду озон оказывает на них четыре действия: бактерицидное, дезодорирующее, дезинфицирующее и окислительное.

Следует отметить, что в соответствии с расчетами при количестве пассажиров, равном пассажироместности вагона, для обеспечения безопасных параметров воздушной среды, соответствующих классу качества воздуха IDA 2 (среднее качество внутреннего воздуха по концентрации CO_2 : 400 – 600 промилле сверх содержания в наружном воздухе [9]), необходимо увеличение притока наружного воздуха в диапазоне 20 – 35 $\text{м}^3/\text{ч}$ на человека. Согласно стандарту ASHRAE 62-1-2004 [10] такое качество воздуха соответствует 80 – 85 % пассажиров, удовлетворенных качеством воздуха (расчетное значение для выборки людей, находящихся в состоянии покоя).

По гигиеническим показателям и в соответствии с санитарными нормами (Санитарно-гигиенические нормы допустимых уровней ионизации воздуха СанПиН 1.2.3685–21) представляется оптимальным создание в зоне дыхания человека концентрации легких аэроионов в пределах 1000 – 5000 ионов/ см^3 , озона – 10 – 15 $\text{мкг}/\text{м}^3$. При повышении физических и психоэмоциональных нагрузок возможно увеличение концентраций «активные формы кислорода» (АФК) в воздухе, присутствие которых во вдыхаемом воздухе в «природных» концентрациях придает ему особое ощущение свежести. АФК являются катализаторами биологических процессов на всех без исключения уровнях организма, начиная с молекулярного. Они необходимы для нормального (здорового) функционирования организма. Таким образом, система искусственной ионизации и озонирования воздуха, будучи абсолютно безопасной, создаст у пассажиров эмоциональное ощущение свежести и чистоты воздуха. На этих оценках базируется так называемые «зоны комфорта» – комбинации физических параметров воздушной среды, которые более 80 % испытуемых людей определяли эмоционально как комфортные [11].

Озон мгновенно уничтожает не только бактерии, но и все известные вирусы и грибки. Он оказывает разрушающе-окисляющее воздействие на стенки клетки и цитоплазму, полностью разрушая их структуру. Взаимодействие озона с живой микрофлорой заканчивается механическим разрушением клетки, чтобы это ни было: вирусы, бактерии, споры, грибки, водоросли и пр. Важно, что после обеззараживания озоном не возникает никаких соединений и запахов.

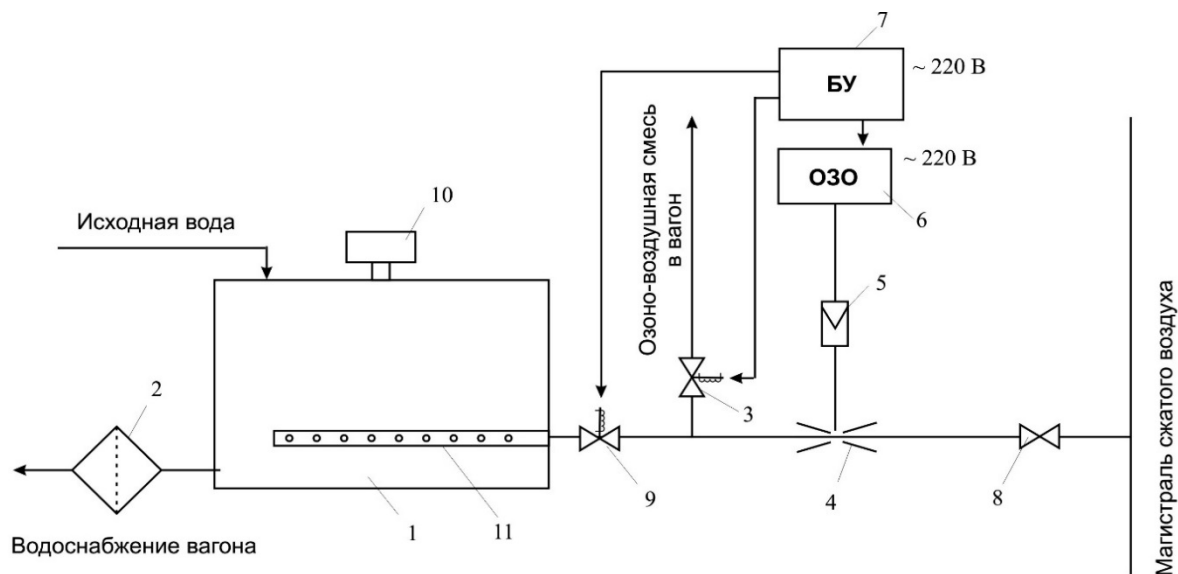
Единственное, что остается после действия озона, это кислород. Ведь после окончания процесса окисления озон превращается обратно в кислород. Благодаря тому, что озон обладает столь ценным свойством самораспада, его передозировка невозможна.

Благодаря очень высокой окислительной и дезинфицирующей способности озон активно используют и для очистки воды [12, 13].

В настоящей статье рассмотрено техническое решение по комплексному использованию единой системы озонирования в системах водоснабжения и обеззараживания воздушной среды в ПВПДС, принципиальная схема которой представлена на рисунке. Каждый элемент, представленный на рисунке, обеспечивает технические и режимные характеристики системы озоновой обработки и в целом ее функционирование. Блок управления следит за очередностью и периодичностью включения аппаратов, озонатор генерирует выработку озона заданной производительности и концентрации, озоно-воздушный эжектор обеспечивает подачу озоно-воздушной смеси расчетной концентрации озона в ней потребителям. Следует отметить, что геометрические размеры эжектора определяются в зависимости от давления сжатого воздуха

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

в вагоне. Стабильная работа озонатора и электромагнитных клапанов обеспечивается источником электроэнергии напряжением 220 В и частотой 50 Гц.



Принципиальная схема системы озоновой обработки воды и воздушной среды пассажирского вагона:
1 – бак; 2 – фильтр с загрузкой активированного угля; 3 – электромагнитный клапан для обеззараживания воздушной среды; 4 – эжектор озоно-воздушный; 5 – обратный клапан; 6 – озонатор; 7 – блок управления; 8 – шаровый кран; 9 – электромагнитный клапан для обеззараживания воды; 10 – деструктор остаточного озона; 11 – аэратор

Система озонирования, установленная в ПВПДС, может быть использована для решения двух задач:

1) Дезинфекция (дезодорация) воздуха в вагоне (этот процесс реализуется в двух режимах – при техническом обслуживании и подготовке к рейсу, а также для создания и поддержания «зоны комфорта» в процессе поездки; для этого блок управления по команде при включенном озонаторе закрывает электромагнитный клапан поз. 9 подачи озона в бак с водой и открывает электромагнитный клапан поз. 3 подачи озона в вагон; продолжительность озонирования устанавливается по таймеру).

2) Обеззараживание воды системы водоснабжения пассажирского вагона (этот процесс реализуется во время движения поезда; для этого блок управления по команде при включенном озонаторе открывает электромагнитный клапан поз. 9 подачи озона в бак 1 с водой и закрывает электромагнитный клапан поз. 3 подачи озона в вагон; продолжительность озонирования устанавливается по таймеру исходя из критерия стерилизации:

$$CT = \text{const}, \quad (1)$$

где C – концентрация озона в воде, принимается $0,4 - 0,5 \text{ мгО}_3/\text{дм}^3$;

T – время озонирования, мин.

Продолжительность озонирования воды составляет приблизительно 3 – 5 мин.

Система озонирования воды позволяет производить на станциях обслуживания долив воды, качество которой ранее могло не соответствовать требованию СанПиН 2.1.4.1074–01. Озоно-воздушная смесь через аэратор поз. 11 подается в бак для обезжелезивания, деманганации и обеззараживания воды, а растворенный озон в воде сорбируется на фильтре поз. 2 с загрузкой из активированного угля. Остаточный озон нейтрализуется в деструкторе остаточного озона поз. 10 с применением катализатора разложения озона гопаглум марки ГТТ.

Управление электромагнитными клапанами, а следовательно, и работой системы озонирования в целом производится блоком управления по заранее установленному алгоритму.

В блоке управления коммутируются сигналы от датчиков, контролирующих концентрации озона как в воде, так и в воздушном пространстве вагона, уровень заполнения водой накопительного бака. Кроме того, имеется техническая возможность задать периодичность и продолжительность озонирования обрабатываемых сред.

Приведем расчет времени обеззараживания воздуха в пассажирском вагоне.

Продолжительность создания благоприятной воздушной среды в пассажирском вагоне определяется в зависимости от объема и температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в нем. При внутреннем объеме пассажирского вагона 216 м^3 и дозе озона, соответствующей значению ПДК $C = 0,1 \text{ мг/м}^3$, время обработки воздуха в пассажирском вагоне зависит от производительности озонатора и вычисляется по формуле:

$$T = \frac{C \cdot V}{G}. \quad (2)$$

Для озонатора производительностью 10 г/ч время для достижения концентрации озона $C = 0,1 \text{ мг/м}^3$ в воздухе вагона составит $1,5 - 2,0 \text{ мин}$. Согласно рекомендациям источников [7, 14] при такой концентрации озона в воздухе нахождение пассажиров ничего не угрожает.

В случае возникновения острой необходимости дезинфицирующей обработки как воздуха, так и поверхностей вагона доза озона может достигать больших значений.

Продолжительность обеззараживания вагона при дозе озона, необходимой для обеззараживания $C = 0,02 \text{ г/м}^3$, вычисляется по формуле (2) и зависит от производительности озонатора – $G \text{ (г/ч)}$.

Подставив в формулу (2) соответствующие значения, получаем время озонирования при различной производительности озонатора:

$$\begin{aligned} T &= \frac{0,02 \cdot 216}{5} = 0,864 \text{ ч, или } 52 \text{ мин;} \\ T &= \frac{0,02 \cdot 216}{10} = 0,43 \text{ ч, или } 26 \text{ мин;} \\ T &= \frac{0,02 \cdot 216}{20} = 0,216 \text{ ч, или } 13 \text{ мин.} \end{aligned}$$

Энергопотребление озонаторов минимально и составляет для озонаторов различной производительности:

$$\begin{aligned} G &= 5 \text{ гО}_3/\text{ч (потребляемая мощность – 100 Вт);} \\ G &= 10 \text{ гО}_3/\text{ч (потребляемая мощность – 200 Вт);} \\ G &= 20 \text{ гО}_3/\text{ч (потребляемая мощность – 400 Вт).} \end{aligned}$$

Следует отметить, что указанные выше концентрации озона могут быть достигнуты при использовании одного озонатора с регулируемой производительностью, а также параметров настройки режима работы эжектора.

Для решения задачи жизнеобеспечения в системах водоснабжения и вентиляции ПВПДС используются системы, основанные на применении ультрафиолетового излучения. Результаты работы такой системы не в полной мере удовлетворяют требованиям нормативных документов. В связи с этим предложена к рассмотрению система жизнеобеспечения, фундаментом которой является известный метод озонирования. Ее реализация позволит более эффективно использовать и климатические системы, обеспечивая при этом подачу максимального качества воздуха в пассажирских вагонах с минимальными энергетическими затратами на его обработку и соблюдая установленные габариты оборудования [15].

Рассмотрена перспективная технология комплексного решения по созданию безопасных и комфортных условий для пассажиров вагонов в поездах дальнего следования, основанная на озонировании питьевой воды и воздушной среды.

Применение единой технологии озонирования для решения поставленных задач позволяет повысить качество системы жизнеобеспечения и оптимизировать эксплуатационные затраты на обслуживание инженерных систем.

Список литературы

1. СанПиН 2.1.3684–21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий», Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 3. – Текст : непосредственный.
2. Каськов, Ю. Н. Научное обоснование и реализация системы приоритетных мер по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия на железнодорожном транспорте в условиях административной реформы : специальность 14.02.01 «Гигиена» : диссертация на соискание ученой степени доктора медицинских наук / Каськов Юрий Никитович ; Всероссийский науч.-исслед. ин-т железнодорожной гигиены. – Санкт-Петербург, 2013. – 379 с. – Текст : непосредственный.
3. Гончарук, В. В. Современное состояние проблемы обеззараживания воды / В. В. Гончарук, Н. Г. Потапченко. – Текст : непосредственный // Химия и технология воды. – 1998. – Т. 20. – № 2. – С. 190–213.
4. Томилова, О. С. Расчет эффективности УФ-стерилизатора модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона / О. С. Томилова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2012. – № 3 (11). – С. 46–54.
5. Технические требования к оборудованию для обеззараживания воздуха и внутренних поверхностей стационарных объектов массового сосредоточения людей, эксплуатируемых ОАО «РЖД». Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 02.12.2021 № 2703/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2021. – Текст : непосредственный.
6. Борисоглебская, А. П. Современные методы обеззараживания воздуха в помещениях / А. П. Борисоглебская. – Текст : непосредственный // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2009. – № 2. – С. 30–38.
7. Компания ЭКОНАУ «Чистые технологии» // ekonow.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://ekonow.ru/oborudovanie-ozonatornoe/universalnye-ozonatornye-ustanovki> (дата обращения: 31.05.2022).
8. Компания «Чистый воздух», г. Красноярск // clear-air.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://www.clear-air.ru/category/ventiljacija/> (дата обращения: 31.05.2022).
9. ГОСТ Р ЕН 13779–2007. Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 49 с. – Текст : непосредственный.
10. ASHRAE Standart 62-1–2004. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality / *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*. 1791 Tullie Circle NE, Atlanta, GA 30329. ISBN 1-931862-80-X.
11. Решение проблем создания «свежего» воздуха в вагонах железнодорожного транспорта и метрополитена. Гигиенические и инженерные аспекты / К. К. Ким, А. А. Дударев [и др.]. – Текст: непосредственный // Безопасность жизнедеятельности. – 2006. – № 10. – С. 22–25.
12. Медведева, В. М. Инновационные технологии очистки воды / В. М. Медведева, Е. Н. Пирогов, В. А. Семеновых. – Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 1. – С. 32–38.
13. Расчет концентрации озона, создаваемой озонатором в замкнутом объеме / Е. Г. Безруких, А. П. Гаврилюк, Н. К. Зайцев, В. Ф. Шабанов. – Красноярск: Ин-т физики, 1996. – 25 с. – Текст : непосредственный.
14. СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». – Текст: непосредственный.
15. Стоякин, Г. М. Пути улучшения характеристик климатических систем пассажирского подвижного состава / Г. М. Стоякин, А. В. Костин, С. Н. Науменко. – Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТа – 2020. – Т. 79. – № 1. – С. 34–38.

References

1. SanPiN 2.1.3684–21 «Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air,

soils, residential premises, operation of industrial, public premises, organization and conduct of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures», Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation from 28.01.2021 No. 3. (In Russian).

2. Kas'kov Iu.N. *Nauchnoe obosnovanie i realizatsiia sistemy prioritetnykh mer po obespecheniiu sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiia na zheleznodorozhnom transporte v usloviakh administrativnoi reformy* (Scientific substantiation and implementation of a system of priority measures to ensure sanitary and epidemiological well-being in railway transport in the context of administrative reform). Doctor's Of Medical Sciences thesis, St. Petersburg, All-Russian Research Institute of Railway Hygiene, 2013, 379 p. (In Russian).

3. Goncharuk V.V., Potapchenko N.G. The current state of the problem of water disinfection. *Khimiia i tekhnologiia vody – Chemistry and technology of water*, 1998, vol. 20, no. 2, pp. 190-213 (In Russian).

4. Tomilova O.S. Efficiency calculation of the ultra-violet sterilizer of the carriage water supply modernized system. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 3(11), pp. 46-54 (In Russian).

5. Technical requirements for equipment for disinfection of air and internal surfaces of stationary objects of mass concentration of people operated by JSC «Russian Railways». Approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated 02.12.2021 No. 2703/R. Moscow, JSC «Russian Railways» Publ., 2021 (In Russian).

6. Borisoglebskaia A.P. Modern methods of indoor air disinfection. *AVOK: ventiliatsiia, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naia teplofizika – AVOC: ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermophysics*, 2009, no. 2, pp. 30-38 (In Russian).

7. *Kompaniia EKONAU «Chistye tekhnologii»* [The company ECONAU «Clean Technologies»]. Available at: <https://ekonow.ru/oborudovanie-ozonatornoe/universalnye-ozonatornye-ustanovki> (accessed 31.05.2022).

8. *Kompaniia «Chistyi vozdukh», g. Krasnoiarsk* [The company «Clean air», Krasnoyarsk]. Available at: <https://www.clear-air.ru/category/ventiljacija/> (accessed 31.05.2022).

9. National Standard 13779–2007. Ventilation in non-residential buildings. Technical requirements for ventilation and air conditioning systems. Moscow, Standardinform Publ., 2018. 49 p. (In Russian).

10. ASHRAE Standart 62-1–2004. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality / *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*. 1791 Tullie Circle NE, Atlanta, GA 30329. ISBN 1-931862-80-X.

11. Kim K.K., Dudarev A.A. Solving the problems of creating «fresh» air in railway and subway cars. Hygienic and engineering aspects. *Bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti – Life safety*, 2006, no. 10, pp. 22-25 (In Russian).

12. Medvedeva V.M., Pirogov E.N., Semenovikh V.A. Innovative water purification technologies. *Nauka i tekhnika transporta – Transport science and Technology*, 2015, no. 1, pp. 32-38 (In Russian).

13. Bezrukikh E.G., Gavriluk A.P., Zaitsev N.K., Shabanov V.F. *Raschet kontsentratsii ozona, sozdavaemoi ozonatorom v zamknutom ob'eme* [Calculation of the ozone concentration generated by the ozonator in a closed volume]. Krasnoyarsk: Institute of Physics Publ., 1996, 25 p. (In Russian).

14. SanPiN 1.2.3685–21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans» (In Russian).

15. Stoiakin G.M., Kostin A.V., Naumenko S.N. Ways to improve the characteristics of passenger rolling stock climate systems. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*, 2020, vol. 79, no. 1, pp. 34-38 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пирогов Евгений Николаевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Часовая ул., д. 22/2, стр. 1, г. Москва, 125315, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и водоснабжение на транспорте», ПУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 649-19-00, доб. 3-70.

E-mail: kafedrativrgotups@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pirogov Evgeny Nikolaevich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Chasovaya st., 22/2, p. 1, Moscow, 125315, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Heat Power Engineering and Water supply in Transport», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-00, доб. 3-70.

E-mail: kafedrativrgotups@yandex.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Медведева Вера Михайловна

Российский университет транспорта (ПУТ
(МИИТ)).

Часовая ул., д. 22/2, стр. 1, г. Москва, 125315,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Техносферная безопасность», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7(910)477-97-56.

E-mail: verimihmed@rambler.ru

Medvedeva Vera Mikhailovna

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Chasovaya st., 22/2, p. 1, Moscow, 125315, the Rus-
sian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the de-
partment «Technosphere Safety», RUT (MIIT).

Phone: +7(910)477-97-56.

E-mail: verimihmed@rambler.ru

Науменко Сергей Николаевич

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

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

Доктор технических наук, начальник отдела
научного центра «Электрификация и теплоэнерге-
тика», АО «ВНИИЖТ».

Тел.: +7(903)796-47-66.

E-mail: naumenko.sergey@vniizht.ru

Naumenko Sergey Nikolaevich

Research Institute of Railway Transport (JSC
«VNIIZHT»).

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

Doctor of Sciences in Engineering, head of the de-
partment of the scientific center «Electrification and Heat
Power Engineering», JSC «VNIIZHT».

Phone: +7(903)796-47-66.

E-mail: naumenko.sergey@vniizht.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Пирогов, Е. Н. Разработка технических решений
для системы жизнеобеспечения пассажирских ваго-
нов / Е. Н. Пирогов, В. М. Медведева, С. Н. Нау-
менко. – Текст : непосредственный // Известия Транс-
ссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 43 – 51.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Pirogov E.N., Medvedeva V.M., Naumenko S.N.
Development of technical solutions for the system life
support of passenger cars. Journal of Transsib Railway
Studies, 2022, no. 3 (51), pp. 43-51 (In Russian).

УДК 629.4.012.5:629.463:629.4.018

И. С. Лексутов, В. П. Клюка

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

К ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО СКАНЕРА ДЛЯ СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОДОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕСА ВАГОНА

Аннотация. Предметом исследования являются теоретические и практические аспекты применения оп-
тических технологий для бесконтактных измерений геометрических параметров колесной пары вагона в ходе
эксплуатации и осуществления ремонта. Цель исследования – разработка методики и технологий контроля
геометрических параметров деталей вагона при помощи оптического линейного сканера, а также способов
обработки результатов натурных испытаний применения оптических технологий контроля. В статье проана-
лизирована проблематика применения стандартизованных методик контроля технического состояния при
помощи ручного измерительного и контрольного инструмента в контексте принятой технологии технического
обслуживания и эксплуатации грузовых вагонов. В результате исследования проведен обзор состояния вопроса
применения оптических методик контроля на железной дороге, выявлены сильные и слабые стороны различных
вариантов реализации методик измерений и разработаны методика и компьютерная программа для автома-
тизации создания цифрового двойника исследуемого объекта (профиля продольного сечения поверхности ката-
ния колесной пары). По цифровому двумерному изображению теневой картины профиля колеса вычисляются
координаты точек линии контура сечения объемного колеса в области поверхности катания. Для определения
координат огибающей сечения применяется ступенчатая функция, максимально приближенная к светотене-
вому изображению контура колеса. После обработки изображений результат выдается программой в виде
таблицы с вычисленными координатами сечения профиля и визуализируется при помощи синтезированного по

координатам профиля колеса в окне программы. Точность применяемой методики зависит от разрешения изображения, получаемого линейным сканером. Методику и программу можно применять в дальнейшем для натурных испытаний проектируемого оборудования для размерного контроля деталей вагона.

Ключевые слова: линейный сканер, поиск границ на изображении, моделирование, измерение, колесная пара.

Ilya S. Leksutov, Vladislav P. Klyuka

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

TO THE POSSIBILITY OF USING A LINEAR SCANNER TO CREATE MEANS OF TECHNICAL CONTROL OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE LONGITUDINAL SECTION OF THE ROLLING SURFACE OF THE RAILCAR WHEEL

Abstract. The subject of the study is the theoretical and practical aspects of the application of optical technologies for non-contact measurements of geometric parameters of a wagon wheelset during operation and repair. The purpose of the study is to develop methods and technologies for monitoring geometric parameters of car parts using an optical linear scanner, as well as a method for processing the results of field tests of the results of the application of optical control technologies. The article analyzes the problems of application of standardized methods of technical condition monitoring using manual measuring and control tools in the context of the adopted technology of maintenance and operation of freight cars. As a result of the study, a review of the state of the issue of the use of optical control techniques on the railway was carried out, the strengths and weaknesses of various options for the implementation of measurement techniques were identified and a methodology and a computer program for automating the creation of a digital standard of the object under study (the profile of the longitudinal section of the rolling surface of the wheelset) were developed. Using a digital two-dimensional image of the shadow pattern of the wheel profile, the coordinates of the points of the contour line of the section of the volumetric wheel in the area of the rolling surface are calculated. To determine the coordinates of the envelope of the section, a step function is used, as close as possible to the chiaroscuro image of the wheel contour. After image processing, the result is output by the program in the form of a table with the calculated coordinates of the profile section and visualized using the wheel profile synthesized by coordinates in the program window. The accuracy of the technique used depends on the resolution of the image obtained by the linear scanner. The methodology and program can be used in the future for field tests of the designed equipment for dimensional control of car parts.

Keywords: linear scanner, search for boundaries in the image, modeling, measurement, wheelset.

В последнее время в области построения автоматизированных систем производства, диагностирования технических параметров объектов при ремонте и других приложениях все чаще применяются оптические дистанционные технологии. К ним относятся разнообразные системы технического зрения, применение лазерных дальномеров, тепловизионный дистанционный контроль и др. Это связано с удобством использования и автоматизации технологических процессов, построенных на применении таких технологий. Еще большую актуальность оптические технологии приобретают на предприятиях железнодорожного транспорта. Инфраструктурные предприятия железной дороги, обеспечивающие эксплуатацию и ремонт вагонов, по мнению авторов, являются перспективными для применения таких технологий. Это связано с особенностями, свойственными железнодорожному техническим системам.

Можно выделить следующие особенности, которые, с одной стороны, неблагоприятны для применения классических контактных и органолептических методик контроля и измерения технических параметров, а, с другой стороны, позволяют раскрыть потенциал бесконтактных средств контроля и измерения для повышения эффективности диагностирования технического состояния подвижного состава.

Линейные размеры. Большие линейные размеры подвижного состава и его отдельных частей ведут к увеличению размеров и веса измерительного и контрольного инструмента. В повседневной практике для измерения размеров отдельных элементов вагона, таких как параметры колеса или тележки, требуется применение довольно тяжелых и громоздких скоб, шаблонов, калибров и другого контрольно-измерительного инструмента, перемещать который от места хранения до места измерения и использовать его работнику неудобно и трудозатратно.

Вес вагона. Вес что груженого, что порожнего вагона серьезно ограничивает возможности применения ручного инструмента и визуальных способов при контроле состояния изнашиваемых в ходе эксплуатации деталей. Многие элементы остаются недоступны без трудозатратной разборки с использованием специального тяжелого инструмента и мощного подъемно-транспортного оборудования. Передвижение вагона для доступа к «неудачно» ориентированной стороне детали, например, при выявлении ползуна на колесной паре остановленного подвижного состава, невозможно без использования опасных лебедок либо маневровых локомотивов или тракторов.

Вагон является элементом системы «поезд». Даже одним вагоном манипулировать при контроле технического состояния сложно и опасно. При этом отдельный вагон большую часть времени находится в составе еще более крупной и сложной технической системы – состава поезда. Для контроля состояния одной детали конкретного вагона в составе поезда часто требуются манипулирование и перемещение всего или части всего состава вагонов.

Обыденной является *труднодоступность* вагона для осуществления контроля и измерения технических параметров. На станции, чтобы добраться до вагона, который требует проверки и контроля, приходится проходить либо проезжать большие расстояния в неблагоприятных погодных условиях. Требования безопасности предписывают обходить стоящий на пути к интересующему объекту контроля состав, который имеет значительную длину. Все это связано с большими затратами времени и труда, связаны с риском получения персоналом травм и заболеваний в неблагоприятных погодных условиях. Также к труднодоступности следует отнести высокую скорость перемещения движущегося вагона и необходимость применения средств дистанционного контроля.

Вагон выполняет свои функции в движении. Для повышения эффективности перевозочного процесса естественным стремлением является уменьшение времени простоя вагонов без движения. К этому времени относится и время, требующееся на осмотр и измерения, проводимые на станциях. Человек не может применять установленные в документации методы и инструменты измерения в движении. Остановки и задержки всего состава и связанные с этим задержки других составов на технических станциях не выгодны экономически и снижают эффективность перевозочного процесса.

На подвижной состав воздействуют загрязнения от грузов, атмосферные осадки. При контроле состояния вагона существуют риски воздействия на персонал электрического тока, опасность, связанная с движущимися рядом вагонами. Автоматизированные технологии контроля и измерений поэтому должны быть дистанционными и бесконтактными. Автоматизированная технология должна быть быстродействующей и надежной.

Перечисленные обстоятельства вынуждают как можно быстрее отказаться от использования органолептического способа контроля и измерения технических параметров ручным инструментом, заменив устаревшие технологии на современные автоматизированные. При этом затраты времени на обход и осмотр вагонов в составе будут минимизированы, отцепка будет производиться адресно, без подтверждения осмотрщика. Оптические сенсоры наиболее полно отвечают условиям использования при осуществлении диагностирования технического состояния подвижного состава, а наличие оптического изображения позволит подтверждать неисправность дистанционно.

Ввиду актуальности внедрения бесконтактных автоматизированных технологий в систему диагностирования технического состояния вагонов целью данной работы является отработка способа, алгоритмов и программного обеспечения для проведения измерения геометрических параметров профиля поверхности катания колесной пары при помощи системы оптических бесконтактных датчиков.

На железной дороге уже применяются разнообразные автоматизированные системы для дистанционного бесконтактного диагностирования технического состояния вагона, основанные на оптических технологиях. Отличительной особенностью таких систем является комплексированность. При этом отдельные системы, призванные для выявления признаков

некоторой группы неисправностей и работающие с использованием какого-то определенного физического принципа, посредством цифровой сети передачи данных объединятся в модульную систему [3]. Таким образом, на данном этапе задача автоматизации состоит в добавлении в существующую автоматизированную систему модулей, обладающих большей точностью, быстродействием и улучшенным функционалом, который позволит перейти на качественно новый уровень в организации системы эксплуатации вагонов.

В состав таких комплексных систем отдельными модулями входят основанные на оптических принципах подсистемы. К ним относятся система КТСМ и система лазерного измерения параметров колесной пары [1, 2]. Также к оптическим системам технического контроля принадлежит система «Техновизор» для анализа изображений, выявления на них признаков неисправностей и проведения измерений, системы коммерческого осмотра «АСКО ПВ 3D», система распознавания номеров вагонов по изображению с камеры.

Информационно объединяя модули, основанные на разных физических принципах работы, можно получать новые автоматизированные системы, характеризующиеся свойствами распределенности и дублирования. По такому принципу создана автоматизированная система, основной целью которой является реализация адресного подхода к техническому обслуживанию и осмотру вагона, при этом достигается повышение эффективности перевозочного процесса путем уменьшения времени осмотра состава. Время уменьшается путем исключения вагонов, не требующих осмотра и обслуживания [4].

Наиболее перспективными системами для использования на железной дороге следует считать высокоточные системы, которые позволяют наполнить «цифровой двойник» вагона актуальной и точной информацией, наиболее полно характеризующей его техническое состояние. Информацией, которая позволяет качественно преобразовать существующую систему эксплуатации и ремонта вагона. Так как техническое состояние вагона в основном характеризуется размерами его отдельных деталей, то и системы в идеальном случае должны выдавать информацию именно о размерах объектов, а не интерпретировать косвенные признаки неисправности, такие как повышенная температура и шум при работе узла. Непосредственный эффект работы таких систем – это мгновенное формирование сообщения для ответственного лица в случае выхода контролируемых характеристик объекта за допустимые границы. При этом основная по объему и значению информация, которая содержит место, время измерения и конкретные значения параметров объекта, должна автоматически передаваться в базу данных, ассоциированную с «цифровым двойником» как отдельной детали, так и вагона, состава вагонов в целом. Эта информация при автоматизированной обработке позволит выявить как состояние инфраструктуры, с которой взаимодействует вагон, так и конкретную причину возникшей неисправности или повышенного расхода остаточного ресурса детали.

Размеры детали в автоматизированных системах вычисляются из координат характерных точек, которые расположены на поверхности детали. Определить положение этих точек можно теневым способом, измерением дальности от точки с известными координатами, по относительным размерам отдельных элементов на изображении объекта. Кроме того, бесконтактные оптические системы можно разделить на те, что используются на предприятиях, занимающихся эксплуатацией вагонов, и те, что применяются в ремонтных депо. Последние обычно реализуются в виде встроенных в поточную линию стандов, в которые загружается исследуемая деталь вагона. В эксплуатации используются схемы, предполагающее пассивное наблюдение за вагоном сбоку или с не самого удобного ракурса при размещении датчиков на портале, через который проходит состав вагонов.

Перечисленные системы в качестве источника анализируемой информации используют видеокамеры для анализа изображения и подтверждения выявленной автоматически неисправности со стороны оператора. Также часто используются теневые оптические датчики, 1-D и 2-D лазерные дальномеры для высокоточных измерений и построения трехмерных моделей поверхности вагонов и визуализации результатов автоматического определения

неисправностей. Данные, получаемые оптическими датчиками в общем системами, основанными на обработке отраженного от объекта структурированного светового излучения, – это «облако» дискретных точек в пространстве принятой системы координат. Координатные системы могут быть цилиндрическими (при использовании лидаров) и прямоугольными при использовании дальномеров и 2D-сканеров. Самые простые измерительные системы дают информацию только об относительном расстоянии от места источника сигнала до места его отражения от объекта. Кроме того, косвенной информацией о состоянии объекта либо процесса измерения может являться отсутствие сигнала либо ошибка при обработке отраженного сигнала в определенный такт цикла измерений.

Серьезной проблемой использования оптических сенсоров является обеспечение точности показаний. Механические системы сканирования такой точностью не обладают из-за постоянно увеличивающихся зазоров в подвижных сочленениях при непрерывном режиме их эксплуатации. Движущиеся части приборов можно заменить электронным сканированием, однако пересчет координат при интерпретации изображения с цифровой матрицы прибора связан с потерей точности. Линейные сканеры не используют движущихся элементов при получении массива информационных данных по одной из осей измерений, так как сенсоры расположены в них неподвижно в линейном массиве.

В определенных сферах применения линейные устройства позволяют получать изображение без существенных вредных искажений, что, если целью является проведение измерений на цифровом отображении объекта, является наиболее предпочтительным способом оцифровки. Так, в качестве примера можно привести выбор такого способа в качестве наиболее перспективного направления развития автоматизированной системы «Интегрированный пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях (ППСС)», разработанного в рамках научно-технического проекта «Цифровая железная дорога (КНП-5)» [5]. При помощи линейного лазерного сканера при этом создается трехмерная модель вагона, на которой можно заметить неисправности и провести измерения для подтверждения неисправностей, выявляемых другими модулями автоматизированной системы [6]. Применение перспективной технологии планируется для анализа изображений вагона с целью выявления неисправностей и проведения технических измерений. Предлагается использование линейных видеокамер (сканеров) для формирования детализированного панорамного изображения целого поезда. Пример изображения, получаемого по такой технологии, показан на рисунке 1. Получение и анализ такого изображения даже без применения систем искусственного интеллекта, можно сказать, расширяет обычное человеческое восприятие. Можно одним взором рассмотреть объект, размер которого в длину составляет около километра, что в обычной жизни недоступно для человека. При самосканировании движущегося объекта на изображении наблюдается обратный эффект – изображение движущегося объекта предстает четким и неподвижным, а неподвижный фон размывается будто в движении. Для восприятия человека такое представление информации наиболее удобно, так как можно сконцентрироваться на важных деталях с целью выявления визуальных признаков неисправностей.



Рисунок 1 – Часть панорамного изображения состава поезда, полученное линейным сканером

Такое изображение наиболее удобно и для автоматической обработки, и для проведения измерений. В отличие от изображения, полученного обычной камерой с собирающей оптической системой объектива, изображение, полученное сканером, лишено таких искажений, как аберрации и виньетирование. Изображение является проекцией предмета изучения на плос-

кость, в которой установлен линейный сканер, и приближается по своим свойствам к идеальному конформному отображению. Такие данные практически не требуют предварительной обработки, а алгоритмы, упрощаясь, становятся более эффективными и быстродействующими. Важнейшим эффектом от внедрения системы ППСС с использованием линейного сканирования являются снижение количества отцепок вагонов в пределах гарантийных плеч за счет существенного повышения достоверности результатов контроля и диагностирования подвижного состава и груза, повышение подтверждаемости неисправностей, прогнозирование предотказных состояний, внедрение адресного подхода при осмотре вагонов [7].

Преимущества технологии линейного сканирования очевидны. Какие же практические вопросы применения такой технологии нужно решить? Есть две основные разновидности получения изображения объекта: теневое и диффузное. Диффузный способ используется в основном в сканерах текстовых документов и для получения панорамного изображения объекта. Теневым способом используется в высокоточных оптических микроскопах и микрометрах. Результат применения данного способа изображения – плоская цифровая проекция объемного объекта. С помощью этой копии автоматизированное оборудование позволяет проводить высокоточные измерения размеров по контуру тени исследуемого объекта. Для измерения профиля сечения объемной фигуры колеса вагона, по мнению авторов, это наиболее перспективный метод, так как реальное колесо имеет блестящую зеркальную поверхность. В таком случае можно ожидать появления засветок и помех от значительной зеркальной составляющей отраженного светового излучения. Кроме того, теневым методом можно применять даже тогда, когда фон является диффузным отражением от источника, находящегося в одной пространственной полусфере с приемником.

На рисунке 2 показаны возможные схемы построения измерительных диагностических систем для ходовой части вагонов, построенных по обсуждаемому принципу. Схему *а* можно реализовать как в вертикальной так и в горизонтальной плоскости. Горизонтально пару «приемник/источник» можно размещать в верхней или нижней части колеса. Эта схема больше подходит для измерений отдельной колесной пары или в составе тележки в условиях депо. Способ *б* больше пригоден для измерений параметров колеса в составе вагона, когда экраном диффузного отражения служит нижняя поверхность кузова и рамы вагона. Если схема *б* реализуется для условий ремонтного депо, то таким экраном может служить освещенный потолок помещения либо специально установленный экран. При использовании пары таких сканеров, расположенных в диаметрально противоположных положениях, можно провести сканирование в два раза быстрее и дополнительно определить диаметр исследуемой колесной пары, автоматически скорректировав время исследования, так как оно зависит от длины окружности круга колеса.

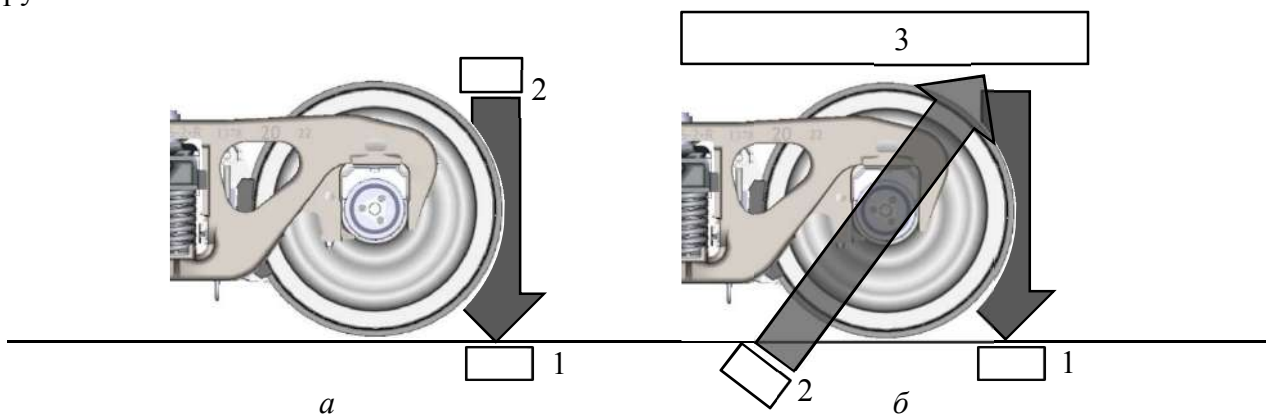


Рисунок 2 – Схемы теневых измерений параметров колеса: *а* – способ с размещением источника излучения напротив приемника; *б* – способ с размещением источника излучения в одной полусфере с приемником; 1 – приемник для сканирования тени поверхности катания; 2 – источник излучения; 3 – нижняя поверхность кузова вагона либо диффузный экран

Информация, поступающая со сканера, должна обрабатываться в автоматическом режиме на компьютере. Для поиска координат внешней границы поверхности катания колеса рационально воспользоваться наиболее простыми и надежными методами поиска границ на изображениях. Такие методы широко применяются в области технического зрения автоматизированных систем и распознавания образов [8]. Можно выделить в реализации таких методов две группы по характеру обрабатываемых данных – методы, основанные на бинаризации исходного изображения, когда обработке подвергается черно-белое пиксельное изображение, и методы полутонового пиксельного поля. Обработка бинарных изображений может показаться более эффективным способом, так как изображения занимают меньше места в памяти и на жестком диске, а алгоритмы используют двоичные операторы и переменные. Бинаризация изображения происходит путем применения достаточно простых и быстрых алгоритмов к полутоновому изображению. Однако для задачи высокоточных измерений, в таком случае теряется большой объем информации. Сложно проверить точность определения границ в случае отражений и засветок, дефектов на изображении, на полутоновой картине их можно исключить и восстановить положение вручную, обойдя несовершенные алгоритмы. Бинарное изображение теряет возможность выбора менее очевидной границы на изображении. В последнее время развитие теории и прикладных алгоритмов и библиотек распознавания образов приводит к использованию полутоновых пиксельных полей, что повышает достоверность результата распознавания [9].

На рисунке 3 показана схема реализации методики линейного сканирования для случая, когда контролируется состояние отдельной колесной пары. Реализация возможна в варианте для контроля отдельной колесной пары в колесном отделении депо, колесных пар в составе тележки в тележечном цехе и в составе поезда в движении на подходе к станции. В любом случае реализации линейный сканер закреплен на подвижной штанге, снабженной быстродействующим линейным приводом. Привод, получая команду о поступлении объекта в зону контроля, перемещает линейный сканер из исходного положения А в положение сканирования В. Исходное положение находится вне нижнего габарита подвижного состава, а рабочее положение области сканирования охватывает крайнее положение с учетом допусков и предельных размеров колеса. Сканирование изображения проекции профиля происходит за счет движения объекта при неподвижном сканере. Положение 1 сканера в момент начала сканирования совпадает с положением плоскости, касательной к максимально возможному размеру нового колеса (вершина гребня) с небольшим запасом, который определяется погрешностью датчика, определяющего положение колеса в зоне контроля. Положение 2 находится в плоскости, перпендикулярной оси пути и проходящей через точку перехода наружной плоскости колеса в фаску для случая минимально возможных размеров объекта контроля.

Согласно ГОСТ 10791–2011 «Колеса цельнокатаные...» расстояние S_1 складывается из верхних полей допуска и размеров высоты гребня и диаметра колеса и равен 510 мм плюс погрешность датчика определения центра колеса. Расстояние S_2 определяется минимальными требованиями к толщине ободьев колес в эксплуатации (22 мм) и чертежными размерами колеса с учетом нижних полей допуска. Согласно стандарту расположение точки второго сканирования будет 398 мм от точки проекции центра колеса минус погрешность определения положения. В случае расположения сканеров в плоскости, перпендикулярной оси пути, не требуется компенсация влияния высоты колеса на положение точек проекции профиля колеса. Сканеры находятся в области контроля такое время, которое достаточно для считывания параметров колеса как максимального, так и минимального размера. Полученное изображение интерпретируется программой.

Описанная схема может реализовываться в различных по функциям и сложности исполнениях. Самый простой вариант – два сканера, расположенные по сторонам пути. Второй вариант – четыре сканера расположены попарно с разных сторон пути. Третий вариант – последовательно расположенные по пути движения колес пары сканеров, последовательно считывающих через минимально возможный исходя из размеров единичного сканера интервал всю поверхность колеса. На рисунке 3 показана схема, поясняющая расположение сканера в случае контроля параметров колес в составе тележки. В таком случае для сканирования доступна поверхность катания, обращенная на внешнее по ходу движения тележки направление. Сканер выдвигается отдельно для считывания параметров первой и второй колесных пар по сигналу магнитной педали либо датчика, который точно определяет положение центра колеса. Информация с такого датчика используется для выдвигания сканеров в рабочую зону внутри габарита.

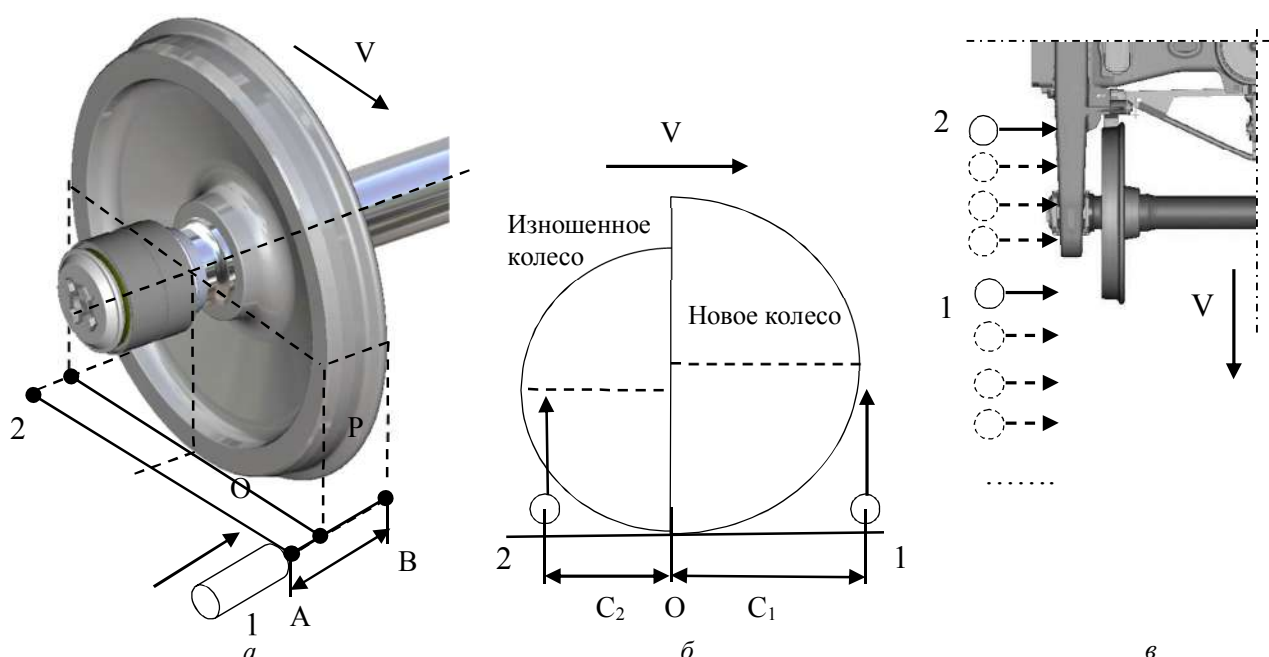


Рисунок 3 – Схема установки датчиков для установки, реализующей способ линейного сканирования профиля отдельного колеса (а, б): 1 – линейный сканер в первой позиции сканирования профиля; V – направление движения объекта контроля; 2 – вторая точка либо вторая позиция линейного сканера; А – исходная позиция линейного сканера вне габарита; В – позиция сканирования внутри габарита для контроля профиля колеса; Р – плоскость, касательная вершине гребня колеса; О – положение магнитного датчика положения проекции центра колеса. Схема последовательного расположения сканеров (в): сплошной линией показано размещение пары сканеров, а пунктиром показано последовательное размещение сканеров для возможности выявления точечных дефектов (количество и расстояние между последовательными сканерами зависит от размеров единичного сканера)

Предложенная схема по первому исполнению позволяет реализовать измерения и контроль следующих параметров колеса: равномерный прокат, износ гребня, вертикальный подрез гребня, ширина обода колеса менее допустимой величины, кольцевые выработки, остроконечный накат гребня. В случае расположения двух сканеров, работающих синхронно в позициях 1 и 2 с двух сторон колеса (второе исполнение), возможно вместе с перечисленными ранее дефектами выявлять тонкий обод, сдвиг колеса на оси, отклонения в расстоянии между внутренними боковыми поверхностями ободьев колес, разность диаметров колес в колесной паре. Кроме того, такая схема позволяет измерять диаметр колеса по кругу катания.

В случае последовательного размещения сканеров по пути движения тележки (третье исполнение) автоматизированная система в дополнение к перечисленным ранее может выявлять следующие неисправности: неравномерный прокат, ползун, местное уширение обода, откол

наружной боковой поверхности обода колеса, овальность и отклонение от соосности поверхности катания колес более допустимых размеров, излом обода колеса, изгиб оси колесной пары, разность расстояний между внутренними боковыми поверхностями ободьев колес более допустимых размеров.

Поступившая информация о диаметрах колес по кругу катания по отдельным колесным парам анализируется в рамках принадлежности к одному вагону, при этом выявляются неисправности: разница диаметров по кругу катания колесных пар в одной тележке и разность диаметров колес между тележками вагона. В случае применения высокоточных сенсоров для определения положения колес тележки можно выявлять разность баз по сторонам тележки и перекос тележки.

Установка, действующая по описанному принципу, формирует на выходе сканера теневую картину, показанную на рисунке 4.

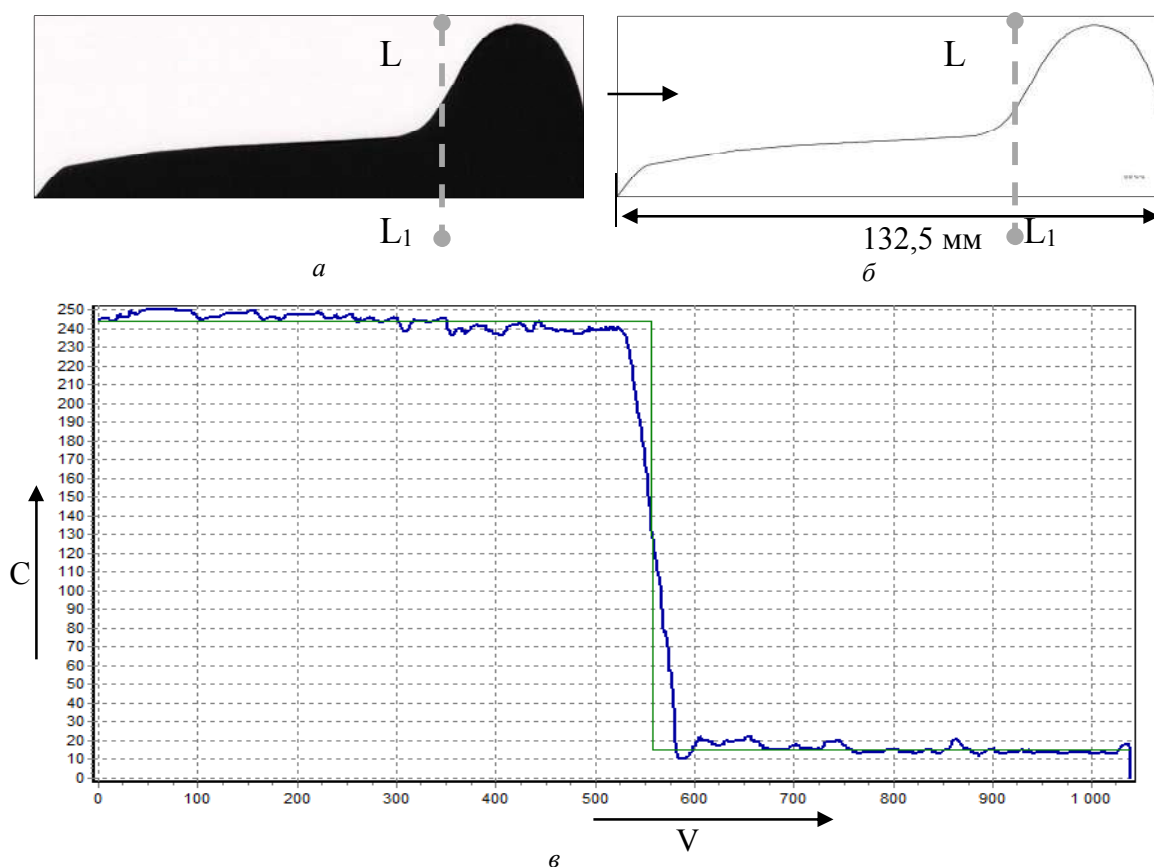


Рисунок 4 – Цифровое изображение теневой картины профиля катания колеса вагона (а), синтезированное изображение массива координат точек найденной границы «свет/тень» (б) и исходный размер образца, а также график изменения интенсивности света вдоль вертикальной линии и аппроксимация ступенчатой функции перехода «свет/тень» вдоль вертикальной линии изображения LL_1 (в), где V – положение пиксела относительно верхнего края исходного изображения; S – значение кода яркости полутона пикселей линии

На рисунке 4 показан реальный профиль, полученный путем слепка с колеса тележки, установленной в лаборатории. С целью отработки методики и программных алгоритмов обработки результатов сканирования исходными данными для оцифровки слепка использовался сканер документов, входящий в состав МФУ Samsung 2020, реализующий принцип линейного сканирования. Изображения для обработки могут сканироваться как в цветном режиме, так и в режиме градаций серого.

Для того чтобы определить координаты точек на таком изображении, нужно найти положение границы «свет/тень». Положение границы и координаты точек этой границы определяются путем аппроксимации линейного массива данных о значении усредненной по всем сос-

тавляющим кода цвета пиксела в формате RGB по отдельной линии изображения ступенчатой функцией. Координаты «ступеньки» указывают на положение границы. В рамках исследования разработана компьютерная программа, которая находит описанную границу на изображении и сохраняет ее характеристики в форме текстовой таблицы для дальнейшего исследования. В программе происходит минимизация функционала абсолютных различий значений элементов двух массивов. Первый массив – это код тона линии на полутоновом изображении, а второй – значения, аппроксимируемые ступенчатой функцией. Поиск минимума осуществляется применением модифицированного метода покоординатного спуска в пространстве нескольких параметров: значений высоты верхней и нижней «ступенек» в пределах от 0 до 255 (используется переменная байтового типа) и горизонтальной координаты перепада высоты ступенчатой функции в пределах размеров высоты исходного изображения.

Точность определения координат точек сечения поверхности катания здесь зависит от разрешения получаемого изображения, так как координаты границы тени пересчитываются из координат положения отдельных пикселей на изображении в миллиметры. Согласно приведенному на рисунке 4 графику определение координат точек, принадлежащих проекции теневой границы колеса, происходит с дискретностью 0,042 мм, что более чем достаточно для практических задач и превышает точность регламентированных документацией методик измерения.

Перечислим преимущества описанной методики контроля и алгоритма обработки данных с использованием линейных сканеров по сравнению с существующими методиками с использованием лазерных дальномеров. Считывание на постах контроля, расположенных на подходе к станциям, происходит на каждом посту в произвольных местах колеса, и полной картины о состоянии поверхности создать невозможно. Поэтому таким способом невозможно гарантированно выявлять точечные дефекты на поверхности катания, к которым относятся, например, неравномерный прокат и ползун, а также дефекты, которые несимметричны относительно центра колеса. Далее, дальномер располагается на удалении примерно от 200 до 1000 мм от исследуемой поверхности. В этом промежутке в момент измерения могут находиться частицы пыли, снег, мусор и т. д., что вносит существенные помехи. Линейный сканер в предлагаемой методике расположен в несколько раз ближе к объекту, что снижает вероятность попадания в промежуток между сканером и объектом помехи, и использует оптический способ считывания, максимально отвязанный от оптических aberrаций. Так как поверхность колеса обычно блестящая и зеркальная, то приемник дальномера воспринимает отражения от данной поверхности как истинный сигнал, а диффузная составляющая зеркальной поверхности при этом очень слабая. Для любого дальномера именно диффузное отражение от исследуемой поверхности наиболее удобно для регистрации. Автоматизированная система на основе принципа линейного сканирования, предлагаемая авторами, воспринимает только наиболее полезную диффузную составляющую света, которая не взаимодействовала с объектом как основной сигнал, игнорируя отраженные составляющие, что увеличивает достоверность считываемых данных.

Использование предлагаемой методики сканирования в варианте последовательного расположения сканеров позволит получить полную информацию о состоянии поверхности колесной пары. При этом данные не будут нуждаться в какой-либо интерпретации, так как будут соответствовать схеме, указанной в принятом стандарте в виде чертежа – непрерывной линии, расположенной в плоскости, параллельной оси колесной пары и огибающей продольное сечение поверхности катания. Формат представления данных будет также удобным – облако точек, аппроксимирующее поверхность колеса целиком. Такой «цифровой двойник» доступен для всестороннего исследования в части выявления и прослеживания эволюции дефектов при изнашивании. В комплексе с трехмерной моделью вагона и другой информацией, получаемой средствами существующих автоматизированных систем, это позволит проводить исследования связи развития отдельных дефектов колес с техническим состоянием других элементов вагона.

Таким образом, на основе анализа двух способов измерения размеров сечения поверхности катания колеса были показаны преимущества использования для этих целей линейного сканера. В рамках работы разработана программа в среде Delphi 7, которая позволяет проводить измерения размеров и формы сечения колеса вагона по теневому изображению поверхности катания, а также создать «цифровой двойник» для проведения дальнейших исследований. Данную программу и методику можно использовать для научных исследований и как основу для реализации способа измерения параметров реального колеса в эксплуатации. При помощи разработанной программы можно ускорить трудоемкий и длительный этап натурных испытаний при исследовании характеристик оптических датчиков в составе автоматизированных установок измерений, что ускорит внедрение цифровых технологий диагностирования технического состояния вагона и реализацию на железнодорожном транспорте программы «Цифровая железная дорога».

Список литературы

1. Патент № 2428341 С1 Российская Федерация, МПК В61К 9/12. Система комплексного диагностического контроля ходовых частей поездов : № 2010106420/11 : заявлено 25.02.2010 : опубликовано 10.09.2011 / Анпилов М. В., Григорьев К. В., Комиссаров А. Ф. [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». – 9 с.: ил. – Текст : непосредственный.
2. Комиссаров, А. В. Автоматизированный диагностический комплекс для измерения геометрических параметров колесных пар / А. В. Комиссаров, К. В. Григорьев. – Текст : непосредственный // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2011. – № 3. – С. 14–15.
3. Мониторинг технического состояния грузовых вагонов на ходу поезда / В. В. Попов, А. Н. Иванов, А. В. Смутин [и др.]. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – № 1-2 (92-93). – С. 52–56.
4. Патент № 2720603 С1 Российская Федерация, МПК В61К 9/00, G01М 17/08. Интегрированный пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава (призма) : № 2019136220 : заявлено 11.11.2019 : опубликовано 12.05.2020 / Бучин И. Р., Васильков А. А., Носков А. П., Морозов А. Г. ; заявитель: общество с ограниченной ответственностью «Инженерный центр «АСИ» (ООО «ИЦ «АСИ»). – 10 с.: ил. – Текст : непосредственный.
5. Интегрированный пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях (ППСС) // www.vnias.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: http://www.vnias.ru/images/download_Transzhat_2018/Integrirovannyj-post-avtomatizirovannogo-priema-i-dagnostiki-podvizhnogo-sostava-na-sortirovochnyh-stanciyah-PPSS.pdf (дата обращения: 30.05.2022).
6. Автоматика осматривает вагоны на ходу // www.vnias.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.vnias.ru/press-centre/493-avtomatika-osmatrivaet-vagony-na-khodu> (дата обращения: 30.05.2022).
7. Хатламаджиян, А. Е. Применение современных цифровых технологий и технических средств для повышения безопасности и эффективности перевозочного процесса подвижного состава / А. Е. Хатламаджиян, И. А. Яицков, И. А. Степин. – Текст : непосредственный // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (50). – С. 107–110.
8. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence*, 1986, vol. 8, no. 6, pp. 679–698.
9. Брухтий, А. В. Использование полутонового изображения при поиске границ символов / А. В. Брухтий, П. А. Куратов. – Текст : непосредственный // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2014. – Т. 64. – № 4. – С. 80–83.
10. Лeksuтов, И. С. Использование графического ядра конструкторской САПР для моделирования процесса контроля технического состояния вагона / И. С. Лeksuтов, В. П. Ключа. –

Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 76–80.

References

1. Anpilov M.V., Grigoriev K.V., Komissarov A.F. [and others] *Patent RU 2428341 C1*, 09.10.2011.
2. Komissarov A.V., Grigoriev K.V. Automated diagnostic complex for measuring geometrical parameters of wheel sets. *Vagony i vagonnoe hozyajstvo – Wagons and wagon facilities*, 2011, no. 3, pp. 14-15 (In Russian).
3. Popov V.V., Ivanov A.N., Smutin A.V. Monitoring of the technical condition of freight cars on the train. *Transport Rossijskoj Federacii – Transport of the Russian Federation*. 2021, no. 1-2 (92-93), pp. 52-56 (In Russian).
4. Buchin I.R., Vasilkov A.A., Noskov A.P., Morozov A.G. *Patent RU 2720603 C1*, 12.05.2020.
5. *Integrirovannyj post avtomatizirovannogo priema i diagnostiki podvizhnogo sostava na sortirovochnyh stanciyah (PPSS)* [Integrated post for automated acceptance and diagnostics of rolling stock at marshalling yards (PPSS)] Available at: [http://www.vniias.ru/images/download_Transzhat_2018/Integrirovannyj-post-avtomatizirovannogo-priema-i-diagnostiki-podvi](http://www.vniias.ru/images/download_Transzhat_2018/Integrirovannyj-post-avtomatizirovannogo-priema-i-diagnostiki-podvizhnogo-sostava-na-sortirovochnyh-stanciyah-PPSS.pdf)zhnogo-sostava-na-sortirovochnyh-stanciyah-PPSS.pdf (accessed 30.05.2022).
6. *Avtomatika osmatrivaet vagony na hodu* [Automation inspects the cars on the go]. Available at: <http://www.vniias.ru/press-centre/493-avtomatika-osmatrivaet-vagony-na-khodu> (accessed 30.05.2022).
7. Khatlamadzhian A.E., Yaitskov I.A., Stepin I.A. Application of modern digital technologies and technical means to improve the safety and efficiency of the rolling stock transportation process. *Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya – Proceedings of the Rostov State University of Railways*. 2020, no. 1(50), pp. 107-110 (In Russian).
8. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence*, 1986, vol. 8. no. 6, pp. 679-698.
9. Brukhtiy A.V., Kuratov P.A. Use of a halftone image when searching for the boundaries of symbols. *Trudy instituta sistemnogo analiza rossijskoj akademii nauk – Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 64, no. 4, pp. 80-83. (In Russian).
10. Leksutov I. S., Klyuka V. P. Using the graphic core of the design CAD for modeling the process of monitoring the technical condition of the car. *Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte : materialy nauchnoj konferencii* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport: materials of a scientific conference]. Омск, OSTU, 2019, pp. 76-80 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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) 31-22-84.

E-mail: Leksutov@mail.ru

Клюка Владислав Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leksutov Ilya Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Railway cars and railway car facilities», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-22-84.

E-mail: Leksutov@mail.ru

Kluka Vladislav Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-22-84.

E-mail: vklyuka@mail.ru

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Railway cars and railway car facilities», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-22-84.

E-mail: vklyuka@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лексутов, И. С. К возможности применения линейного сканера для создания средств технического контроля геометрических параметров продольного сечения поверхности катания колеса вагона / И. С. Лексутов, В. П. Ключа. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 51 – 63.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Leksutov I. S., Kluka V.P. To the possibility of using a linear scanner to create means of technical control of geometric parameters of the longitudinal section of the rolling surface of the railcar wheel. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 3 (51), pp. 51-63 (In Russian).

УДК 625.03

С. Г. Инагамов, Ш. Б. Джаббаров, Б. А. Абдуллаев

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРЕХСЕКЦИОННЫХ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДКАХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ

Аннотация. В настоящей статье с помощью программного обеспечения установлена взаимосвязь между структурой материала тормозной колодки и распределением температуры теплового напряжения на ней. Пространственно-временные распределения тепловых напряжений были аналитически определены для поверхностного слоя фрикционного элемента на основе модели трехсекционной тормозной колодки с незафиксированными краями.

В настоящее время колодочный тормоз широко используется для грузовых поездов. Он преобразует динамическую энергию в тепловую, используя трение между колодками и колесом, а затем рассеивает тепловую энергию через теплообменник. Данный процесс включает в себя теплообмен, конструктивные особенности, механические характеристики, свойства материала и др. В статье особое внимание уделяется тормозному давлению колодки, режиму торможения, материалу тормозных колодок и другим факторам. Моделирование тепловых эффектов является наиболее важным при проектировании деталей и узлов транспортных средств. Тепловые исследования являются актуальным этапом в изучении тормозных систем именно железнодорожных транспортных средств, где нужно тормозить большие массы, так как тепловая нагрузка на заторможенное железнодорожное колесо преобладает по сравнению с другими видами нагрузок. В данной работе исследовано тепловое напряжение на фрикционном элементе колодки при торможении. При фрикционном торможении процесс трения тормозной колодки и колеса происходит в точках фактического контакта. Тепловой поток от точек фактического контакта распространяется по всей геометрической площади колодки.

Ключевые слова: колодочный тормоз, скорость, контактное давление, чугунная колодка, колесо, температура.

Sardor G. Inagamov, Shukhrat B. Djabbarov, Bakhrom A. Abdullaev

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, the Republic of Uzbekistan

STUDIES OF THE DISTRIBUTION OF THERMAL STRESSES IN THREE-SECTION BRAKE PADS OF FREIGHT CARS DURING MOVEMENT

Abstract. In this article, with the help of software, the relationship between the structure of the material of the brake pad and the temperature distribution of thermal stress on it is established. Spatio-temporal distributions of thermal stresses were analytically determined for the surface layer of the friction element based on the model of a three-section brake pad with non-fixed edges.

At present, shoe brake is widely used for freight trains. It converts dynamic energy into thermal energy using the friction between the pads and the wheel, and then dissipates the thermal energy through a heat exchanger. This process includes heat transfer, design features, mechanical characteristics, material properties and other. The article pays special attention to the brake pad pressure, braking mode, brake pad material and other factors. Modeling of thermal effects is

the most important in the design of vehicle parts and assemblies. Thermal research is an important step in the study of braking systems namely railway vehicles, where it is necessary to break large masses, since the thermal load on the braked railway wheel prevails compared to other types of loads. In this paper, the thermal stress on the friction element of the shoe during braking is investigated. In frictional braking, the process of friction between the brake pad and the wheel occurs at the points of actual contact. The heat flow from the points of actual contact spreads over the entire geometric area of the block.

Keywords: pad brake, speed, contact pressure, cast iron pad, wheel, temperature.

Мощность и эффективность тормозов определяются по трем основным показателям: скорость поезда, масса состава и длина тормозного пути.

Оценка факторов, влияющих на распределение контактных давлений между колесом и тормозной колодкой:

- соответствие геометрической формы и размеров колеса и колодки;
- возможная деформация колодки за счет сил нажатия;
- температурные деформации колодки, обусловленные нагревом в процессе торможения;
- износ колодки во время торможения;
- износ колеса.

В настоящее время на множестве вагонов используются чугунные колодки из стандартных материалов с повышенным содержанием фосфора – 1,0 – 1,5 %. Коэффициент теплопроводности – 48 Вт/м·град [6]. В грузовых вагонах железных дорог СНГ и в США применяется одностороннее нажатие тормозных колодок. Колодочный тормоз с односторонним нажатием на колеса гарантирует наименьшую тормозную эффективность. К неэффективности одностороннего нажатия можно отнести большое удельное давление колодки на колесо и в итоге – меньший коэффициент трения.

Коэффициент распределения тепловых потоков зависит от контактного взаимодействия колодки с колесом, тепловыделения от трения и износа контактирующих поверхностей [1 – 5, 12].

Для теплового расчета тормозов можно применять следующие модели: одномерную, двумерную, элементную трехмерную [7], для чего необходимо записать дифференциальное уравнение нестационарной тепловой проводимости в соответственной постановке, задать граничные обстоятельства и решить задачу.

Альтернатива выбора модели находится в зависимости от интервала времени изучения начала подведения тепловой струи. При длительном контроле, когда станут вступать в силу граничные условия теплоотвода, расхождение полученных данных, приобретенных на большинстве моделей, является актуальным.

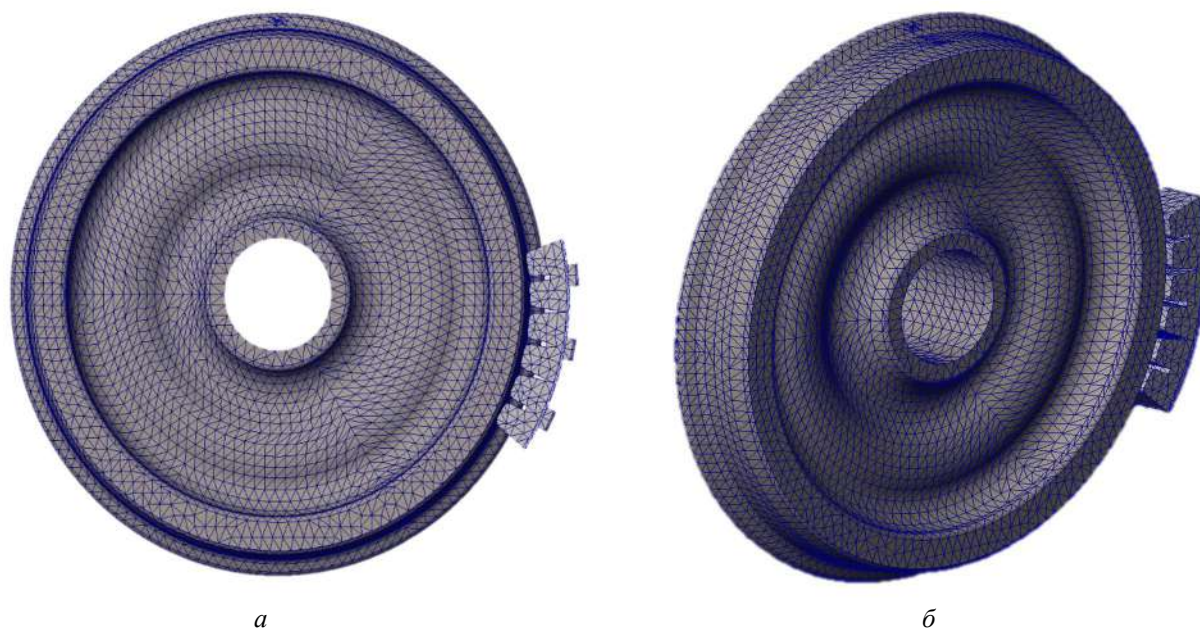


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель сопряжения «колесо – колодка» (вид спереди (а) и сбоку (б))

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На исследуемой модели, включенной в программное обеспечение COMSOL, сначала был проведен анализ теплопередачи, затем в результате статического анализа структуры было получено тепловое напряжение колодки. Расчет теплового напряжения был основан на выбранном конкретном временном температурном поле, переходящем из анализа переходного нагрева.

Для решения задач с излишками материалов, выделенных в процессе трения, предлагается оптимальный фрикционный узел для тормозной системы грузовых вагонов.

Характеристика объекта исследования: чугунная колодка: длина – 390 мм, толщина – 65, ширина – 80 мм. Радиус поверхности трения – 530 мм, площадь трения меняется в зависимости от износа и диаметра колеса, как и у серийных колодок с радиусом $R_k = 75$ мм, стальное колесо радиусом $R_p = 475$ мм, сила прижатия колодки к колесу $K = 35$ кН, режим торможения: торможение с постоянной скоростью $v = 60$ км/ч и с постоянной угловой скоростью $\omega = 5,85$ с⁻¹.

Имея расчетную модель фрикционного узла, созданного в программе, нужно указать параметры «свойства материала».

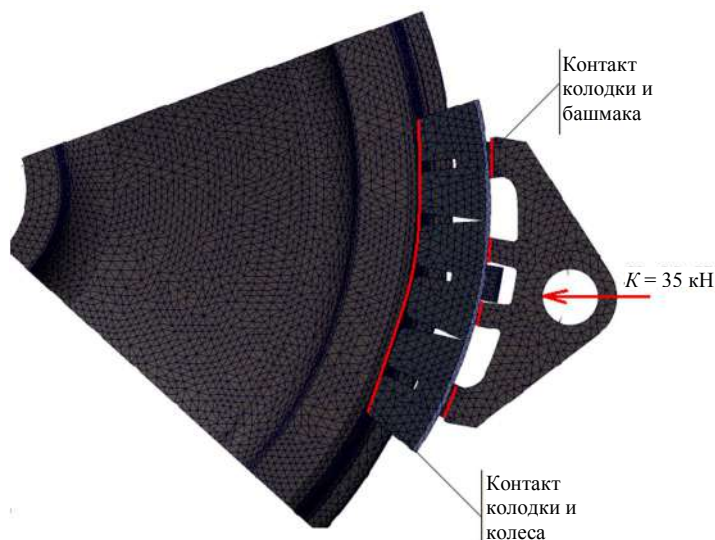


Рисунок 2 – Контактная связь колеса и колодки с башмаком

На рисунке 2 показана конечно-элементная модель контакта «колесо – колодка».

Получение результатов от поставленных задач осуществлялось за счет применения метода конечных элементов (МКЭ), анализ температуры тормозной колодки во время торможения был выполнен с использованием программы COMSOL и показано распределение температуры с различными временными интервалами.

Далее необходимо задать свойства материала и силы, действующие на моделируемую деталь [8]. Имея существующие в узле материалы, выбираем

колесо и чугун со свойствами, указанными в таблице 1 [9] и из библиотеки Solid Works.

Таблица 1 – Свойства и термодинамические параметры фрикционных материалов, применяемых для тормозных элементов [9]

Параметр	Колесная сталь	Тормозные колодки	
		чугун	композиция
Плотность материала ρ , кг/м ³	7850	7250 – 7700	2200
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	43	38	1 – 4
Удельная теплоемкость C , Дж/кг·К	481	545	900
Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	$11,4 \cdot 10^{-6}$	$10,2 \cdot 10^{-6}$	$(0,505-2,02) \cdot 10^{-6}$
Коэффициент трения φ_k	–	0,08 – 0,28	0,21 – 0,39

На рисунке 3 показано изменение температуры в зависимости от времени в процессе торможения. Самая высокая температура возникает примерно через 30 с. В этот момент на поверхности колодки достигается максимальная температура 500 °С.

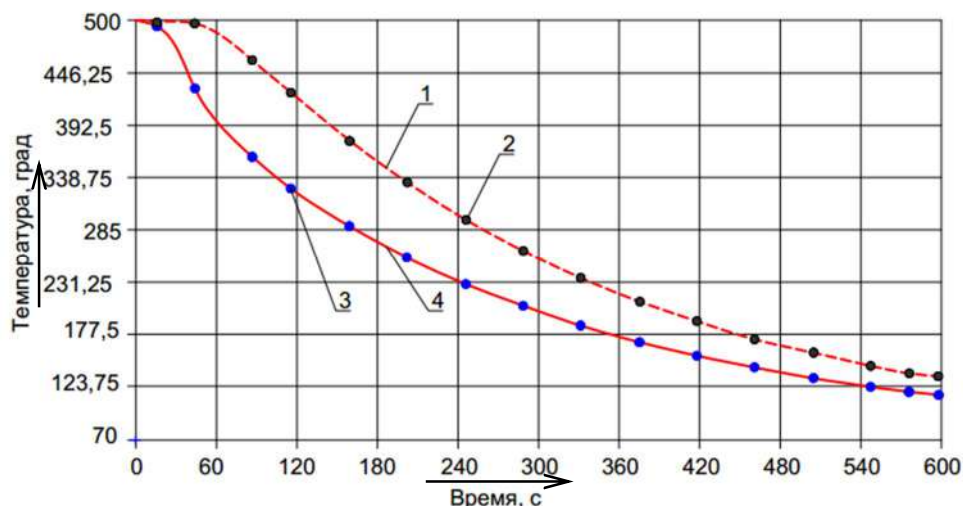


Рисунок 3 – Результаты аналитического расчета: 1 – на поверхности (аналитическое решение); 2 – на поверхности (расчет в COMSOL); 3 – на глубине 5 см (расчет в COMSOL); 4 – на глубине 5 см (аналитическое решение)

На контактной поверхности «колесо – колодка» при торможении фрикционных элементов возникают [10, 11] температурные и термические напряжения, где температура измеренных точек зависит от времени.

На рисунке 4 показаны изменение и распределение температуры по поверхности колеса в зависимости от времени в процессе торможения. Температура на поверхности колеса устанавливается примерно через 0,0205 с от начала торможения. В этот момент времени на поверхности колодки достигается максимальная температура 75 °С.

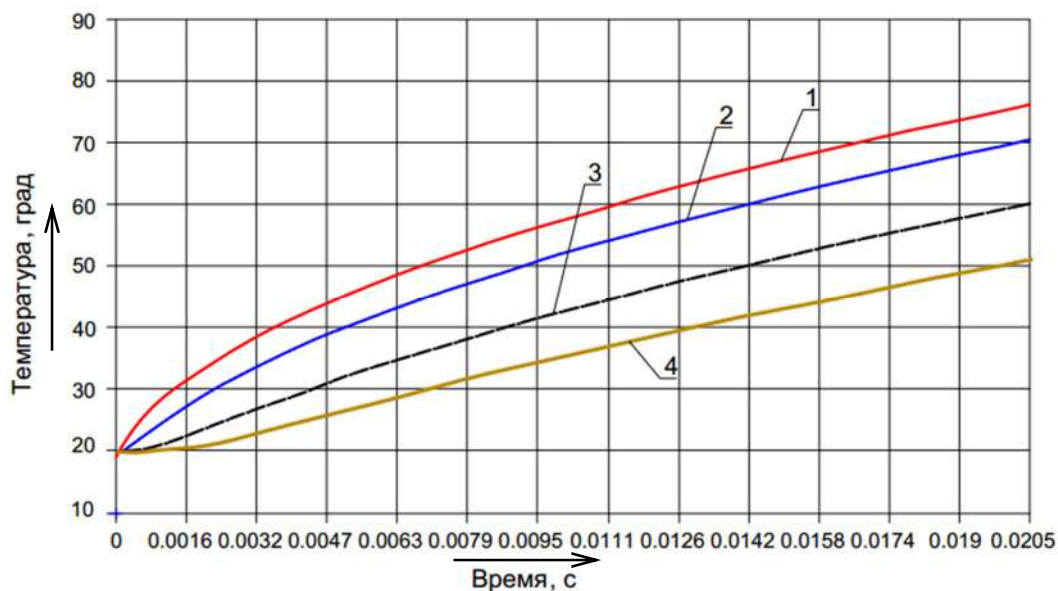


Рисунок 4 – Распределение температуры по поверхности колеса, мм:
1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,3

Диаграммы исследуемого в момент процесса торможения $t = 0,0205$ с показаны на рисунке 5, где распределение температуры принято для различных режимов торможения.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

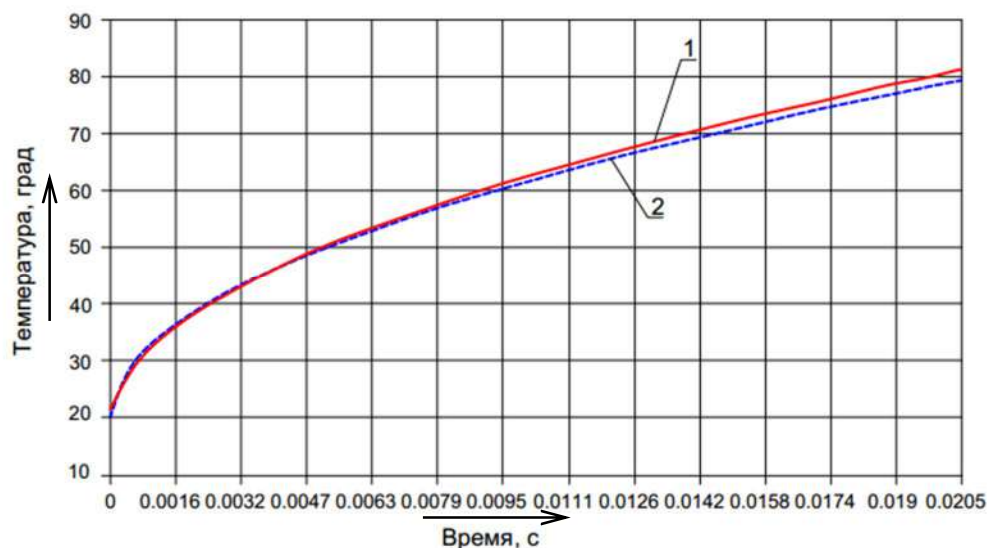


Рисунок 5 – Распределение температуры по поверхности колодки:
1 – программное решение; 2 – эмпирическая формула В. Г. Иноземцева

На рисунках 6, 7 показаны графики временной зависимости контактного давления на подшве колодки и фактической площади контакта от разницы радиусов колеса и колодки. С увеличением времени вращения для колодки из чугуна наблюдается граничное контактное давление (таблица 2, рисунки 8, 9).

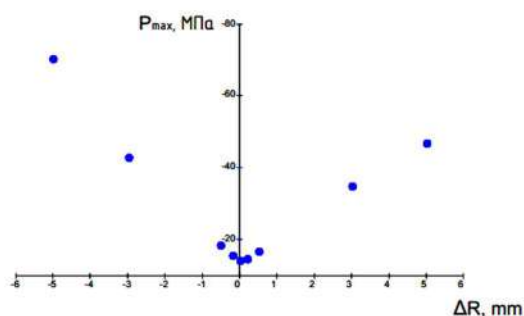


Рисунок 6 – Контактное давление $P_{\max}$ в зависимости от разницы радиусов колеса и колодки ΔR

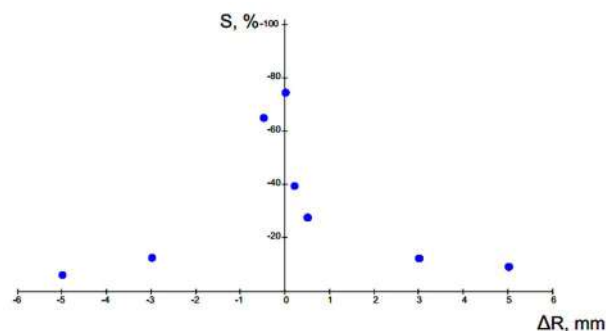


Рисунок 7 – Фактическая площадь контакта S в зависимости от разницы радиусов колеса и колодки ΔR

Таблица 2 – Влияние трения и геометрических размеров колеса и колодки на распределение контактного давления

Разница между радиусами колодки и колеса $\Delta R = R_k - R_p$, мм	Максимальный зазор между колесом и колодкой $\Delta_{\max}$, мм	Значения максимального давления на поверхности контакта $P_{\max}$, МПа	Доля поверхности колодки, вошедшей в контакт	
			%	количество пар узлов
-5	0,343	70,1	6	36
-3	—	33,5	12,5	74
-0,5	0,034	18,95	65	385
-0,2	0,014	16,1	100	594
0	0	14	74,5	443
+0,2	0,014	14,4	39,4	234
+0,5	0,034	16,5	27,6	164
+3	—	34,8	12,1	72
+5	0,0335	46,7	9	54

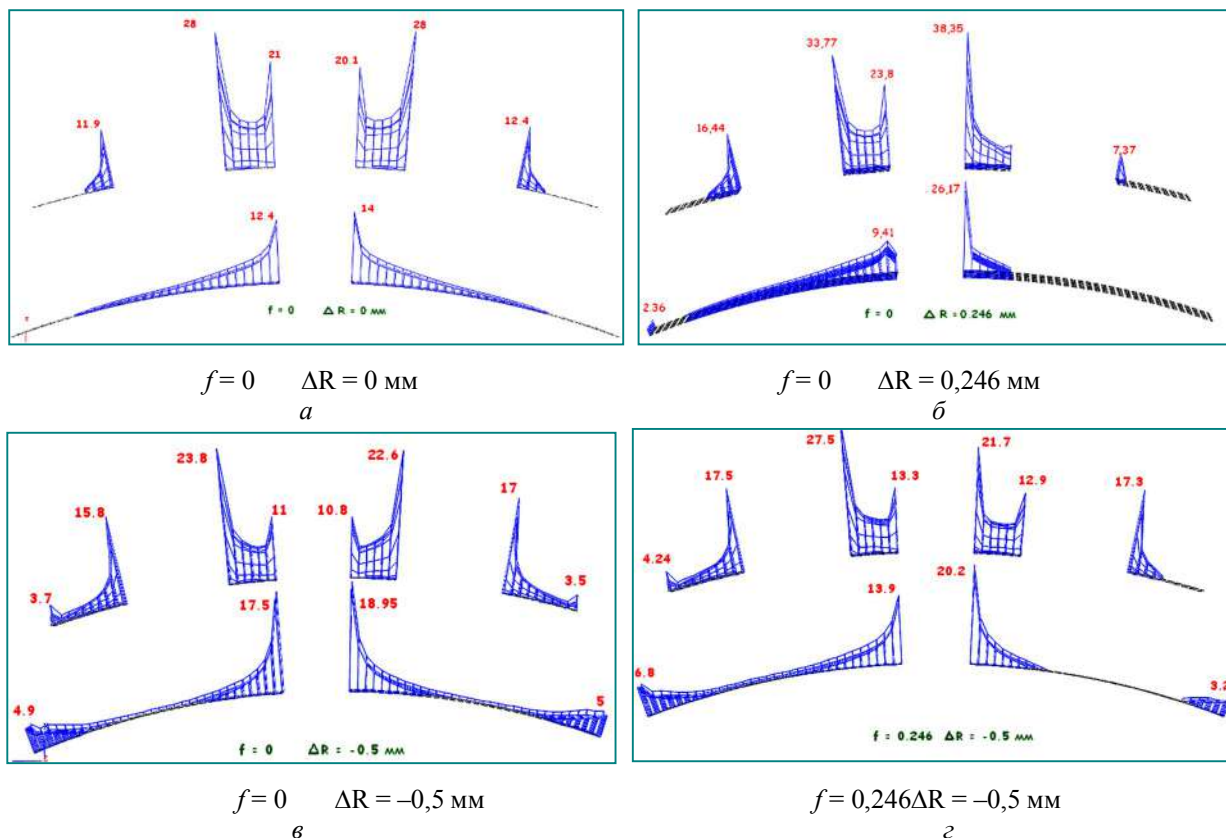


Рисунок 8 – Влияние трения на распределение контактного давления

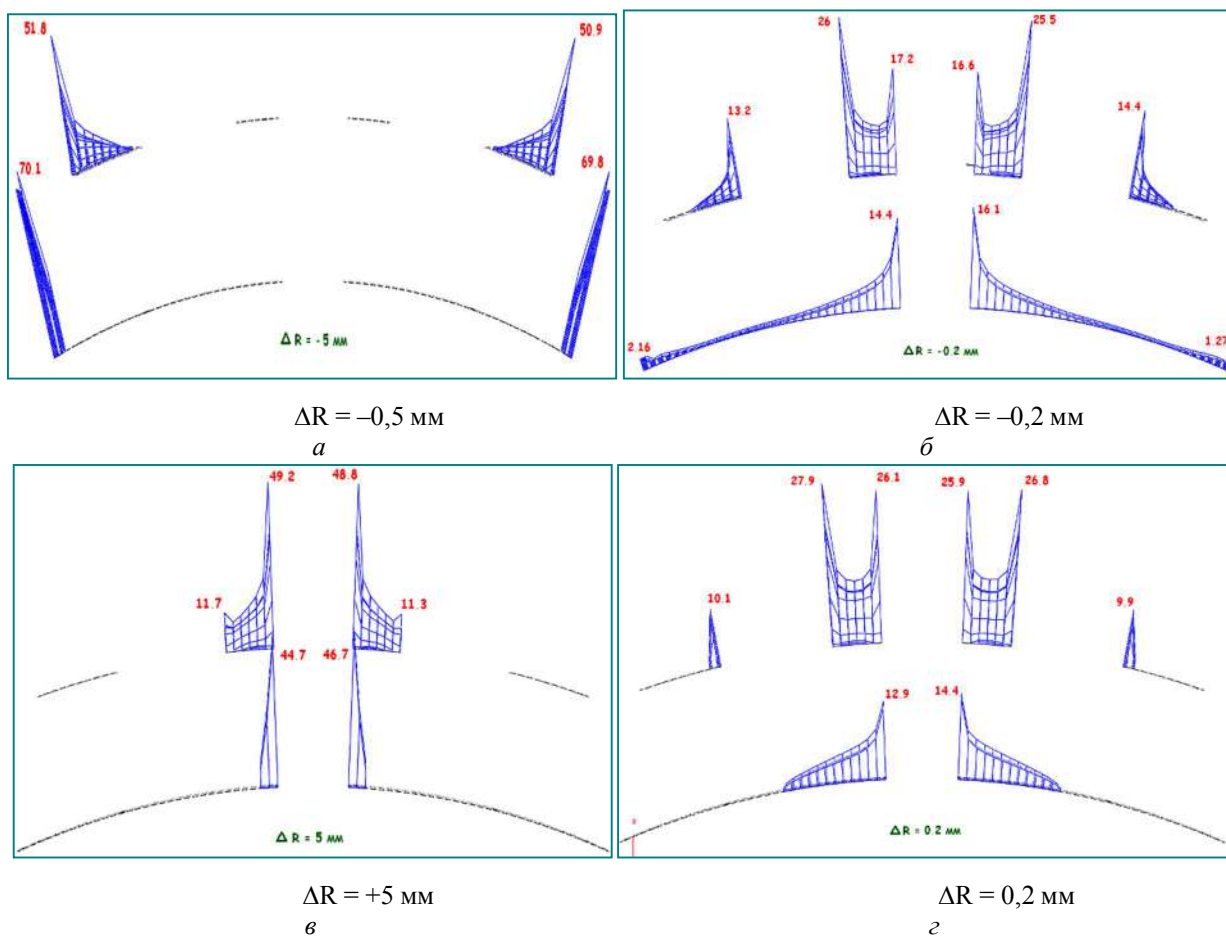


Рисунок 9 – Влияние зазора на характер распределения контактного давления

Тепловой расчет рассмотренной модели показывает возможность использования колодки в эксплуатации. Проведенные в научном исследовании расчеты показали, что при определении величины износа и температуры необходимо учитывать зависимости от физико-механических и теплофизических показателей материалов, а также коэффициента трения в точке контакта от температуры.

На основе результатов решения поставленных задач, которое осуществлялось за счет применения метода конечных элементов, анализа температуры тормозной колодки во время торможения с использованием программы COMSOL и имеющегося в результате данного анализа распределения температуры с различными временными интервалами можно достичь наибольшей точности тепловых расчетов при проектировании тормозного оборудования.

Список литературы

1. Milošević M.S. [et al.]. Tomić modeling thermal effects in braking systems of railway vehicles. *Modeling Thermal Effects in Braking Systems of Railway Vehicles Thermal Science*, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 515-526.
2. Mačuzić S [et al.]. Thermal analysis of solid and vented disc brake during the braking process. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 19-26.
3. Мишин, А. А. Расчет температурных полей и напряжений в деталях дискового тормоза скоростного вагона / А. А. Мишин. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2010. – № 6. – С. 39–43.
4. Балакин, В. А. Температурные задачи трения / В. А. Балакин, В. П. Сергиенко, Ю. В. Лысенко. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 2002. – № 3 (23). – С. 258–267.
5. Галай, Э. И. Испытания и тепловой расчет колодочных тормозов железнодорожного подвижного состава / Э. И. Галай, В. А. Балакин. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 1999. – № 5 (20). – С. 480–488.
6. Инагамов, С. Г. Фрикционный узел колодочного тормоза локомотивов и грузовых вагонов / С. Г. Инагамов. – Текст : непосредственный // Механика. Исследования и инновации. – 2021. – № 14. – С. 67–74.
7. Першин, В. К. Моделирование тепловых режимов при фрикционном взаимодействии колеса и тормозной колодки / В. К. Першин, Л. А. Фишбейн. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2005. – № 1. – С. 34–42.
8. Жаров, И. А. Приближенный расчет поверхностных температур системы «колодки – колесо – рельс» / И. А. Жаров, И. Н. Воронин, С. Б. Курцев. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 2003. – Т. 24. – № 2. – С. 144–152.
9. Чебаков, М. И. Моделирование контактного взаимодействия железнодорожного колеса и тормозной колодки с учетом износа, тепловыделения от трения и зависимости механических параметров от температуры / М. И. Чебаков, С. А. Данильченко, А. А. Ляпин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия Естественные науки. – 2018. – № 4 (200). – С. 49–53.
10. Turanov K., Gordienko A., Saidivaliev S., Djabborov S. Designing the height of the first profile of the marshalling hump. *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019*, 2020, pp. 03038.612.
11. Turanov K., Gordienko A., Saidivaliev S., Djabborov S. Movement of the wagon on the marshalling hump under the impact of air environment and tailwind. *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019*, 2020, pp. 03041.413.
12. Галай, Э. И. Оценка работы тормозного оборудования грузовых вагонов на участке Ангрен – Пап АО «Узбекские железные дороги» / Э. И. Галай, С. Г. Инагамов, А. А. Юлдашов. – Текст : непосредственный // Механика. Исследования и инновации. – 2020. – № 13. – С. 47–54.

References

1. Milošević M.S. [et al.]. Tomić modeling thermal effects in braking systems of railway vehicles. *Modeling Thermal Effects in Braking Systems of Railway Vehicles Thermal Science*, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 515-526.
2. Mačuzić S [et al.]. Thermal analysis of solid and vented disc brake during the braking process. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 19-26.
3. Mishin A.A. Calculation of temperature fields and stresses in the details of the disc brake of a high-speed car. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*, 2010, no. 6, pp. 39-43 (In Russian).
4. Balakin V.A., Sergienko V.P., Lysenok Iu.V. Temperature problems of friction. *Trenie i iznos – Friction and wear*, 2002, no. 3(23), pp. 258-267 (In Russian).
5. Galai E.I., Balakin V.A. Testing and thermal calculation of pad brakes of railway rolling stock. *Trenie i iznos – Friction and wear*, 1999, no. 5(20), pp. 480-488 (In Russian).
6. Inagamov S.G. Friction block brake assembly for locomotives and freight cars. *Mekhanika. Issledovaniia i innovatsii – Mechanics. Research and innovation*, 2021, no. 14, pp. 67-74 (In Russian).
7. Pershin V.K., Fishbein L.A. Simulation of thermal conditions in the frictional interaction of the wheel and brake pad. *Transport Urala – Transport Of The Urals*, 2005, no. 1, pp. 34-42 (In Russian).
8. Zharov I.A., Voronin I.N., Kurtsev S.B. Approximate calculation of surface temperatures of the «pads – wheel – rail» system. *Trenie i iznos – Friction and wear*, 2003, vol. 24, no. 2, pp. 144-152 (In Russian).
9. Chebakov M.I., Danil'chenko S.A., Liapin A.A. Modeling of the contact interaction of a railway wheel and a brake pad, taking into account wear, heat release from friction and the dependence of mechanical parameters on temperature. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya Estestvennye nauki – News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Natural Sciences series*, 2018, no. 4(200), pp. 49-53 (In Russian).
10. Turanov K., Gordienko A., Saidivaliev S., Djabborov S. Designing the height of the first profile of the marshalling hump. *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019*, 2020, pp. 03038.612.
11. Turanov K., Gordienko A., Saidivaliev S., Djabborov S. Movement of the wagon on the marshalling hump under the impact of air environment and tailwind. *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019*, 2020, pp. 03041.413.
12. Galai E.I., Inagamov S.G., Iuldashov A.A. Evaluation of the work of the braking equipment of freight cars on the Angren – Pap section of Uzbek Railways JSC. *Mekhanika. Issledovaniia i innovatsii – Mechanics. Research and innovation*, 2020, no. 13, pp. 47-54 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Инагамов Сардор Гафуржанович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирйулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Соискатель кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ТГТрУ.

Тел.: +99899-333-36-28.

E-mail: inagamov_sardor@mail.ru

Джаббаров Шухрат Батирович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирйулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, и. о. доцента кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ТГТрУ.

Тел.: +99893-535-72-27.

E-mail: shuhratassistant@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Inagamov Sardor Gafurzhanovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryulchilar st., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Applicant of the department «Wagons and wagon equipment», TSTU.

Phone: +99899-333-36-28.

E-mail: inagamov_sardor@mail.ru

Djabbarov Shukhrat Batirovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryulchilar st., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, acting associate professor of the department «Wagons and wagon equipment», TSTU.

Phone: +99893-535-72-27.

E-mail: shuhratassistant@gmail.com

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Абдуллаев Бахром Актамович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, и. о. доцента кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ТГТУ.

Тел.: +99890-372-14-80.

E-mail: baxrom@yandex.ru

Abdullaev Bakhrom Aktamovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryulchilar st., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, acting associate professor of the department «Wagons and wagon equipment», TSTU.

Phone: +99890 372-14-80.

E-mail: baxrom@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Инагамов, С. Г. Анализ распределения тепловых напряжений в трехсекционных тормозных колодках грузовых вагонов при движении / С. Г. Инагамов, Ш. Б. Джаббаров, Б. А. Абдуллаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 63 – 71.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Inagamov S.G., Djabbarov S.B., Abdullaev B.A. Studies of the distribution of thermal stresses in three-section brake pads of freight cars during movement. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 3 (51), pp. 63-71 (In Russian).

УДК 629.4.015

И. И. Галиев, М. Х. Минжасаров, Д. В. Липунов

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

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ КОЛЕСНО-МОТОРНЫХ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ 2ЭС6

Аннотация. В статье поставлена задача определения уровня динамической нагруженности в подсистеме «тележка – поводок – тяговый электродвигатель» для снижения динамического воздействия в системе «локомотив – путь». Модель вертикальных колебаний тягового подвижного состава, полученная на основе уравнения Лагранжа второго рода, в виде системы из четырнадцати дифференциальных уравнений позволяет оценить нагруженность узлов локомотива в эксплуатации, интегрируется с помощью прикладного пакета MathCAD. В качестве спектральной плотности случайных возмущений выбрана аппроксимация случайных возмущений с использованием спектральной плотности неровности пути профессора А. И. Беляева. Составлена более подробная расчетная схема экипажа и с целью упрощения расчета в рамках инженерной погрешности используется одномассовая дискретная модель пути. Ввод симметричных координат позволяет получить из исходной системы дифференциальных уравнений упрощенную систему с характеристическими уравнениями с простыми корнями, следовательно, собственные частоты колебаний подпрыгивания кузова, тележки и колесной пары будут определены с минимальной погрешностью. Передаточная функция определяется по формулам Крамера. С помощью ЭВМ рассчитаны значения и построены графики амплитудно-частотных характеристик вертикальных перемещений, максимальных ускорений кузова, тележки, тягового электродвигателя и колесной пары рассматриваемого электровоза. Проведен сравнительный анализ результатов расчета и эмпирических данных. На основании сравнительного анализа можно утверждать, что рассмотренная математическая модель колебаний электровоза 2ЭС6 «Синара» является адекватной и позволяет определить динамическую нагруженность локомотива для всего диапазона эксплуатационных скоростей. Поставлена задача изменения существующей конструкции системы подвешивания тягового электродвигателя рассматриваемого электровоза и математического анализа колебаний его узлов в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: тяговый подвижной состав, колесно-моторный блок, математическая модель, расчетная схема, динамическая нагруженность, вертикальные колебания, галопирование тягового электродвигателя.

Ilkham I. Galiev, Marat Kh. Minzhasarov, Dmitry V. Lipunov

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

EVALUATION OF DYNAMIC LOADING OF WHEEL-MOTOR UNITS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES 2ES6

Abstract. The article sets the task of determining the level of dynamic loading in the «trolley-leash-traction motor» subsystem to reduce the dynamic impact in the «locomotive-path» system. The model of vertical vibrations of traction rolling stock, obtained on the basis of the Lagrange equation of the second kind, in the form of a system of fourteen

differential equations allows us to estimate the loading of locomotive units in operation, integrated using the MathCAD application package. The approximation of random disturbances using the spectral density of the path irregularity of Professor A. I. Belyaev is chosen as the spectral density of random disturbances. A more detailed design scheme of the crew has been compiled and in order to simplify the calculation within the engineering error, a single-mass discrete model of the path is used. Entering symmetric coordinates allows us to obtain from the original system of differential equations a simplified system with characteristic equations with simple roots, therefore, the natural oscillation frequencies of the bouncing of the body, trolley and wheelset will be determined with minimal error. The transfer function is determined by Kramer's formulas. With the help of a computer, the values are calculated and graphs of the amplitude-frequency characteristics of vertical movements, maximum accelerations of the body, trolley, traction motor and wheelset of the electric locomotive in question are constructed. A comparative analysis of the calculation results and empirical data is carried out. Based on a comparative analysis, it can be argued that the considered mathematical model of vibrations of the electric locomotive 2ES6 «Sinara» is adequate and allows determining the dynamic loading of the locomotive for the entire range of operating speeds. The task of changing the existing design of the suspension system of the traction electric motor of the electric locomotive in question and the mathematical analysis of the vibrations of its nodes in further research is set.

Keywords: traction rolling stock, wheel-motor unit, mathematical model, design scheme, dynamic loading, vertical oscillations, galloping of the traction motor.

Для исследования динамической нагруженности подвешивания тягового электродвигателя необходимо формирование математической модели колебаний локомотива 2ЭС6 «Синара», экипаж которого является симметричным в продольной вертикальной и горизонтальной плоскостях, что позволяет рассмотреть эти колебания независимо друг от друга, считая их несвязанными [1 – 3]. В работе [4] на основе расчетной схемы, представленной на рисунке 1, нами была получена модель вертикальных колебаний локомотива 2ЭС6 «Синара», которая представляет собой матричное уравнение:

$$\{M\} \ddot{\bar{q}} + \{B\} \dot{\bar{q}} + \{C\} \bar{q} = \{M'\} \ddot{\bar{\eta}} + \{B'\} \dot{\bar{\eta}} + \{C'\} \bar{\eta}, \quad (1)$$

где $\{M\}, \{B\}, \{C\}$ – матрицы инерционных, диссипативных и жесткостных коэффициентов железнодорожного экипажа соответственно; $\{M'\}, \{B'\}, \{C'\}$ – матрицы, характеризующие инерционные, диссипативные и жесткостные параметры железнодорожного пути (обычно они являются диагональными, но отличны от нуля только элементы в конце и их число равно числу колесных пар в экипаже); $\bar{q}$ – вектор обобщенных координат, выбранных для описания динамического поведения экипажа; $\bar{\eta}$ – вектор возмущения.

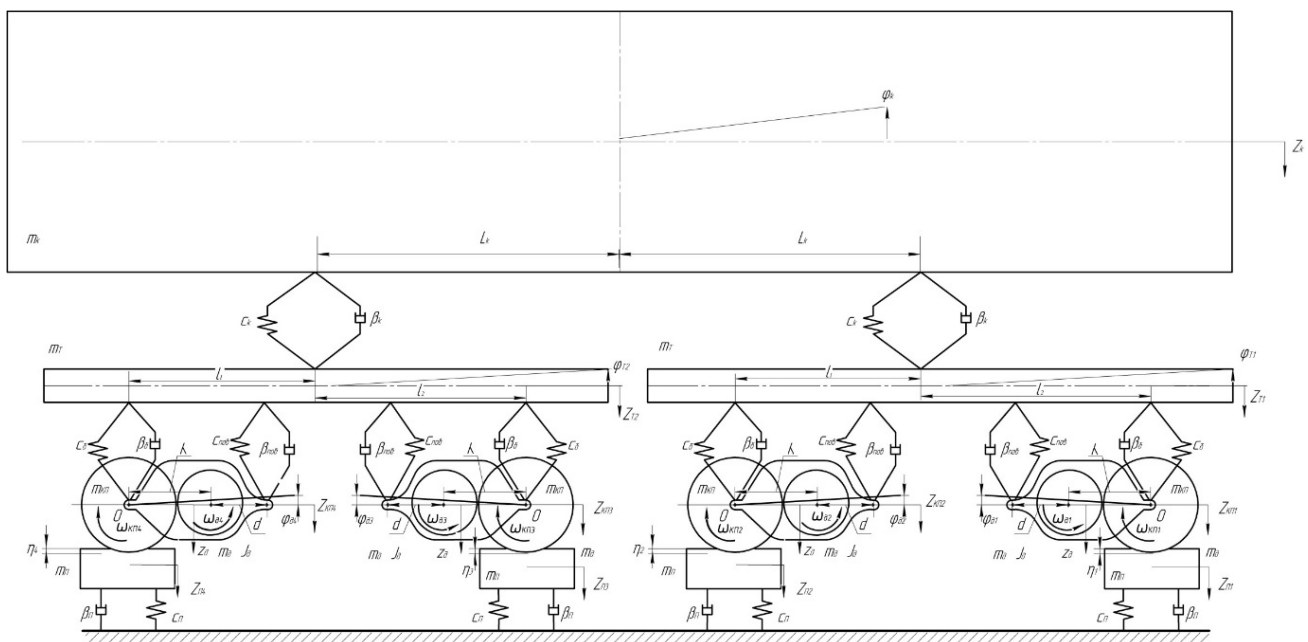


Рисунок 1 – Расчетная схема электровоза 2ЭС6

В расчетной схеме на рисунке 1 приняты следующие обозначения: z_k – обобщенная координата подпрыгивания кузова; φ_k – угловое перемещение кузова; z_{Ti} – обобщенные координаты подпрыгивания тележек; φ_{Ti} – угловые перемещения тележек; $z_{k,пi}$ – обобщенные координаты подпрыгивания колесных пар; z_{di} – обобщенные координаты подпрыгивания тягового двигателя; z_{pi} – перемещения приведенных масс пути; φ_{di} – углы поворота тяговых двигателей относительно оси колесной пары; J_k – момент инерции кузова; J_{Ti} – моменты инерции тележек; J_{di} – моменты инерции тяговых двигателей; m_k – масса кузова; m_T – масса обрессоренных частей тележки; $m_{к.п}$ – масса колесной пары; m_d – масса тягового двигателя; m_p – приведенная масса пути; c_k – жесткость центральной ступени подвешивания; $c_б$ – жесткость буксовой ступени подвешивания; $c_{пов}$ – жесткость поводка; c_p – приведенная жесткость пути; β_k – коэффициент вязкого трения центральной ступени подвешивания; $\beta_б$ – коэффициент вязкого трения буксовой ступени подвешивания; $\beta_{пов}$ – коэффициент вязкого трения в резинометаллических элементах поводка; β_p – приведенный коэффициент вязкого трения пути; η – случайная функция неровности рельса под колесной парой; ω_α – угловая скорость вращения якоря.

Матричное уравнение (1) может быть представлено системой дифференциальных уравнений, в которой шесть уравнений определяют колебания подпрыгивания и галопирования кузова и тележек, четыре – галопирование колесно-моторных блоков, четыре – подпрыгивание колесных пар вместе с приведенной массой пути. Полученная математическая модель позволяет определить уровень динамической нагруженности узлов механической части электровоза 2ЭС6 «Синара».

Так как целью нашего исследования является анализ динамических процессов, происходящих в экипаже, то целесообразно составить более подробную модель экипажа и с целью упрощения расчета в рамках инженерной погрешности ограничиться применением одномассовой дискретной модели пути [5].

В монографии [6] при выборе спектральной плотности случайных возмущений для проведения теоретических исследований колебаний подвижного состава рекомендуются при выборе спектральной плотности неровности пути руководствоваться следующими условиями:

1) спектральная плотность не должна иметь особенностей в начале координат, т. е. при нулевой частоте она не должна обращаться в бесконечность, и при стремлении частоты к бесконечности быть ограниченной. Таким образом, несобственный интеграл от спектральной плотности должен сходиться, так как сигналов с бесконечной мощностью не существует;

2) спектральная плотность должна позволять определять динамическую добавку давления колесной пары на рельс при частотах от 10 до 100 Гц.

Спектральной плотностью, наиболее в полной мере отвечающей данным условиям, является аппроксимация случайных возмущений, предложенная профессором А. И. Беляевым [7], которая использована нами при проведении исследований вертикальных колебаний локомотивов нового поколения.

На основе теоремы академика А. Н. Тихонова о разделении движения системы на «быстрые» и «медленные» составляющие для упрощения матричного уравнения (1) введем симметричные координаты [5, 8, 9]:

$$\begin{cases} \tilde{z}_T = z_{T1} + z_{T2}; \dot{\tilde{z}}_T = \dot{z}_{T1} + \dot{z}_{T2}; \\ \tilde{z}_d = \sum_{j=1}^k z_{dj}; \dot{\tilde{z}}_d = \sum_{j=1}^k \dot{z}_{dj}; \\ \tilde{z}_{к.п} = \sum_{j=1}^k z_{к.пj}; \dot{\tilde{z}}_{к.п} = \sum_{j=1}^k \dot{z}_{к.пj}. \end{cases} \quad (2)$$

Подставив симметричные координаты (2) в выражение (1), получим систему уравнений:

$$\begin{cases} m_k \cdot \ddot{z}_k + \beta_k (\dot{z}_k - \dot{z}_t) + c_k (z_k - z_t) = 0; \\ m_t \cdot \ddot{z}_t + \beta_k (\dot{z}_t - \dot{z}_k) + \beta_6 (\dot{z}_t - \dot{z}_{к.п}) + \beta_{пов} (\dot{z}_t + \dot{\phi}_d (l+d) - \dot{z}_{к.п}) + \\ + c_k (z_t - z_k) + c_6 (z_t - z_{к.п}) + c_{пов} (z_t + \phi_d (l+d) - z_{к.п}) = 0; \\ \left[m_d l^2 + J_d + J_{я} ((i_{пр} + 1) / i_{пр})^2 \right] \cdot \ddot{\phi}_d - m_d l \cdot \ddot{z}_{кп} + \beta_{пов} [(l+d)^2 \dot{\phi}_d + (l+d) \dot{z}_t - (l+d) \dot{z}_{к.п}] + \\ + c_{пов} [(l+d)^2 \phi_d + (l+d) z_t - (l+d) z_{к.п}] = 0; \\ (m_{к.п} + m_d + m_{п}) \ddot{z}_{к.п} - m_d \cdot l \cdot \ddot{\phi}_d + \beta_6 (\dot{z}_{к.п} - \dot{z}_t) + \beta_{пов} (\dot{z}_{кп} - \dot{z}_t - (l+d) \dot{\phi}_d) + \beta_{п} \dot{z}_{к.п} + \\ + c_6 (z_{к.п} - z_t) + c_{пов} (z_{к.п} - z_t - (l+d) \phi_d) + c_{п} z_{к.п} = m_{п} \cdot \ddot{\eta} + \beta_{п} \dot{\eta} + c_{п} \eta. \end{cases} \quad (3)$$

В полученной системе (3) первое уравнение описывает колебания подпрыгивания кузова, второе – подпрыгивания тележки, следующие два – галопирование тягового двигателя и подпрыгивание колесной пары соответственно. Для определения передаточных функций необходимо провести преобразование системы по Лапласу:

$$\begin{cases} (m_k \cdot s^2 + \beta_k \cdot s + c_k) \cdot Z_k(s) - (\beta_k s + c_k) \cdot Z_t(s) = 0; \\ -(\beta_k s + c_k) \cdot Z_k(s) + (m_t s^2 + \beta_k s + \beta_6 s + \beta_{пов} \cdot s + c_k + c_6 + c_{пов}) \cdot Z_t(s) + \\ + (\beta_{пов} (l+d) \cdot s + c_{пов} (l+d)) \cdot \phi_d(s) - (\beta_6 s + \beta_{пов} \cdot s + c_6 + c_{пов}) \cdot Z_{к.п}(s) = 0; \\ (\beta_{пов} (l+d) \cdot s + c_{пов} (l+d)) \cdot Z_t(s) + \left[m_d l^2 + J_d + J_{я} ((i_{пр} + 1) / i_{пр})^2 \right] \cdot s^2 + \beta_{пов} (l+d)^2 s + \\ + c_{пов} (l+d)^2 \cdot \phi_d(s) - (m_d \cdot l \cdot s^2 + \beta_{пов} (l+d) \cdot s + c_{пов} (l+d)) \cdot Z_{к.п}(s) = 0; \\ -(\beta_6 s + \beta_{пов} s + c_6 + c_{пов}) \cdot Z_t(s) - (m_d \cdot l \cdot s^2 + \beta_{пов} (l+d) \cdot s + c_{пов} (l+d)) \cdot \phi_d(s) + \\ + ((m_{к.п} + m_d + m_{п}) \cdot s^2 + \beta_6 s + \beta_{пов} \cdot s + \beta_{п} s + c_6 + c_{пов} + c_{п}) \cdot Z_{к.п}(s) = (m_{п} s^2 + \beta_{п} s + c_{п}) \cdot H(s). \end{cases} \quad (4)$$

Данная система дифференциальных уравнений (4) значительно проще исходной модели (1), кроме того, она обладает характеристическими уравнениями с простыми корнями, следовательно, собственные частоты колебаний подпрыгивания кузова, тележки и колесной пары и галопирования ТЭД будут определены с минимальной погрешностью. Еще одно замечание касается сходства дифференциальных уравнений условных одноосных «обобщенных» экипажей с двумя ступенями подвешивания и выделенной подсистемы, если не заострять внимание на обозначениях. Следовательно, можно считать такую систему «обобщенного» экипажа обоснованной.

Произведем преобразование системы (4) в матричную форму, которая является более наглядной, и получим следующие матрицы:

1) основная матрица системы, состоящая из коэффициентов при обобщенных координатах:

$$\vec{A}(s) = \begin{pmatrix} m_k \cdot s^2 + \beta_k \cdot s + c_k & -(\beta_k s + c_k) & 0 & 0 \\ -(\beta_k s + c_k) & m_t s^2 + \beta_k s + \beta_6 s + \beta_{пов} \cdot s + c_k + c_6 + c_{пов} & \beta_{пов} (l+d) \cdot s + c_{пов} (l+d) & -(\beta_6 s + \beta_{пов} \cdot s + c_6 + c_{пов}) \\ 0 & \beta_{пов} (l+d) \cdot s + c_{пов} (l+d) & \left[m_d l^2 + J_d + J_{я} ((i_{пр} + 1) / i_{пр})^2 \right] \cdot s^2 + \beta_{пов} (l+d)^2 s + c_{пов} (l+d)^2 & -\left(m_d \cdot l \cdot s^2 + \beta_{пов} (l+d) \cdot s + c_{пов} (l+d) \right) \\ 0 & -(\beta_6 s + \beta_{пов} \cdot s + c_6 + c_{пов}) & -\left(m_d \cdot l \cdot s^2 + \beta_{пов} (l+d) \cdot s + c_{пов} (l+d) \right) & ((m_{к.п} + m_d + m_{п}) \cdot s^2 + \beta_6 s + \beta_{пов} \cdot s + \beta_{п} s + c_6 + c_{пов} + c_{п}) \end{pmatrix}; \quad (5)$$

2) матрица-вектор неизвестных обобщенных координат:

$$\vec{Z}(s) = \begin{pmatrix} Z_{\kappa}(s) \\ Z_{\tau}(s) \\ \varphi_o(s) \\ Z_{\kappa\pi}(s) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Умножим матрицу $\vec{A}(s)$ на вектор $\vec{Z}(s)$. Систему можно представить в виде:

$$\vec{A}(s) \cdot \vec{Z}(s) = \vec{B}(s), \quad (7)$$

где $\vec{B}(s) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ (m_n \cdot s^2 + \beta_n \cdot s + c_n)H(s) \end{pmatrix}$ – матрица-вектор, состоящая из элементов, находящихся в правой части системы.

Введем в рассмотрение вектор передаточных функций обобщенных координат:

$$\vec{W}(s) = \frac{\vec{Z}(s)}{\vec{H}(s)} = \begin{pmatrix} \vec{W}_{Z_{\kappa}}(s) \\ \vec{W}_{Z_{\tau}}(s) \\ \vec{W}_{\varphi_o}(s) \\ \vec{W}_{Z_{\kappa\pi}}(s) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Система (4) линейная и допускает аналитическое решение, которое получается по формулам Крамера. Передаточная функция определяется соотношением выходного и входного сигналов, преобразованных по Лапласу при нулевых начальных условиях. Ниже представлены графики амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) для кузова, тележки, галопирования ТЭД и подпрыгивания колесной пары (рисунки 2 – 5).

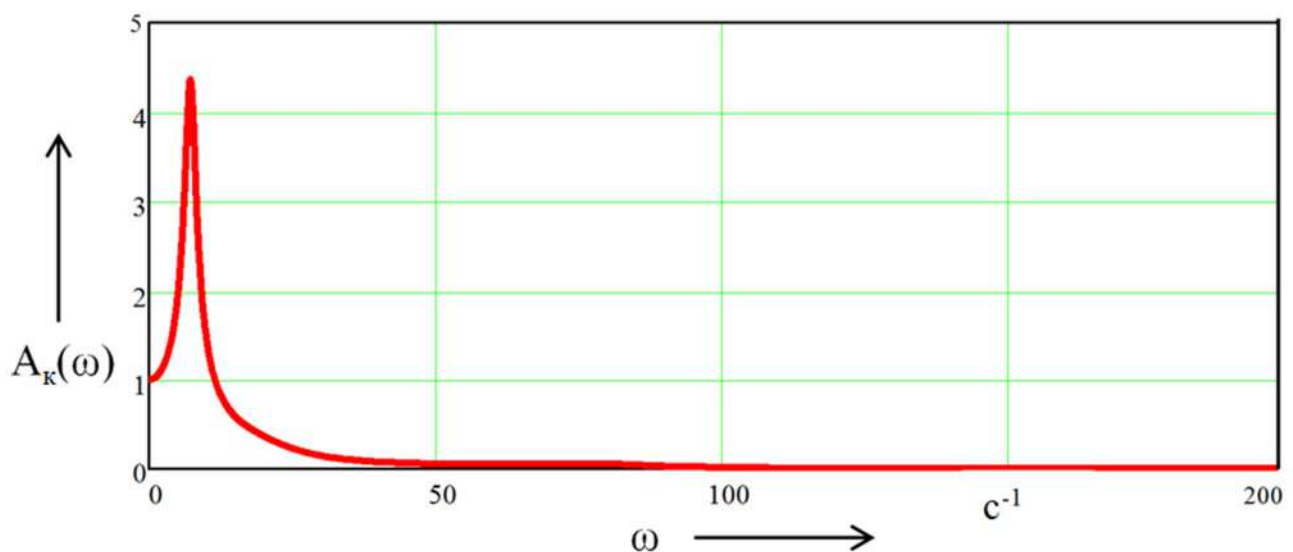


Рисунок 2 – АЧХ колебаний кузова

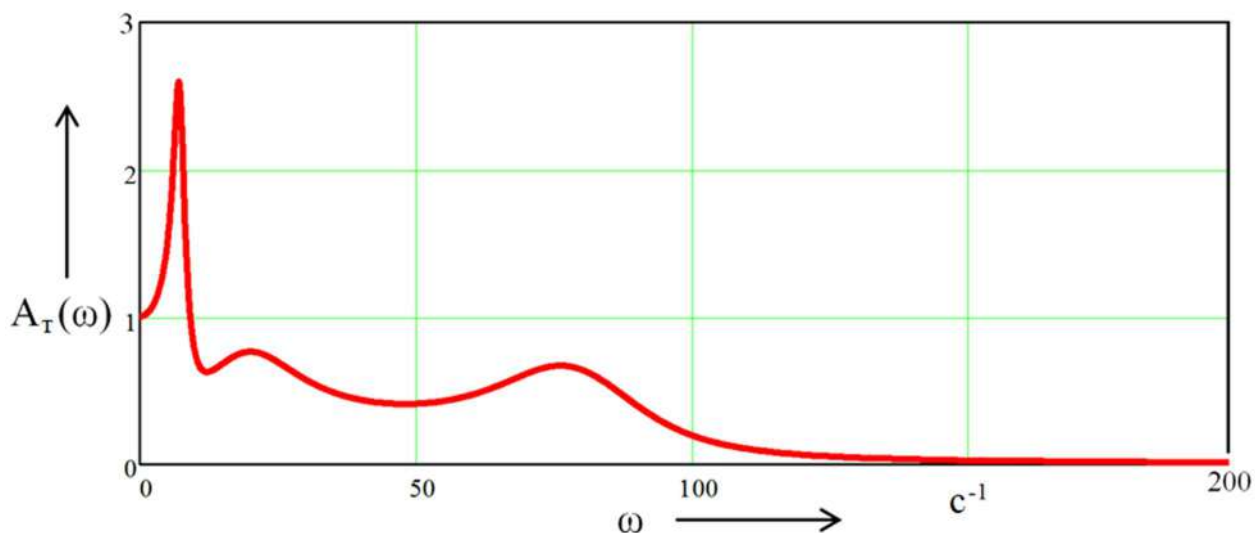


Рисунок 3 – АЧХ вертикальных колебаний тележки

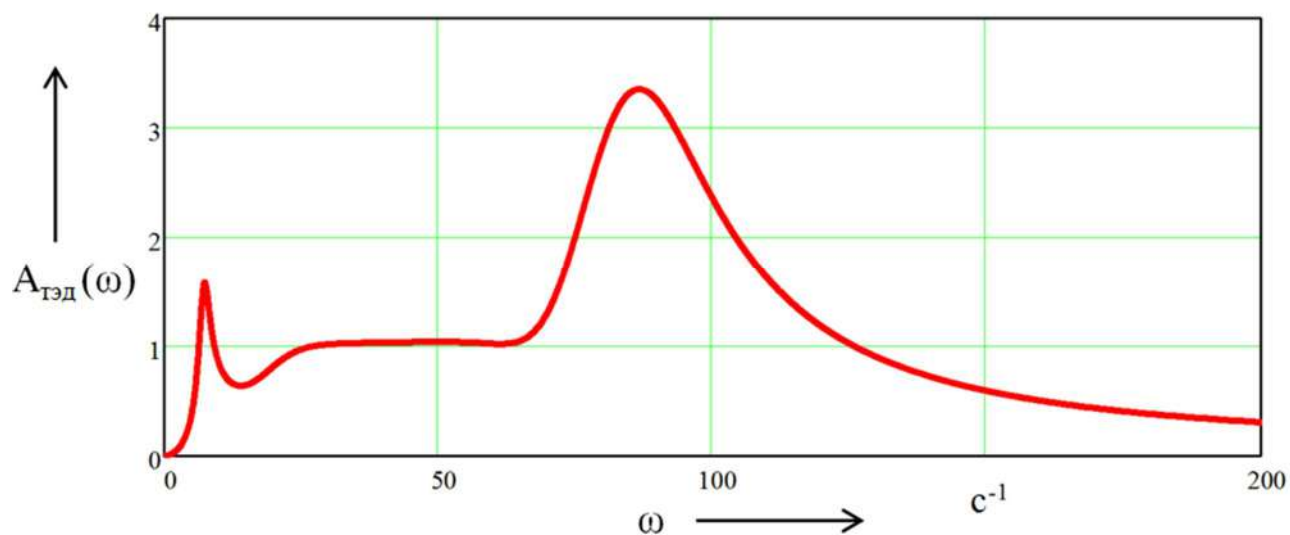


Рисунок 4 – АЧХ галопирования тягового электродвигателя

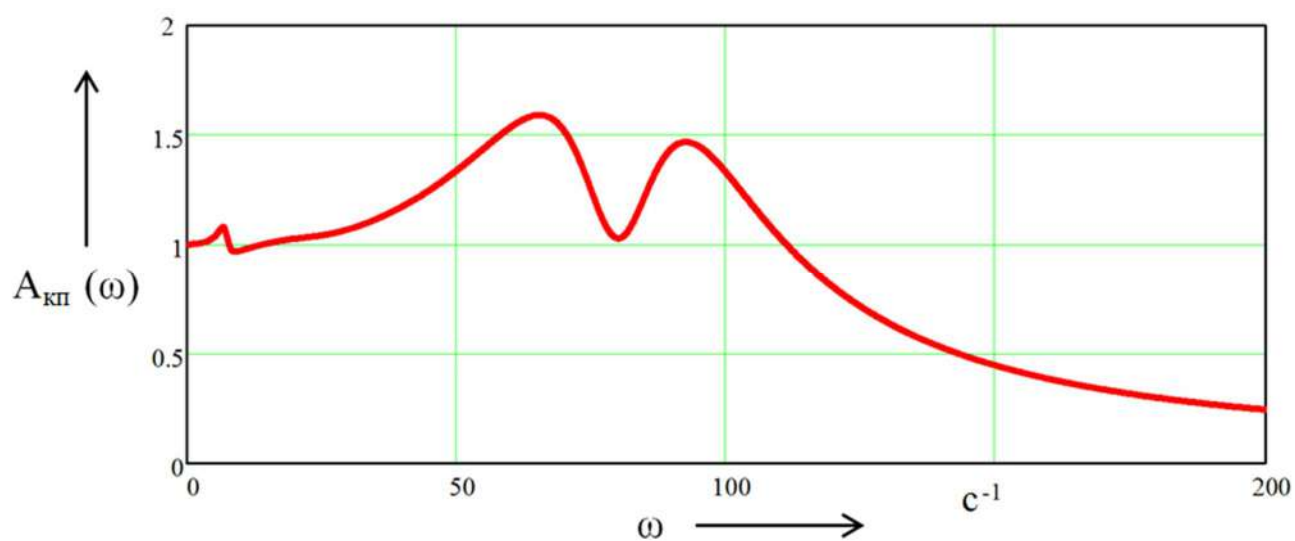


Рисунок 5 – АЧХ подпрыгивания колесной пары

Для статистических исследований случайных колебаний локомотива важное значение имеет АЧХ, которая является модулем частотной передаточной функции. АЧХ зависит от инерционных и упругодиссипативных параметров железнодорожного экипажа. На графиках АЧХ видны резонансные максимумы: для вертикальных перемещений кузова – 10 с^{-1} ; тележки – 20 с^{-1} ; галопирования ТЭД – 85 с^{-1} и подпрыгивания колесной пары – 65 с^{-1} . Следует отметить, что происходит взаимное влияние колебаний узлов локомотива, например, резонансный пик кузова при частоте 10 с^{-1} отчетливо можно разглядеть на всех остальных АЧХ, аналогично на АЧХ перемещений тележки имеются пики от резонансной частоты колесной пары – 65 с^{-1} .

После определения АЧХ перемещений узлов локомотива, используя спектральную плотность неровности пути, предложенную профессором А. И. Беляевым, вычислим спектральную плотность вертикальных ускорений узлов, их среднеквадратические отклонения и максимальные отклонения, графики которых представлены на рисунке 6.

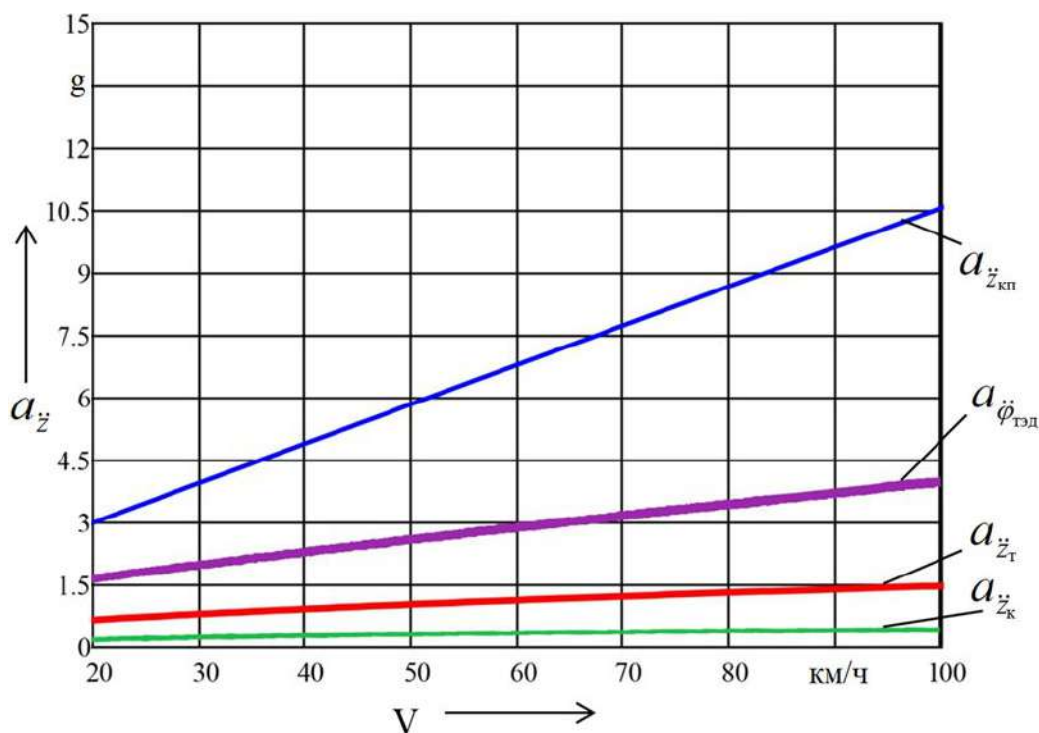


Рисунок 6 – Максимальные ускорения узлов локомотива

В дальнейших исследованиях предполагается внести конструктивные изменения в систему «тележка – поводок – тяговый электродвигатель» с целью снижения динамической нагруженности данной подсистемы и, как следствие, уменьшения числа выходов из строя узлов механической части.

Список литературы

1. Галиев, И. И. Методы и средства виброзащиты железнодорожных экипажей / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2010. – 340 с. – Текст : непосредственный.
2. Бирюков, И. В. Механическая часть тягового подвижного состава / под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с. – Текст : непосредственный.

3. Ушкалов, В. Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько. – Киев : Наукова думка, 1982. – 360 с. – Текст : непосредственный.
4. Галиев, И. И. Формирование математической модели вертикальных колебаний электровозов 2ЭС6 с учетом динамики колесно-моторных блоков / И. И. Галиев, М. Х. Минжасаров, Д. В. Липунов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 96–108.
5. Основы механики подвижного состава : учебное пособие / И. И. Галиев, В. А. Нехаев [и др.]. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – Часть 1. – 202 с. – Текст : непосредственный.
6. Галиев, И. И. Научные направления школы М. П. Пахомова за 50 лет (1961 – 2011) / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – 175 с. – Текст : непосредственный.
7. Беляев, А. И. Вероятностные характеристики стохастических колебаний колесной пары тепловоза 2ТЭ10Л / А. И. Беляев, В. К. Белов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 1971. – № 1. – С. 36–40.
8. Основы механики подвижного состава: учебное пособие / И. И. Галиев, В. А. Нехаев [и др.]. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – Часть 2. – 165 с. – Текст: непосредственный.
9. Минжасаров, М. Х. Повышение динамических качеств локомотива совершенствованием буксовой ступени рессорного подвешивания : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Минжасаров Марат Хайргельдаевич; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – 166 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Galiev I.I., Nekhaev V.A., Nikolaev V.A. *Metodi i sredstva vibrozachity geleznodorozhnykh ekipazh* [Methods and means of vibration protection of railway crews]. Moscow: Educational and Methodological Center for Education in railway transport Publ., 2010, 340 p. (In Russian).
2. Biryukov I.V. ed. *Mekhanicheskaya chast tyagovogo podvizhnogo sostava* [Mechanical part of traction rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1992, 440 p. (In Russian).
3. Ushkalov V.F., Reznikov L.M., Redko S.F. *Statisticheskaya dinamika relsovykh ekipazhei* [Statistical dynamics of rail carriages]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1982, 360 p. (In Russian).
4. Galiev I.I., Minzhasarov M.Kh., Lipunov D.V. Formation of a mathematical model of electric locomotives 2ES6 vertical oscillations taking into account the dynamics wheel-motor units. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 4 (48), pp. 96-108 (In Russian).
5. Galiev I.I., Nekhaev V.A. and others. *Osnovi mekhaniki podvignogo sostava: Uchebnik. Chast' 1*. [Fundamentals of rolling stock mechanics: Textbook. Part 1]. Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2013, 202 p. (In Russian).
6. Galiev I.I., Nekhaev V.A., Nikolaev V.A. *Nauchnie napravleniya shkoly M. P. Pakhomova za 50 let (1961 – 2011)* [Scientific directions of the school M. P. Pakhomov for 50 years (1961 – 2011)]. Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2012, 175 p. (In Russian).
7. Belyaev A.I., Belov V.K. Probabilistic characteristics of stochastic oscillations of a 2TE10L diesel locomotive wheelset. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*, 1971, no. 1, pp. 36-40 (In Russian).
8. Galiev I.I., Nekhaev V.A. and others. *Osnovi mekhaniki podvignogo sostava: Uchebnik. Chast' 2*. [Fundamentals of rolling stock mechanics: Textbook. Part 1]. Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2013, 165 p. (In Russian).

9. Minzhasarov M.Kh. *Povyshenie dinamicheskikh kachestv lokomotiva sovershenstvovaniem buksvoi stupeni ressortnogo podveshivaniya* (Improving the dynamic qualities of a locomotive by improving the axle box spring suspension). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2016, 166 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галиев Ильхам Исламович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, президент ОмГУПС, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика».

Тел.: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

Минжасаров Марат Хайргельдаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-55.

E-mail: mmx90@yandex.ru

Липунов Дмитрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7-908-319-03-68.

E-mail: dima-lipunov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Галиев, И. И. Оценка динамической нагруженности колесно-моторных блоков электровозов 2ЭС6 / И. И. Галиев, М. Х. Минжасаров, Д. В. Липунов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 71 – 79.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galiev Ilkham Islamovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, president of OSTU, professor of the department «Theoretical and applied mechanics».

Phone: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

Minzhasarov Marat Khajergeldajevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Theoretical and applied mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-55.

E-mail: mmx90@yandex.ru

Lipunov Dmitry Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Theoretical and applied mechanics», OSTU.

Phone: +7-908-319-03-68.

E-mail: dima-lipunov@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Galiev I.I., Minzhasarov M.Kh., Lipunov D.V. Evaluation of dynamic loading of wheel-motor units of electric locomotives 2ES6. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 3 (51), pp. 71-79 (In Russian).

М. А. Волчанина

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

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Аннотация. В статье представлены статистические исследования сигналов акустического контроля при диагностировании силовых трансформаторов системы электроснабжения железных дорог. Статистическая обработка данных акустического контроля производилась на примере трансформаторов с различным уровнем состояния изоляции. Приведены сравнения гистограмм экспериментального распределения амплитуд и доминантных частот сигналов с ближайшими теоретическими законами распределения, выполненными в программе STATISTICA по данным контроля, полученным из автоматизированной системы СЦАД-16 (система цифровой акустической диагностики).

Проведенные исследования показали тесную корреляцию дефектов, зарегистрированных акустическим методом, с распределением сигналов в виде законов распределения случайных величин. Показано, что для силовых трансформаторов с механическими колебаниями как при прохождении поезда, так и на холостом ходу распределение амплитуд и доминантных частот зарегистрированных сигналов соответствует равномерному закону. Распределение амплитуд и доминантных частот не является сосредоточенным вокруг определённого среднего значения. Для силовых трансформаторов, содержащих частичные разряды, причиной которых является ухудшение изоляционных свойств обмоток, находящихся под действием высокого напряжения, наилучшее приближение как амплитуд, так и доминантных частот показало логнормальное распределение. Сигналы являются сосредоточенными вокруг характерно выраженного среднего значения. При прохождении поезда акустическая система регистрирует как высокочастотные сигналы от частичных разрядов (ЧР), так и низкочастотные сигналы от колебаний корпуса. В законе распределения присутствуют две составляющие – равномерной и логнормальной плотностей распределения. Таким образом, по виду распределения зарегистрированных сигналов, их амплитуде и доминантной частоте можно определить наличие дефектного состояния изоляции силовых трансформаторов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90231.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, акустический метод, частичные разряды, диагностирование изоляции, статистические исследования, параметры сигналов.

Maria A. Volchanina

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

STATISTICAL INVESTIGATIONS OF ACOUSTIC CONTROL SIGNALS IN DIAGNOSTIC OF POWER TRANSFORMERS

Abstract. The article presents statistical studies of acoustic control signals when diagnosing power transformers of the railway power supply system. Statistical processing of acoustic monitoring data was carried out on the example of transformers with different levels of insulation condition. Comparisons of histograms of the experimental distribution of amplitudes and dominant frequencies of signals with the nearest theoretical distribution laws, performed in the STATISTICA program according to control data obtained from the automated system.

The conducted studies have shown a close correlation of defects registered by the acoustic method with the distribution of signals in the form of laws of distribution of random variables. It is shown that for power transformers with mechanical oscillations, both during the passage of the train and at idle, the distribution of amplitudes and dominant frequencies of the recorded signals corresponds to a uniform law. The distribution of amplitudes and dominant frequencies is not centered around a certain average value. For power transformers containing partial discharges, the cause of which is the deterioration of the insulating properties of the windings under the influence of high voltage, the best approximation, both amplitudes and dominant frequencies, showed the Lognormal distribution. The signals are centered around a characteristic mean value. When the train passes, the acoustic system registers both high-frequency signals from the PD and low-frequency signals from body vibrations. There are two components in the distribution law - uniform and lognormal distribution densities. Thus, by the type of distribution of the recorded signals, their amplitude and dominant frequency, it is possible to determine the presence of a defective state of the insulation of power transformers.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-38-90231.

Keywords: power transformers, acoustic method, partial discharges, insulation diagnostics, statistical studies, signal parameters.

При проведении диагностирования силовых трансформаторов инструментальными методами актуальным остается вопрос достоверной интерпретации регистрируемых сигналов. Кроме того, важным является определение различных дефектов по регистрируемым сигналам. В работе рассмотрены вопросы обработки сигналов акустического контроля силовых трансформаторов. Предложено идентифицировать законы распределения случайных величин, к которым можно отнести параметры регистрируемых сигналов.

Статистическая обработка данных акустического контроля выполнена на примере трансформаторов с различным состоянием изоляции. Исследования проводились на вводном трансформаторе ТМПУ мощностью 16 МВ·А на тяговой подстанции в нормальном техническом состоянии. Измерения, выполненные при помощи системы акустического контроля, показали отсутствие частичных разрядов в трансформаторе как при прохождении поезда, так и на холостом ходу. Дефектов изоляции, сопровождающихся возникновением частичных разрядов, на высоком напряжении не обнаружено [1].

Для проверки работоспособности установки СЦАД-16 производили возбуждение акустических волн при помощи стука металлическим бойком по корпусу трансформатора с разных сторон от места установки измерительных преобразователей. Четыре измерительных преобразователя (датчика) устанавливались на наружные стенки трансформатора, образуя собой акустическую антенну, как показано на рисунке 1. По разности времен прихода сигнала возможно определение координат источника частичных разрядов (ЧР).

Установка СЦАД-16 представляет собой измерительную плату, размещенную в корпусе персонального компьютера, или отдельный прибор, к которому подключаются четыре акустических датчика (с возможностью увеличения количества датчиков до 16). Длина соединительных кабелей датчиков составляет 10 м (максимальная длина – 100 м) [2].



Рисунок 1 – Расположение датчиков на корпусе трансформатора

На рисунках 2 – 5 показаны режимы работы программы «Суммарный счет», «Форма сигнала», «Гистограмма амплитуд сигналов» и «Гистограмма доминантных частот сигналов» при воздействии боека слева относительно установленных датчиков. Постукивание проводилось в течение 30 с, как это показано на рисунке 2, где по горизонтальной оси – время в секундах, по вертикальной оси – накопленное количество сигналов.

На рисунке 3 приведена характерная форма сигнала при постукивании. Частота сигнала невысокая, а размах амплитуды большой – от 244 до 1265 ед. аналого-цифрового преобразователя (АЦП) (от 45,6 до 59,9 дБ). При постукивании по центру стенки бака силового трансформатора должны выдавать сигнал все четыре датчика, однако в опыте сигнала с третьего и четвертого датчиков не наблюдалось (34 ед. АЦП) по причине плохого контакта с корпусом. На рисунке 4 представлена гистограмма распределения максимальных амплитуд всех 100 зарегистрированных событий. По горизонтальной оси представлены амплитуды сигналов в

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

децибелах, а по вертикальной – число амплитуд данного уровня. При этом общее число событий по столбцам равняется 100.

Постукивание слева от датчиков проводилось в течение 30 с, как это показано на рисунке 2. Стук производился с двумя паузами по 3 с, во время которых сигналы отсутствовали.

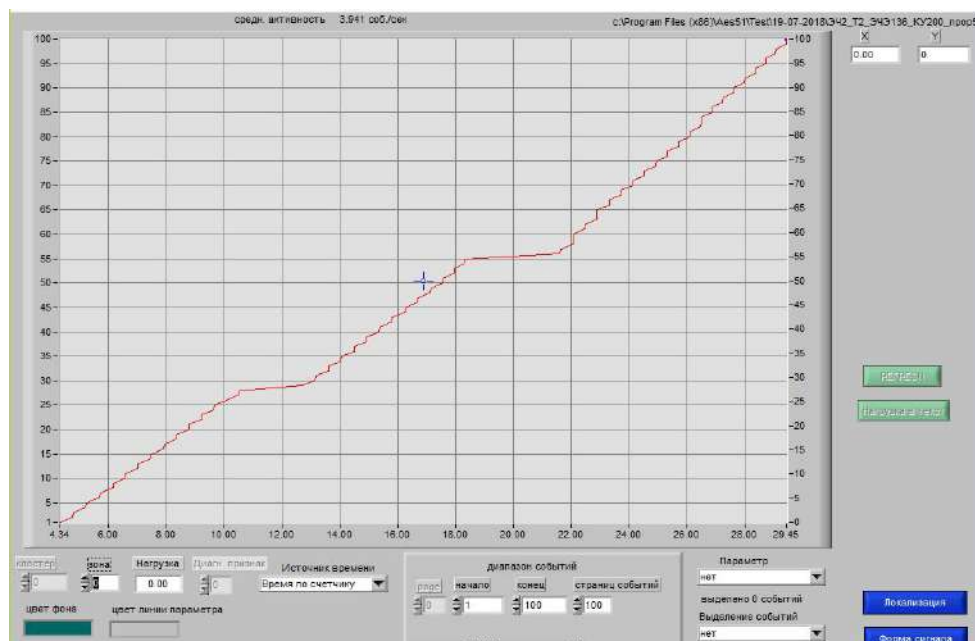


Рисунок 2 – Суммарный счет сигналов «Стук слева»

На рисунке 3 отмечается срабатывание первого и второго датчиков, до которых акустическая волна доходит раньше, при этом третий и четвертый датчики не выдают сигнала, поскольку время длительности записи сигнала после события меньше времени прихода до них звуковой волны.

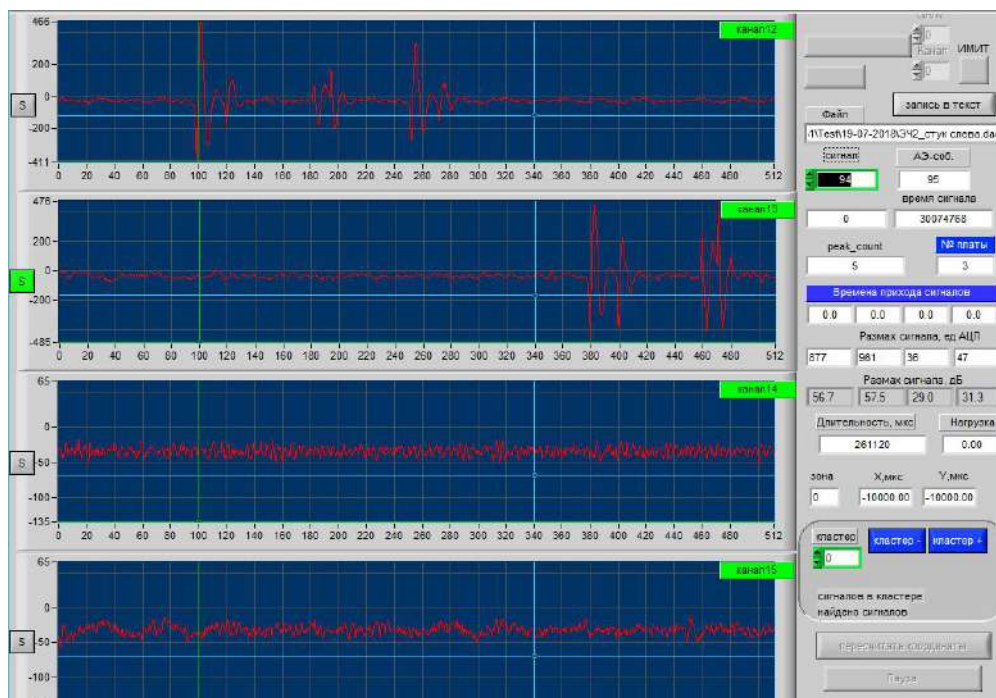


Рисунок 3 – Форма сигнала «Стук слева»

На рисунке 4 показана гистограмма амплитуд сигналов при стуке слева. Амплитуды сигналов изменяются от 26 до 64 дБ.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

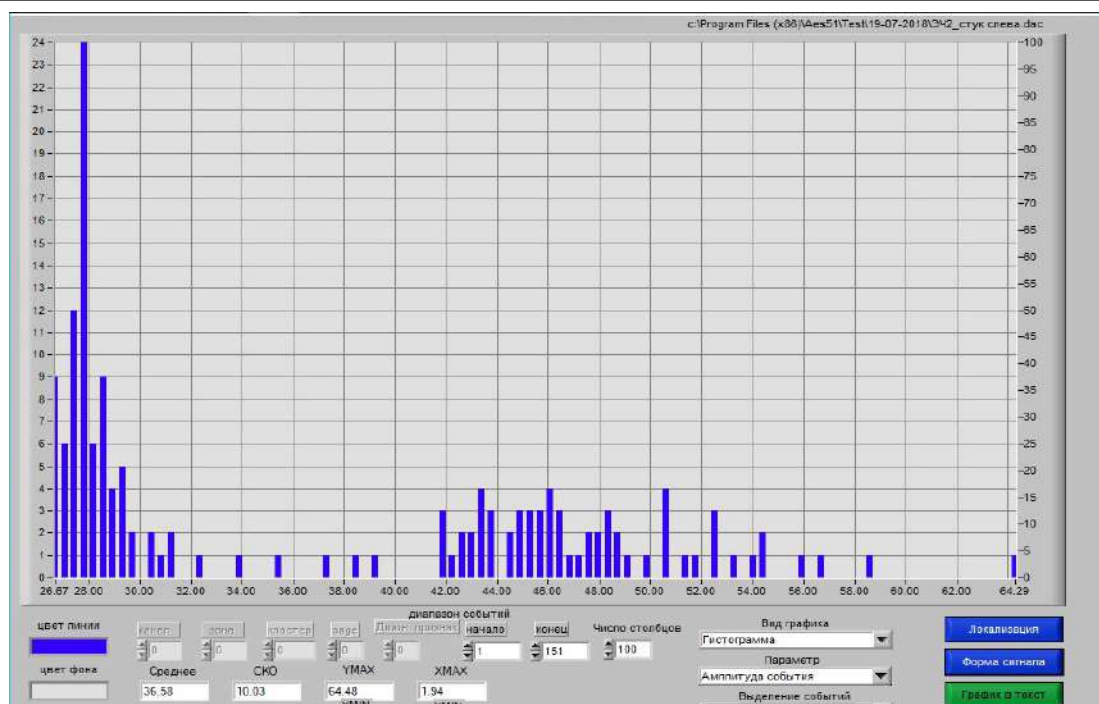


Рисунок 4 – Гистограмма амплитуд сигналов «Стук слева»

На рисунке 5 приведена гистограмма доминантных частот зарегистрированных сигналов. Из рисунка следует, что частоты зарегистрированных импульсов распределены относительно равномерно в низком диапазоне частот используемых преобразователей. Нет характерных частот соответствующих частичным разрядам.

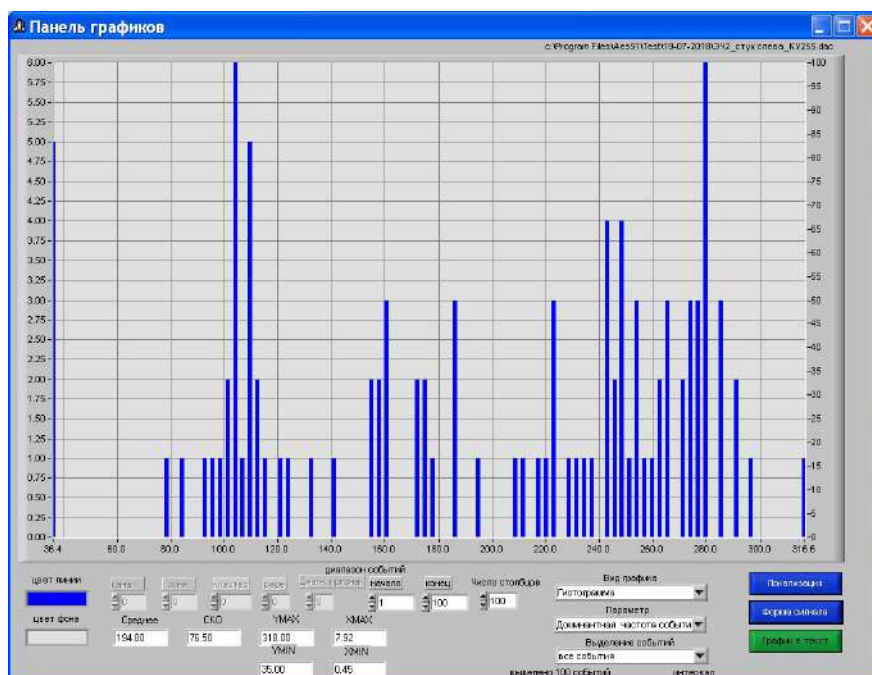


Рисунок 5 – Гистограмма доминантных частот сигналов «Стук слева»

Из данных, представленных на рисунках 2 – 5, следует, что по каждому событию возможен визуальный анализ, подтверждающий наличие именно механического воздействия (стука) и его параметров. Кроме того, по разности времени прихода сигналов к датчикам акустической антенны, установленным на корпусе трансформатора, возможно установление координат предполагаемого места расположения источника.

Для сигналов, не содержащих ЧР, амплитуды не являются сосредоточенными вокруг среднего значения, поэтому закон распределения таких сигналов близок к равномерному

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

(Хи квадрат равен 55,1), что подтверждается рисунком 6, выполненным в программе STATISTICA по данным контроля, полученным из автоматизированной системы СКАД-16 [3].

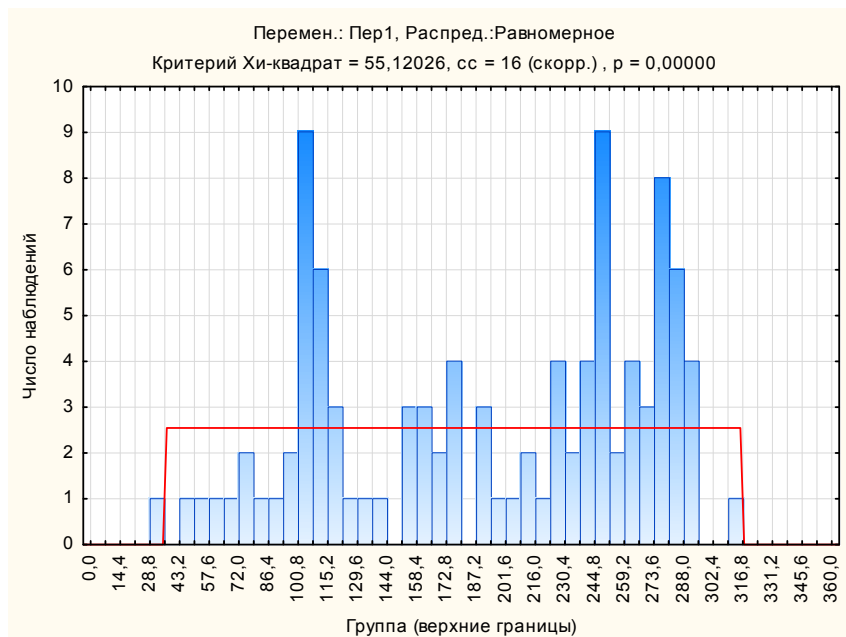


Рисунок 6 – Сравнение гистограммы доминантных частот с равномерным законом распределения при наличии механических колебаний

Акустический контроль на предмет наличия частичных разрядов выполнен на силовом трансформаторе тяговой подстанции типа ТДРУНГ мощностью 20 МВ·А, который постоянно находится в работе. На силовом трансформаторе выявлены частичные разряды, причиной которых является ухудшение изоляционных свойств обмоток, находящихся под действием высокого напряжения. Измерения выполнялись со станционной (северной), восточной, южной сторон при прохождении поезда и на холостом ходу. Всего выполнено 12 измерений со временем записи сигналов от 30 до 60 с.

Первое измерение выполнялось с восточной стороны трансформатора тяговой подстанции (ТП). За время измерения 60 с было зарегистрировано 2347 сигналов от частичных разрядов. По форме сигнала частичные разряды соответствуют сигналам, описываемым в публикациях других исследователей [4 – 7]. На рисунке 7 показаны временные сигналы с четырех датчиков.



Рисунок 7 – Форма сигнала «Измерение 1» при наличии ЧР

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Получена гистограмма амплитуд зарегистрированных сигналов трансформатора в рабочем состоянии. В отличие от режима отсутствия электрических разрядов наблюдается группирование сигналов в диапазоне от 41 до 44 ед. АЦП. При помощи программы STATISTICA выполнено сравнение гистограмм экспериментального распределения амплитуд сигналов с ближайшим теоретическим законом распределения. Наилучшее приближение показало логнормальное распределение с критерием Хи-квадрат, равным 18,23 (рисунок 8).

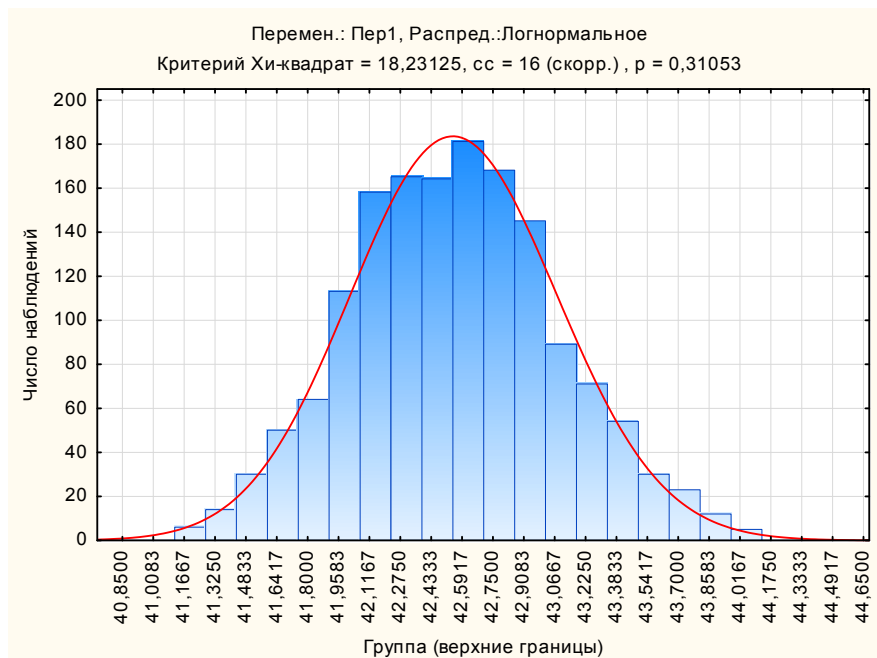


Рисунок 8 – Сравнение гистограммы амплитуд с логнормальным законом распределения при наличии ЧР

Получена также гистограмма доминантных частот сигналов при наличии ЧР. В программе STATISTICA выполнено сравнение гистограмм экспериментального распределения частот сигналов с ближайшим теоретическим законом распределения. Закон распределения для доминантных частот также соответствует логнормальному теоретическому закону (рисунок 9). Параметр Хи-квадрат принимает достаточно большое значение 1744, что объясняется большой выборкой данных – 2345.

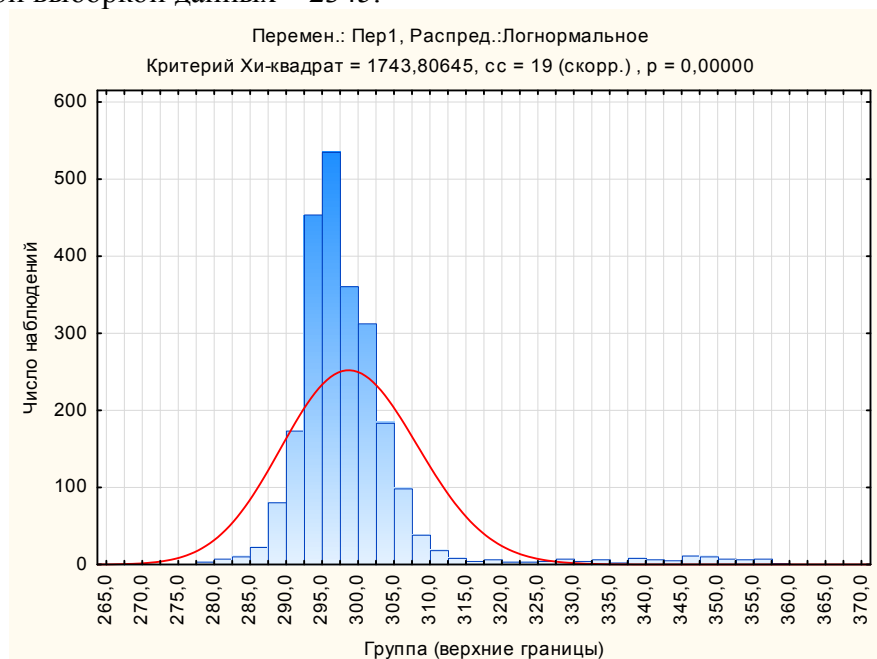


Рисунок 9 – Сравнение гистограммы частот с логнормальным законом распределения при наличии ЧР

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

При прохождении поезда число ЧР в единицу времени начинает уменьшаться, что можно объяснить присутствием колебаний, передающихся на корпус трансформатора, и воздействием их на источник ЧР. Во время измерения № 8 были зарегистрированы одновременно частичные разряды и колебания от воздействия проходящего поезда (рисунок 10) [8].

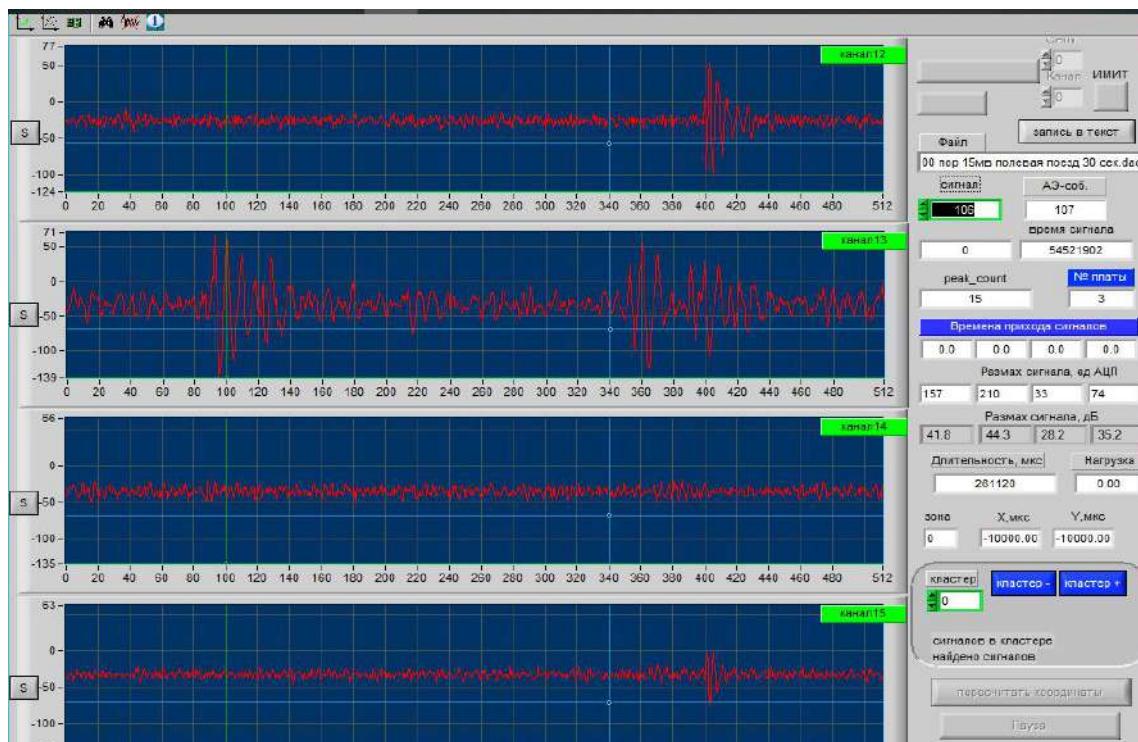


Рисунок 10 – Форма сигнала «Измерение № 8» ЧР и колебания от поезда

Выполнено сравнение гистограммы амплитуд сигнала, содержащего высокочастотные ЧР и низкочастотные колебания от проходящего поезда, с теоретическими законами распределения. Лучшее приближение показало логнормальное распределение с коэффициентом Хи-квадрат, равным 536 ед. (рисунок 11).



Рисунок 11 – Сравнение экспериментальных данных с логнормальным распределением ЧР и колебания от поезда

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Гистограмма сравнивалась с равномерным законом распределения и с логнормальным законом распределения (параметр Хи-квадрат принимает значения 536 и 652 соответственно). Однако в таком распределении присутствуют два вида распределений, близкие к логнормальному и равномерному (рисунок 12), первое из которых характеризует наличие ЧР, а второе – низкочастотные колебания корпуса трансформатора при прохождении поезда [9, 10].

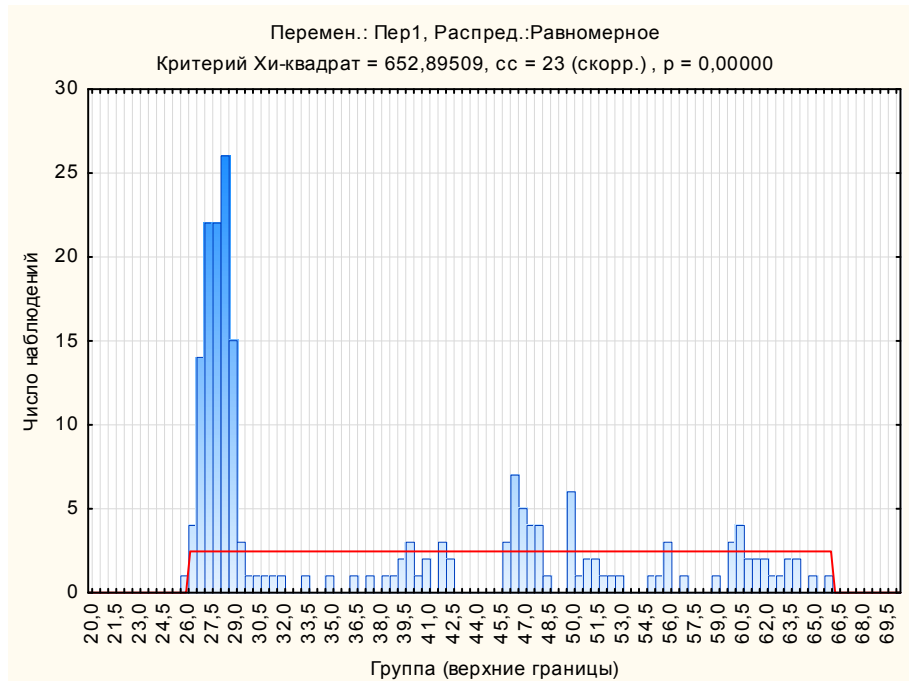


Рисунок 12 – Сравнение экспериментальных данных с равномерным распределением ЧР и колебания от поезда

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Установка регистрации акустических сигналов СЦАД-16 с штатным программным обеспечением позволяет регистрировать частичные разряды, колебания корпуса трансформатора и определять количественные характеристики ЧР и колебаний.

2. Для силовых трансформаторов с механическими колебаниями как при прохождении поезда, так и на холостом ходу распределение амплитуд и доминантных частот зарегистрированных сигналов соответствует равномерному закону. Распределение амплитуд и доминантных частот не является сосредоточенным вокруг определенного среднего значения.

3. На силовых трансформаторах, содержащих частичные разряды, причиной которых является ухудшение изоляционных свойств обмоток, находящихся под действием высокого напряжения, наилучшее приближение как амплитуд, так и доминантных частот показало логнормальное распределение. Сигналы сосредоточены вокруг характерно выраженного среднего значения.

4. При прохождении поезда акустическая система регистрирует как высокочастотные сигналы от ЧР, так и низкочастотные сигналы от колебаний корпуса. В законе распределения присутствует две составляющие – равномерной и логнормальной плотностей распределения.

Таким образом, дополнительным параметром при диагностировании силовых трансформаторов является закон распределения зарегистрированных сигналов. По закону распределения можно определить наличие частичных разрядов, наличие частичных разрядов и колебания при прохождении поезда, отсутствие частичных разрядов при наличии механических колебаний корпуса трансформатора. Эти признаки в виде дополнительных параметров могут использоваться в автоматизированных системах диагностирования для повышения достоверности диагноза текущего состояния силового трансформатора.

Дальнейшим развитием предложенного метода является проверка зарегистрированных сигналов на промахи для формирования однородных выборок, что повысит достоверность и воспроизведение результатов статистического анализа данных.

Список литературы

1. Кузнецова, М. А. Повышение эффективности методов диагностирования тяговых трансформаторов в условиях тяжеловесного движения / М. А. Кузнецова. – Текст : непосредственный // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – 2018. – С. 123–129.
2. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2011. – 272 с. – Текст : непосредственный.
3. Боровиков, В. А. Программа STATISTICA для студентов и инженеров / В. А. Боровиков. – Москва : КомпьютерПресс, 2001. – 198 с. – Текст : непосредственный.
4. Классификация акустических сигналов разрядных процессов в изоляции на основе формы их вейвлет-спектров / А. И. Чуличков, Н. Д. Цыбульская, С. К. Цветаев, О. С. Сурконт. – Текст : непосредственный // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 2009. – С. 103–105.
5. Markalous S. M., Tenbohlen S., Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, vol. 6, no. 15, pp. 1576 – 1583.
6. Шахнин, В. А. Статистические характеристики частичных разрядов как диагностические признаки состояния изоляции высоковольтного оборудования / В. А. Шахнин, Ю. С. Чебрякова, Я. В. Мироненко. – Текст : непосредственный // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 2. – С. 59–65.
7. Максудов, Д. В. Методы селекции сигналов частичных разрядов / Д. В. Максудов, Е. М. Федосов. – Текст : непосредственный // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2009. – Т. 12. – № 2. – С. 138–143.
8. Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локализации частичных разрядов / А. С. Карандаев, С. А. Евдокимов [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ им. Носова. – 2012. – № 1. – С. 105–108.
9. Кузнецов, А. А. Повышение эффективности методов диагностирования тяговых трансформаторов при увеличении массы поездов / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, М. А. Кузнецова. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – С. 20–27.
10. Соловьянова, И. П. Теория волновых процессов. Акустические волны / И. П. Соловьянова, С. Н. Шабунин. – Екатеринбург : Уральский государственный технический университет, 2004. – 142 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Kuznetsova M. A. Improving the efficiency of methods for diagnosing traction transformers in conditions of heavy traffic [Povyshenie effektivnosti metodov diagnostirovaniya tyagovykh transformatorov v usloviyakh tyazhelovesnogo dvizheniya]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: materialy IV vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* (Materials of the IV All-Russian scientific and technical conference with international participation). – Omsk, 2018, pp. 123 – 129.
2. Ser'eznov A. N. Akustiko-emissionnyj kontrol' zheleznodorozhnykh konstrukcij (Acoustic emission control of railway structures). Novosibirsk: Nauka Publ., 2011, 272 p.
3. Borovikov, V. A. Programma STATISTICA dlya studentov i inzhenerov (STATISTICA program for students and engineers). Moscow: Computer Press Publ., 2001, 198 p.
4. CHulichkov A. I., Cybul'skaya N. D., Cvetaev S. K., Surkont O. S. Classification of acoustic signals of discharge processes in insulation based on the shape of their wavelet spectra [Klassifikatsiya

akusticheskikh signalov razryadnykh processov v izolyacii na osnove formy ih vejjvlet-spektrov]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3: Fizika. Astronomiya. – The journal of Moscow University. Series 3: Physics. Astronomy*, 2009, pp. 103-105.

5. Markalous S. M., Tenbohlen S., Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, no.15 (6), pp. 1576 – 1583.

6. SHahnin V. A., CHEbryakova YU. S., Mironenko YA. V. Statistical characteristics of partial discharges as diagnostic signs of the state of isolation of high-voltage equipment [Statisticheskie harakteristiki chastichnykh razryadov kak diagnosticheskie priznaki sostoyaniya izolyacii vysokovol'tnogo oborudovaniya]. *Kontrol'. Diagnostika – Control. Diagnostics*, 2015, no. 2, pp. 59 – 65.

7. Maksudov D. V., Fedosov E. M. Methods for selection of partial discharge signals [Metody selekcii signalov chastichnykh razryadov]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta – The journal of the Ufa State Aviation Technical University*, 2009, no.2 (12), pp. 138 – 143.

8. Karandaev A. S., Evdokimov S. A., Devyatov D. H., Parsunkin B. N., Sarlybaev A. A. Diagnosis of power transformers by acoustic location of partial discharges [Diagnostirovanie silovykh transformatorov metodom akusticheskoy lokacii chastichnykh razryadov]. *Vestnik MGTU im. Nosova – The journal of MSTU named after Nosov*, 2012, no.1, pp. 105 – 108.

9. Kuznetsov A. A., Kuzmenko A. Yu., Kuznetsova M. A. Improving the efficiency of methods for diagnosing traction transformers with an increase in the mass of trains [Povyshenie effektivnosti metodov diagnostirovaniya tyagovykh transformatorov pri uvelichenii massy poezdov]. *Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte : materialy nauchnoj konferencii* (Innovative projects and technologies in education, industry and transport: materials of the scientific conference). – Omsk, 2018, pp. 20 – 27.

10. Solov'yanova I. P., SHabunin S. N. *Teoriya volnovykh processov. Akusticheskie volny* (Theory of wave processes. Acoustic waves). Yekaterinburg: UGTU-UI Publ., 2004, 142 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Волчанина Мария Андреевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Телефон: 8-983-116-10-84.

E-mail: kuznetcova994@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Volchanina Maria Andreevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: 8-983-116-10-84.

E-mail: kuznetcova994@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Волчанина, М. А. Статистические исследования сигналов акустического контроля при диагностировании силовых трансформаторов / М. А. Волчанина. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 80 – 89.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Volchanina M.A. Statistical investigations of acoustic control signals in diagnostic of power transformers. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 3 (51), pp. 80-89 (In Russian).

В. Ф. Кузнецов, С. Г. Шантаренко, В. А. Болотюк, С. В. Савинкин

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ГЛУБИНЫ ВЗАИМНОГО ПРОНИКНОВЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ГОЛОВКИ РЕЛЬСА И ГРЕБНЯ БАНДАЖА КОЛЕСА ЛОКОМОТИВА В ОБЛАСТИ ИХ СИЛОВОГО КОНТАКТА

Аннотация. Вопросы, связанные с износом рельса и бандажа колеса локомотива, всегда вызывают повышенный интерес как у эксплуатационных служб, так и у научных работников. Знание влияния технических и эксплуатационных факторов на интенсивность износа материалов контактирующих тел позволило бы сэкономить материальные и финансовые ресурсы. Предлагаемая статья посвящена определению одного из этих параметров, а именно – глубины вдавливания материала головки рельса в материал гребня бандажа колеса. Силовое взаимодействие гребня бандажа и головки рельса происходит в основном на уровне неровностей в области контакта. Износ материала контактирующих тел будет определяться глубиной внедрения неровностей в области контакта и скоростью относительного скольжения. Важным параметром для оценки величины и характера износа служит глубина относительного проникновения контактирующих тел. При этом величина смятия одного из контактирующих тел равна глубине проникновения в него другого тела.

Выполнены расчеты главных радиусов кривизны поверхностей головки рельса и гребня бандажа в точке их контакта и определены размеры области контакта. В итоге получены выражения для расчета глубины взаимного проникновения материалов гребня бандажа и головки рельса. Материал головки рельса имеет более глубокое проникновение в материал гребня бандажа. Силовой контакт гребня бандажа и рельса происходит в основном в пределах пластической деформации их материалов.

Получены формулы для определения величины сближения контактирующих тел и наибольшего нормального напряжения в зоне контакта. Произведена оценка величин смятия материала головки рельса и гребня бандажа, что позволяет судить о процентном соотношении их износа.

При силовом контакте износ гребня бандажа колеса значительно выше износа головки рельса.

Ключевые слова: силовой контакт, геометрические и физические параметры в области контакта, радиусы кривизны, глубина проникновения, напряжения в зоне контакта, износ материала.

Victor F. Kuznetsov, Sergey G. Shantarenko, Vladimir A. Bolotyuk, Sergey V. Savinkin

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

DETERMINATION OF STRESSES AND THE DEPTH OF MUTUAL PENETRATION OF THE MATERIALS OF THE RAIL HEAD AND THE LOCOMOTIVE WHEEL TIRE FRESH IN THE AREA OF THEIR FORCE CONTACT

Abstract. Issues related to the wear of the rail and wheel tread of a locomotive are always of great interest to both operational services and scientists. Knowledge of the influence of technical and operational factors on the intensity of wear of the materials of the contacting bodies would save material and financial resources. The proposed article is devoted to determining one of these parameters, namely, the depth of indentation of the material of the rail head into the material of the wheel rim flange. The force interaction of the bandage crest and the rail head occurs mainly at the level of irregularities in the contact area. The wear of the material of the contacting bodies will be determined by the depth of penetration of irregularities in the contact area and the speed of relative slip. An important parameter for assessing the magnitude and nature of wear is the relative penetration depth of the contacting bodies. In this case, the magnitude of the collapse of one of the contacting bodies is equal to the depth of penetration of another body into it.

Calculations of the main radii of curvature of the surfaces of the rail head and bandage crest at the point of their contact are made, and the dimensions of the contact area are determined. As a result, expressions were obtained for calculating the depth of mutual penetration of the materials of the shroud crest and the rail head. The rail head material has a deeper penetration into the shroud tongue material. The force contact between the bandage crest and the rail occurs mainly within the limits of plastic deformation of their materials.

Formulas are obtained for determining the magnitude of the approach of the contacting bodies and the highest normal stress in the contact zone. An estimate of the values of the collapse of the material of the rail head and the bandage crest was made, which makes it possible to judge the percentage of their wear.

With force contact, the wear of the wheel rim flange is much higher than the wear of the rail head.

Keywords: force contact, geometric and physical parameters in the contact area, curvature radii, penetration depth, stresses in the contact zone, material wear.

Постоянное обновление подвижного состава меняет устоявшиеся нормы износа материала бандажей колесных пар локомотивов. На многих полигонах эксплуатации (особенно с большим числом кривых с радиусом менее 600 м) наблюдается повышенный износ гребней бандажей, что приводит к чрезмерным затратам на обточку колесных пар. Для того, чтобы уменьшить интенсивность изнашивания гребня, необходимо определить влияние конструктивных особенностей локомотива на величину износа. Одним из определяющих параметров при оценке характера изнашивания материала при фрикционном трении двух тел является глубина взаимного проникновения неровностей в области их контакта.

Износ материала гребня бандажа происходит при относительном скольжении гребня по грани головки рельса при их силовом контакте. Величину износа определяют в основном следующие параметры:

- напряжение материала в области контакта и размеры этой области;
- физико-механические и геометрические параметры контактирующих тел;
- шероховатость на поверхности рельса и гребня бандажа;
- скорость относительного скольжения и время контактного взаимодействия.

Геометрические и физические параметры в области контакта формируются под действием сжимающей силы P и зависят от геометрической конфигурации контактирующих тел в точке их начального соприкосновения.

Согласно теории Герца область контакта ограничена эллипсом с полуосями [1, 2]:

$$a = m_a \sqrt[3]{\left(\frac{P}{2AE_0}\right)}; \quad (1)$$

$$b = a\sqrt{(1 - e^2)}. \quad (2)$$

Сближение δ контактирующих тел и напряжение σ_0 в центре области задаются выражениями:

$$\delta = m_\delta \sqrt[3]{\frac{2A}{E_0^2}} P^{\frac{2}{3}}; \quad (3)$$

$$\sigma_0 = \frac{3P}{2\pi ab}, \quad (4)$$

где e – эксцентриситет эллипса;

A – величина, зависящая от главных радиусов кривизны соприкасающихся тел в точке их контакта;

E_0 – модуль упругости стали Па;

m_a, m_δ – коэффициенты, зависящие от отношения A/B , они приведены в таблице.

Значения величин e, m_a, m_δ в зависимости от отношения A/B

A/B	e	m_σ	m_a	m_δ
1	0	0,388	1,109	1,230
0,9	0,35	0,4	1,130	1,256
0,8	0,5	0,42	1,156	1,280
0,7	0,61	0,44	1,180	1,300
0,6	0,7	0,468	1,214	1,330
0,5	0,78	0,49	1,242	1,370
0,4	0,84	0,536	1,282	1,420
0,3	0,89	0,6	1,324	1,470
0,2	0,93	0,716	1,390	1,550
0,1	0,97	0,97	1,500	1,690
–	–	–	–	–
0,0085	0,99	3,19	1,8	2,125
0,007	0,999	3,202	1,826	2,142

В окрестности точки контакта гребень бандажа и головку рельса можно рассматривать как тела вращения. В этом случае величины A и B определяются по выражениям:

$$2A = \left(\frac{1}{R_{pl}} + \frac{1}{R_{rl}} \right); \quad (5)$$

$$2B = \left(\frac{1}{R_{p\tau}} + \frac{1}{R_{r\tau}} \right), \quad (6)$$

где R_{pl} и R_{rl} – радиусы кривизны поверхностей рельса и гребня в нормальном сечении плоскостью, проведенной в точке их контакта перпендикулярно к касательному вектору $\bar{l}$, мм;

$R_{p\tau}$ и $R_{r\tau}$ – радиусы кривизны поверхностей рельса и реборды в нормальном сечении плоскостью, перпендикулярной к бинормальному вектору $\bar{\tau}$, мм (рисунок 1).

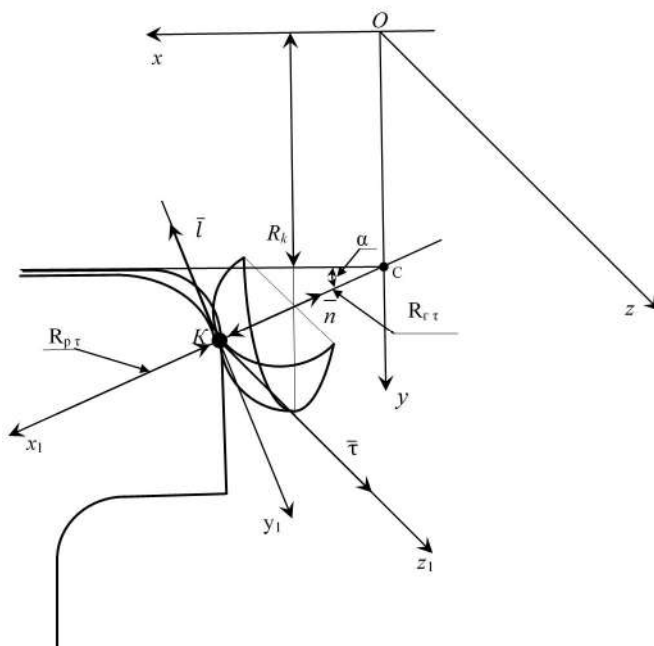


Рисунок 1 – Схема для вычисления радиусов кривизны:

R_p – радиусы кривизны поверхности рельса; R_r – радиусы кривизны гребня

Дальнейшие расчеты проведем для колесной пары электровоза ($R_K = 625$ мм).

Для рельса и гребня бандажа колеса радиусы кривизны в точке контакта будут такими:

$$R_{p\tau} = 15, R_{r\tau} = 40, R_{pl} = \infty.$$

Радиус кривизны R_{rl} вычислим следующим образом (в соответствии с рекомендациями работы [3]).

Дуга линии сечения гребня бандажа в окрестности точки К принадлежит окружности:

$$x^2 + (y - R_K)^2 = R_{r\tau}^2. \quad (7)$$

При вращении этой линии вокруг оси OX получаем поверхность тора:

$$x^2 + (\sqrt{y^2 + z^2} - R_K)^2 = R_{r\tau}^2. \quad (8)$$

Часть поверхности гребня лежит на поверхности этого тора. Радиусы кривизны сечений $R_{r\tau}$ у этих поверхностей в точке К будут одинаковыми.

Для упрощения вычислений преобразуем систему координат таким образом, чтобы нормальное сечение, перпендикулярное вектору $\bar{l}$, лежало в координатной плоскости. С этой целью сместим начало координат в точку К ($R_{r\tau} \cos \alpha, R_K + R_{r\tau} \sin \alpha, 0$) и совершим поворот вокруг оси OZ на угол α (угол между радиусом точки контакта и линией кругов катания $\alpha = 25^\circ$).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Формулы перехода к координатам в новой системе $x_1 y_1 z_1$ имеют вид:

$$\begin{cases} x = x_1 \cos \alpha - y_1 \sin \alpha + R_{\Gamma \tau} \cos \alpha; \\ y = x_1 \sin \alpha - y_1 \cos \alpha + R_{\Gamma \tau} \sin \alpha + R_K; \\ z = z_1. \end{cases} \quad (9)$$

Подставляя формулы (9) в уравнение поверхности и принимая $y_1 = 0$, получим уравнение линии сечения:

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2R_K \sqrt{y^2 + z^2} + R_K^2 - R_{\Gamma \tau}^2 = 0; \quad (10)$$

$$x = x_1 \cos \alpha + R_{\Gamma \tau} \cos \alpha; \quad (11)$$

$$y = x_1 \sin \alpha + R_{\Gamma \tau} \sin \alpha + R_K. \quad (12)$$

Радиус кривизны плоской линии определяется по формуле:

$$R_{\Gamma l} = \frac{[1 + ((x_1)'_z)^2]^{2/3}}{(x_1)''_{zz}}. \quad (13)$$

Для определения производной $(x_1)'_z$ продифференцируем уравнение линии сечения нормальной плоскостью:

$$xx'_z + (yy'_z + z) \left(1 - \frac{R_K}{\sqrt{y^2 + z^2}}\right) = 0; \quad (14)$$

$$x'_z = x'_1 \cos \alpha; \quad (15)$$

$$y'_z = x'_1 \sin \alpha. \quad (16)$$

С учетом выражений (11), (12), (15), (16) формула (14) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & (x_1 \cos \alpha + R_{\Gamma \tau} \cos \alpha) x'_{1z} \cos \alpha + \\ & + [(x_1 \sin \alpha + R_{\Gamma \tau} \sin \alpha + R_K) x'_{1z} \sin \alpha + z] \left(1 - \frac{R_K}{\sqrt{y^2 + z^2}}\right) = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Подставляем координаты точки К в системе координат $x_1 y_1 z_1$:

$$\begin{aligned} & R_{\Gamma \tau} \cos \alpha \cdot x'_{1z} \cos \alpha + x'_{1z} (R_{\Gamma \tau} \sin \alpha + R_K) \sin \alpha \cdot \left(1 - \frac{R_K}{R_{\Gamma \tau} \sin \alpha + R_K}\right) = \\ & = x'_{1z} R_{\Gamma \tau} \cos^2 \alpha + x'_{1z} R_{\Gamma \tau} \cos^2 \alpha = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Отсюда получим:

$$(x_1)'_z = 0.$$

Для определения $(x_1)''_{zz}$ продифференцируем дважды уравнение линии сечения нормальной плоскостью:

$$(x'_z)^2 + xx''_{zz} + [(y'_z)^2 + yy''_{zz} + 1] \left(1 - \frac{R_K}{\sqrt{y^2 + z^2}}\right) + (yy'_z + z) R_K \frac{(yy'_z + z)}{(y^2 + z^2)^{3/2}} = 0. \quad (19)$$

Так как: $x''_{zz} = x''_1 \cos \alpha$, $y''_{zz} = x''_1 \sin \alpha$, то в точке К получаем:

$$(x_1)''_{zz} = \frac{\sin \alpha}{R_{\Gamma \tau} \sin \alpha + R_K}. \quad (20)$$

Радиус кривизны $R_{\Gamma l}$ в точке К

$$R_{\Gamma l} = \frac{1}{(x_1)''_{zz}} = R_{\Gamma \tau} + \frac{R_K}{\sin \alpha}. \quad (21)$$

Таким образом, имеем: $R_{\Gamma \tau} = 15$ мм, $R_{\Gamma \tau} = 40$ мм, $R_{pl} = \infty$, $R_{\Gamma l} = 1518,87$ мм.

Тогда $2A = 1/1518,87$, $2B = 11/120$, $A/B = 0,0072$.

Из таблицы находим: $m_a = 1,28$; $m_\sigma = 3,202$; $e = 0,999$.

Ниже приведены расчетные формулы и графики геометрических и физических параметров в области контакта в зависимости от сжимающей силы P (рисунки 2 – 4).

Преобразовав формулу (1), определим величину большой полуоси области контакта:

$$a = 7,7317\sqrt[3]{P}. \quad (22)$$

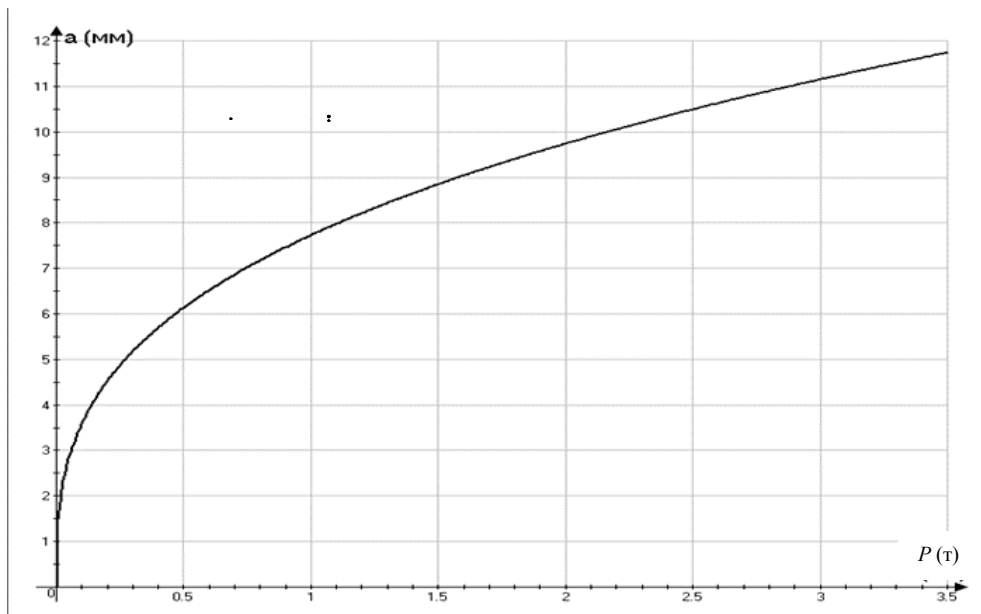


Рисунок 2 – Зависимость величины большой полуоси от сжимающей силы P

Преобразовав формулу (2), определим величину малой полуоси области контакта:

$$b = 0,3456\sqrt[3]{P}. \quad (23)$$

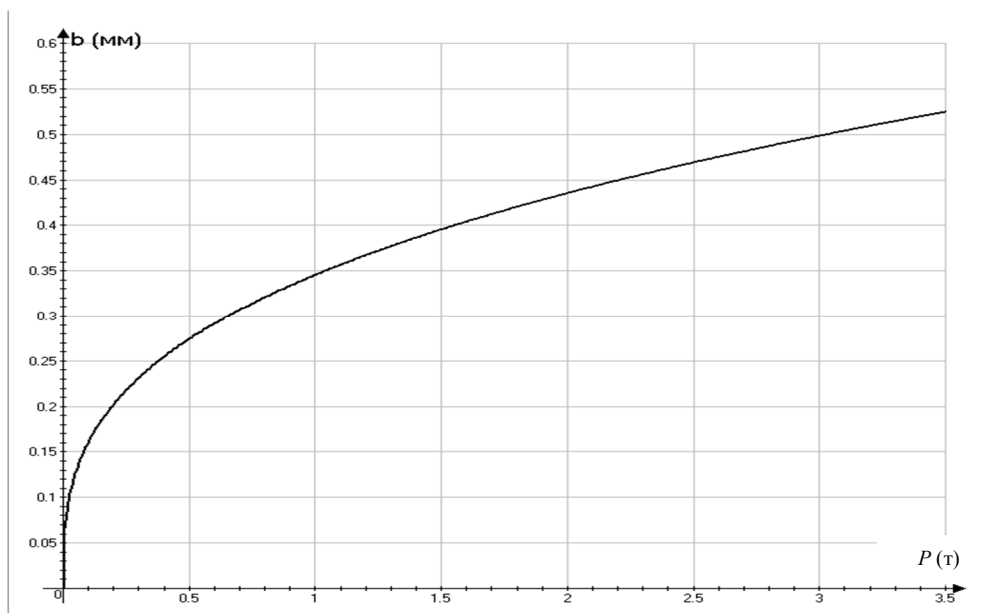


Рисунок 3 – Зависимость величины малой полуоси от сжимающей силы P

Как видно из графиков, представленных на рисунках 2 – 4, область контакта представляет собой узкую эллиптическую поверхность шириной до 1 мм и протяженностью порядка 20 мм.

Преобразовав формулу (4), напряжение в центре контактной области определим так:

$$\sigma_0 = 0,1787\sqrt[3]{P}. \quad (24)$$

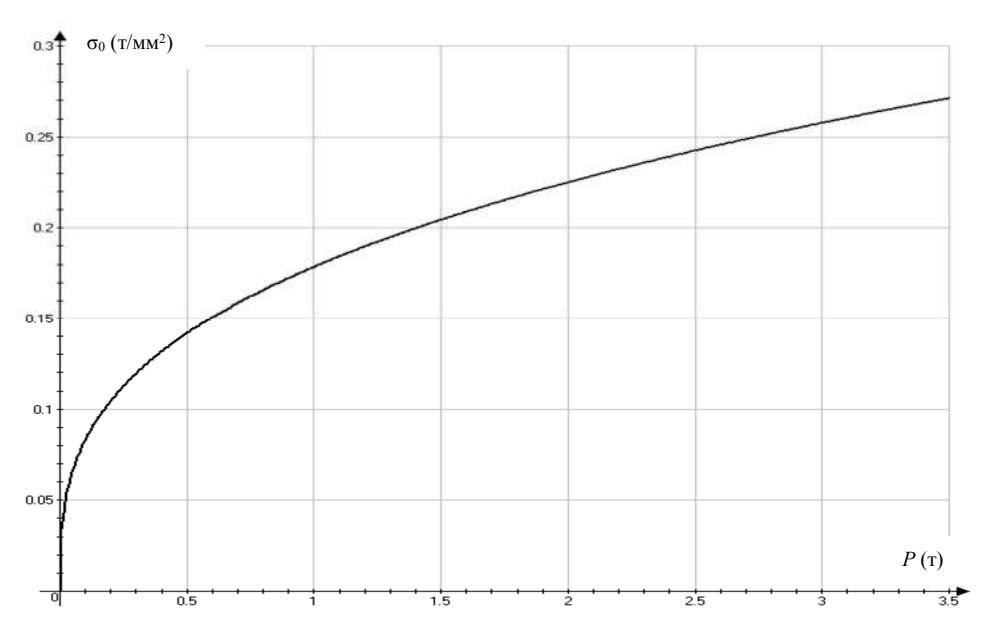


Рисунок 4 – Зависимость напряжения в центре области контакта от сжимающей силы P

Напряжения в центре области контакта превышают предел текучести для колесной и рельсовой стали (500 – 800) Н/мм². При сжимающих силах более 600 Н начинается пластическая деформация материалов гребня бандажа и грани рельса. Наличие пластической деформации материала контактирующих тел является одним из главных факторов изнашивания материала при фрикционном трении.

Величину сближения головки рельса и гребня бандажа в соответствии с формулой (3) определим как:

$$\delta = 0,0118 \sqrt[3]{P^2}. \quad (25)$$

На рисунке 5 представлена зависимость суммарного смятия материала гребня колеса и головки рельса от сжимающей силы.

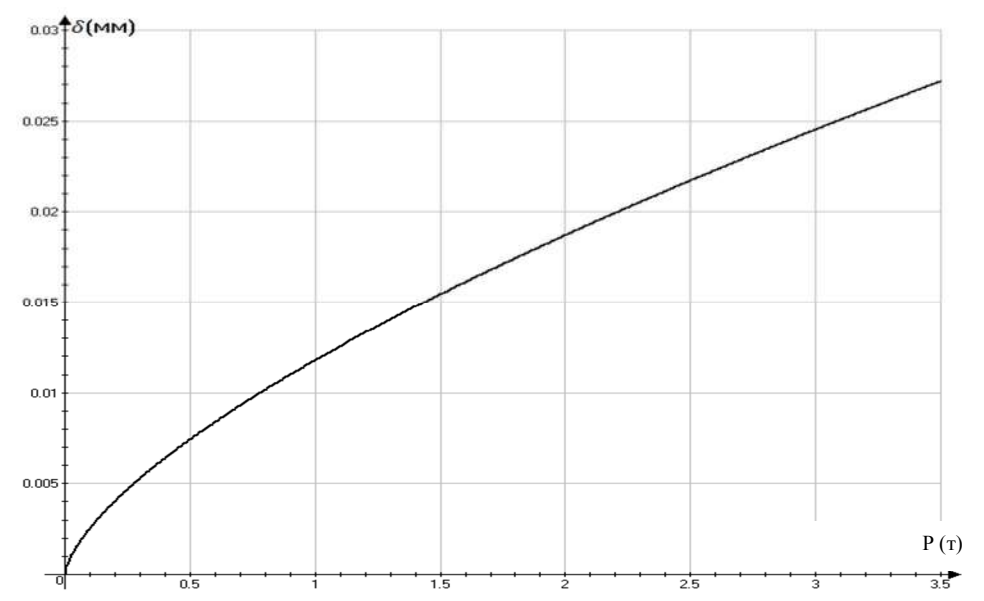


Рисунок 5 – Зависимость суммарного смятия материала гребня колеса и головки рельса от сжимающей силы P

Из графика на рисунке 5 следует, что величина сближения (суммарное смятие материала рельса и гребня бандажа) не превышает 0,03 мм.

При шлифовке рельса и обточке бандажа колесной пары допускается шероховатость третьего класса ($R_a = 0,04$ мм, $R_z = 0,08$ мм, $l = 8$ мм) [4].

Можно утверждать, что силовое взаимодействие гребня бандажа и головки рельса происходит в основном на уровне неровностей в область контакта, так как $R_z > \delta$. В таком случае адгезионная составляющая фрикционного трения практически исключается. Износ материала контактирующих тел будет определяться глубиной внедрения неровностей в области контакта и скоростью относительного скольжения.

Важным параметром для оценки величины и характера износа служит глубина относительного проникновения контактирующих тел [5].

Формулу (20) будем использовать для расчёта величины сближения гребня бандажа и грани рельса в точке их контакта в зависимости от величины сжимающей силы.

Сближение гребня бандажа и грани головки рельса в точке их контакта обусловлено взаимным проникновением контактирующих тел за счет пластического деформирования (смятия) их материала:

$$\delta = \delta_p + \delta_r, \quad (26)$$

где δ_p и δ_r – смятие материала рельса и гребня бандажа соответственно, мм.

Ввиду малости данных величин можно принять их пропорциональными минимальным главным радиусам кривизны контактирующих поверхностей в точке их контакта:

$$\delta_p = R_{p\tau} C_1; \quad (27)$$

$$\delta_r = R_{r\tau} C_2, \quad (28)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты пропорциональности для рельсовой и колесной стали соответственно.

Для рельсовой и колесной сталей с одинаковыми физико-механическими свойствами ($C_1 = C_2$) имеем соотношение:

$$\frac{\delta_p}{\delta_r} = \frac{R_{p\tau}}{R_{r\tau}}. \quad (29)$$

Из уравнений (26) и (29) находим:

$$\delta_p = \frac{\delta R_{p\tau}}{(R_{p\tau} + R_{r\tau})}; \quad (30)$$

$$\delta_r = \frac{\delta R_{r\tau}}{(R_{p\tau} + R_{r\tau})}. \quad (31)$$

Очевидно, что величина смятия одного из контактирующих тел равна глубине проникновения в него другого тела.

В итоге получены выражения для расчета глубины взаимного проникновения гребня бандажа и грани рельса.

Глубину проникновения грани рельса в материал гребня определим по формуле:

$$h_p = \frac{\delta R_{r\tau}}{(R_{p\tau} + R_{r\tau})}. \quad (32)$$

Глубину проникновения гребня бандажа в материал грани рельса найдем по выражению:

$$h_r = \frac{\delta R_{p\tau}}{(R_{p\tau} + R_{r\tau})}. \quad (33)$$

Для $R_{p\tau} = 15$ мм, $R_{г\tau} = 40$ мм на основе уравнений (32) и (33) получаем следующие зависимости:

$$h_p = 0,0086 \sqrt[3]{P^2}; \quad (34)$$

$$h_{г} = 0,0032 \sqrt[3]{P^2}. \quad (35)$$

Грань головки рельса имеет более глубокое проникновение в материал гребня бандажа.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

силовой контакт гребня бандажа и рельса происходит в основном в пределах пластической деформации материала;

взаимное проникновение ограничивается уровнем шероховатостей поверхностей контактирующих тел;

глубина проникновения неровностей рельса в материал гребня бандажа составляет около 70 % от общей величины смятия;

при силовом контакте износ гребня бандажа колеса значительно выше износа рельса.

Список литературы

1. Беляев, Н. М. Вычисление наибольших расчетных напряжений при сжатии соприкасающихся тел / Н. М. Беляев. – Текст : непосредственный // Сборник ЛИИПСа. – 1929. – Вып. 102. – С. 151–174.

2. Штаерман, И. Я. Контактная задача теории упругости / И. Я. Штаерман. – Москва-Ленинград : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. – 270 с. – Текст : непосредственный.

3. Александров, П. С. Лекции по аналитической геометрии / П. С. Александров. – Москва : Наука; Главная редакция физико-математической литературы, 1968. – 912 с. – Текст : непосредственный.

4. Шлифование рельсов. Совершенствование методики и технологии. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2000. – № 9. – С. 1–10.

5. Крагельский, И. В. Трение, изнашивание и смазка : справочник : в 3 томах / И. В. Крагельский, В. В. Алисин. – Москва : Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 400 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Beliaev N.M. Calculation of the greatest design stresses during compression of contiguous bodies. *Sbornik LIIPSa – Collection of Liips*, 1929, issue 102, pp. 151-174 (In Russian).

2. Shtaerman I.Ia. *Kontaktnaia zadacha teorii uprugosti* [Contact problem of elasticity theory]. Moscow-Leningrad, State Publishing House of Technical and Theoretical Literature Publ., 1949, 270 p. (In Russian).

3. Aleksandrov P.S. *Leksii po analiticheskoi geometrii* [Lectures on analytical geometry]. Moscow, Nauka; The main editorial office of the physical and mathematical literature Publ., 1968, 912 p. (In Russian).

4. Grinding of rails. Improvement of methodology and technology. *Zheleznnye dorogi mira – Railways of the world*, 2000, no. 9, pp. 1-10 (In Russian).

5. Kragel'skii I.V., Alisin V.V. *Trenie, iznashivanie i smazka: spravochnik : v 3 tomakh* [Friction, wear and lubrication: handbook : in 3 volumes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, vol. 1, 400 p. (In Russian).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Виктор Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Шантаренко Сергей Георгиевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Болотюк Владимир Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (913) 684-20-68.

E-mail: rombva@mail.ru

Савинкин Сергей Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (923) 694-61-15.

E-mail: syava-sv@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Определение напряжений и глубины взаимного проникновения головки рельса и гребня бандажа колеса в области их силового контакта / В. Ф. Кузнецов, С. Г. Шантаренко, В. А. Болотюк, С. В. Савинкин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 90 – 98.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Victor Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Higher mathematics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Shantarenko Sergey Georgievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Bolotyuk Vladimir Anatolievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Pedagogical Sciences, associate professor of the department «Higher mathematics», OSTU.

Phone: +7 (913) 684-20-68.

E-mail: rombva@mail.ru

Savinkin Sergey Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair», OSTU.

Phone: +7 (923) 694-61-15.

E-mail: syava-sv@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kuznetsov V.F., Shantarenko S.G., Bolotyuk V.A., Savinkin S.V. Determination of stresses and the depth of mutual penetration of the railhead and the wheel rim ridge in the area of their power contact. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 3 (51), pp. 90-98 (In Russian).

Д. О. Емельянов, П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

ИННОВАЦИОННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ В СИСТЕМЕ «КОЛОДКА – КОЛЕСО»

Аннотация. В данной статье были рассмотрены существующие в настоящее время способы определения коэффициента трения скольжения трибологической пары любой инженерно-технической системы. Коэффициент трения является одним из основных параметров, характеризующих работу трибологических пар. Устойчивая и эффективная работа трибологических пар в подобных системах наряду с высокими прочностными и усталостными характеристиками является не только основой безопасности, но и перспективным направлением с точки зрения экономических выгод при проектировании и эксплуатации различных устройств и систем. Соответственно эта область исследования является весьма актуальной для железнодорожной отрасли, в частности, для подвижного состава. Обуславливается это большим количеством пар трения в разных узлах пассажирских и грузовых вагонов, а также локомотивов, обеспечивающих безопасное и бесперебойное движение подвижного состава в целом на железных дорогах. Трибологические процессы важны как непосредственно при осуществлении движения, так и для осуществления бесперебойных процессов торможения. В этом вопросе на первый план выходит фактор определения и анализа коэффициента трения скольжения. Одной из таких пар трения является система «колодка – колесо», представляющая собой исполнительный орган тормозной системы железнодорожного поезда. Оптимизация контакта в этой системе является одним из определяющих факторов роста тормозной эффективности при осуществлении торможения, увеличении рабочего ресурса элементов пары трения, сокращении вероятности возникновения дефектов. Поиск новых подходов к изучению вопросов трения является непосредственным катализатором научно-технического прогресса в инженерной отрасли.

Ключевые слова: Трибологическая пара, коэффициент трения, тормозная эффективность, система «колодка – колесо», инновационная методика, тормозное нажатие, классификация методов, мессдоза, подвижной состав.

Denis O. Emelyanov, Pavel Y. Ivanov, Evgeny Y. Dulsky

Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, the Russian Federation

INNOVATIVE METHOD OF DETERMINING THE COEFFICIENT OF FRICTION IN THE «PAD – WHEEL» SYSTEM

Abstract. In this article, the currently existing methods for determining such a technical parameter as the sliding friction coefficient were considered. The coefficient of friction is one of the main parameters characterizing the operation of tribological pairs of any engineering system. Stable and efficient operation of tribological pairs in such systems, along with high strength and fatigue characteristics, are not only the basis of safety, but also a promising direction in terms of economic benefits in the design and operation of various devices and systems. Accordingly, this area of research is very relevant for the railway industry, and for railway rolling stock in particular. This is caused by a large number of friction pairs in different nodes of passenger and freight cars, locomotives, ensuring safe and uninterrupted movement of rolling stock as a whole on iron dross. Tribological processes are important both directly during movement and during braking processes. In this matter, the factor of determining and analyzing the sliding friction coefficient comes to the fore. One of these friction pairs is the «pad-wheel» system, which is the executive body of the braking system of a railway train. Optimization of contact in this system is one of the determining factors for the growth of braking efficiency during braking, increasing the working life of the elements of the friction pair, reducing the likelihood of defects. The search for new approaches to the study of friction issues is a direct catalyst for scientific and technological progress in the engineering industry.

Keywords: Tribological pair, coefficient of friction, braking efficiency, wheel pad system, innovative technique, brake pressing, classification of methods, mesdose, rolling stock.

Одной из основных категорий в аксиоматике механики является сила, приложенная к материальной точке, выражение для которой в виде зависимости от времени, координат точки и ее скорости присутствует в правой части второго закона Ньютона. Эта зависимость обычно

устанавливается экспериментально и является задачей какого-либо раздела физики [13]. История развития подходов к изучению сухого трения, а также формирование фундаментальных основ трибологии как науки представлены в работе В. Ф. Журавлева. В ней рассмотрены закон Кулона, формулировки сухого трения Л.Эйлера с последующей критикой П. Пенлеве сформулированных законов, рассмотрен подход Жуковского к точечному контакту.

Актуальность вопросов трения и по сей день обуславливается сложностью выполняемых измерений, а также неполнотой получаемой картины трибологических процессов, в частности в отрасли железнодорожного транспорта, что является серьезной проблемой при оптимизации трения в различных узлах и системах подвижного состава. Например, применяемая сейчас методология и способ оценки трения при осуществлении торможения подвижным составом позволяют учитывать только скорость движения, материал колодки и силу прижатия тормозной колодки к колесу, что не дает возможности всесторонне описывать контактную картину. Ряд существенных факторов остается неучтенным при применении данного способа, среди таковых отмечаются температура, влажность, наличие третьего тела в зоне контакта, влияние геометрии контактирующих поверхностей и др.

Движение железнодорожного подвижного состава и сопутствующие этому процессы характеризует ряд динамических параметров [1]. Одним из наиболее значимых является трение. Изучением непосредственно вопросов и процессов трения занимается наука «Трибология». Процессы трения в науке подразделяются на трение покоя, движения, скольжения, качения. По условиям контакта принято выделять сухое трение, граничное, жидкостное. Учитывая специфику рассматриваемого вопроса взаимодействия тормозных колодок с колесом подвижного состава на железной дороге, более подробно остановимся на сухом трении скольжения.

Сухое трение-это трение, возникающее при непосредственном соприкосновении двух твердых тел ввиду отсутствия между ними жидкой или газообразной прослойки. Сила трения покоя – сила трения, действующая между двумя телами, неподвижными относительно друг друга.

Методология определения данного коэффициента является одним из значимых разделов указанной науки и включает в себя многообразие способов и методов его расчета. По своей природе этот коэффициент является эмпирическим, соответственно в основе его определения заложен практический эксперимент, результатом которого является определение параметров и зависимостей, на основе которых и производится расчет значения коэффициента. Сила трения скольжения же возникает в результате движения тел относительно друг друга.

В общем случае (рисунок 1) сила трения равна произведению коэффициента трения скольжения на силу реакции опоры. При увеличении веса тела и коэффициента трения увеличивается сила трения. Также стоит учесть тот факт, что существенное влияние на силу трения помимо собственного веса тела может оказывать внешнее силовое воздействие, например, прижатие тормозной колодки к колесу.

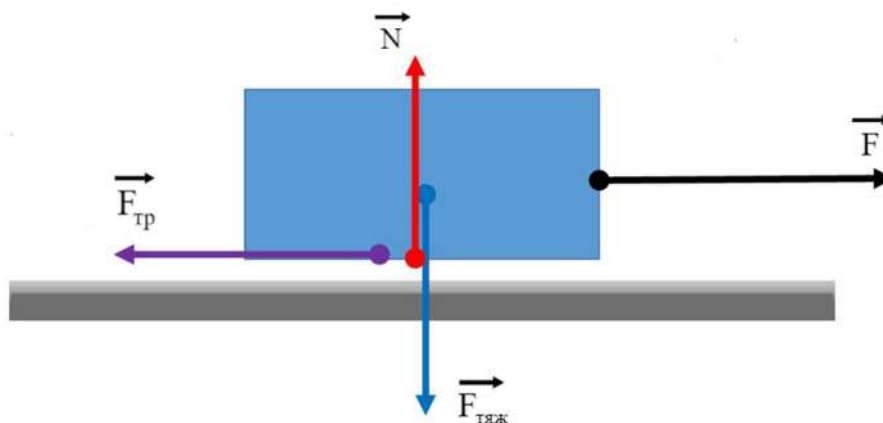


Рисунок 1 – Распределение сил, действующих на движущееся тело

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N \quad (1)$$

Наиболее существенным признаком, по которому классифицируются методы определения коэффициентов трения, является характер идентифицируемого параметра в процессе трения. Существуют параметры, прямо характеризующие возникающие силы и величины, обуславливающие трибологические процессы между парами трения, а также косвенные, которые сопутствуют процессам трения, являются следствием этих процессов, но тем не менее позволяют выстраивать алгебраические зависимости и производить вычисление коэффициента трения математическим путем. На основе этой классификации выделяются прямые и косвенные методы определения коэффициента трения.

В основе первой группы методов заложено прямое измерение контактных нормальных и касательных напряжений с помощью измерительной аппаратуры (точечные мессдозы, торсиометры и др.), по которым определяют коэффициент трения. Эти методы требуют применения сложной дорогой измерительной техники, которая может быть использована только в лабораторных условиях и не способна воспроизводить в полной мере эксплуатационные условия. На основании результатов и опытной оценки возникающего трения ведутся исследования в области эффективного управления тормозными процессами [2, 3].

Наиболее ярким для понимания примером прямого измерения коэффициента трения в условиях лабораторных испытаний является метод измерения мессдозами, успешно осуществленный Савоськиным А.Н. посредством лабораторной установки (рисунок 2), созданный им и им же запатентованной. Метод посредством изобретенного устройства был осуществлен в 1998 г., и в то время являлся передовым в отрасли. Эксперимент заключался в определении контактных напряжений, возникающих при осуществлении прижатия в колесе колесной пары и колодке посредством мессдоз, силоизмерительных устройств, определяющих возникающие при контакте двух тел напряжения в точке, где предварительно располагалось измерительное устройство.

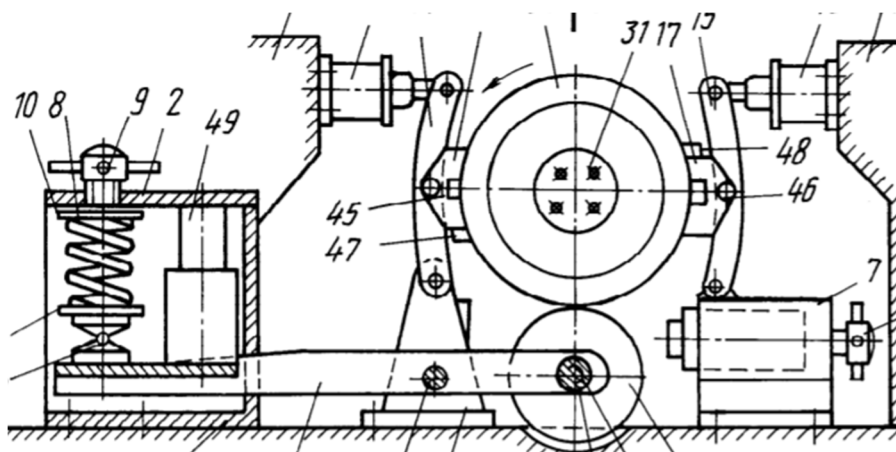


Рисунок 2 – Схема стенда Савоськина А. Н. для определения коэффициента трения

Несмотря на характерную новизну своего времени рассматриваемый метод не дает полной комплексной оценки изменения коэффициента трения. Основная проблема заключается в том, что измерение контактных напряжений в определенных точках при поверхностном характере взаимодействия лишает возможности получения полной объективной оценки поверхностного трения, что является важным условием в рамках рассмотрения процесса тормозного нажатия колодки на колесо. Причем на характер взаимодействия и пятно контакта также влияют такие эксплуатационные факторы, как профиль пути, кривизна пути, скорость движения и др. [4].

К настоящему времени существуют формулы определения коэффициента трения тормозной колодки о колесо, полученные эмпирическим путем. Формулы были выведены и скорректированы на основе так называемого «метода бросания» (рисунок 3). Метод бросания – это

метод определения тормозного пути, при котором экстренные торможения выполняют путем принудительной отцепки испытываемой единицы железнодорожного подвижного состава от опытного сцепы при его движении с заданной скоростью [5].

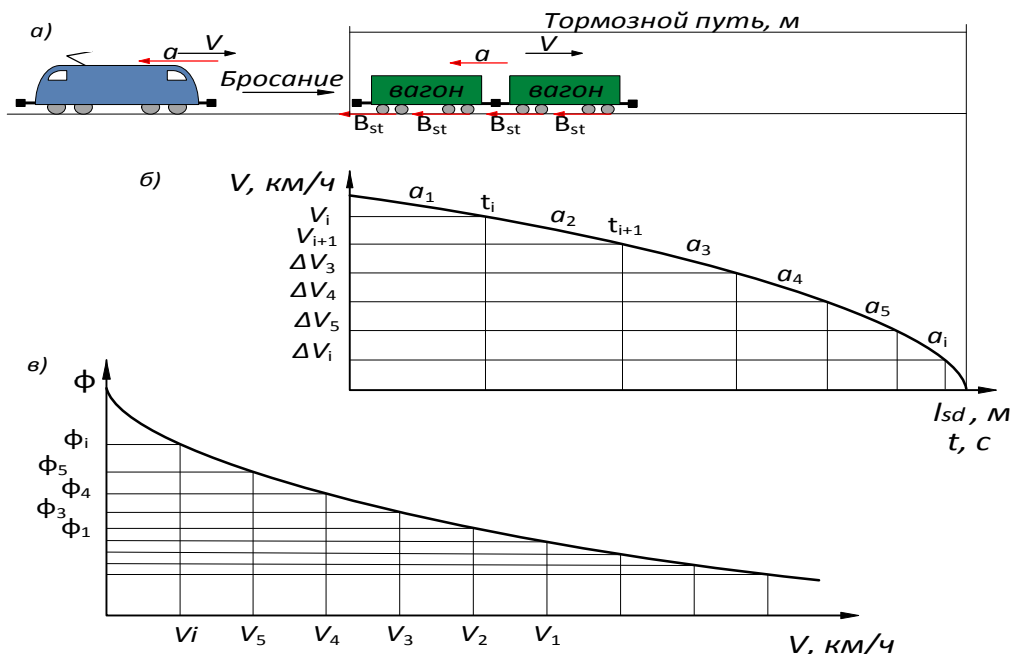


Рисунок 3 – Метод бросания для определения коэффициента трения тормозных колодок:

a – схема выполнения метода бросания; b – график изменения ускорения вагона в зависимости от времени после отпуска вагона; c – график изменения коэффициента трения в зависимости от скорости движения вагона

У данного способа есть ряд характерных недостатков, влияющих на полноту отображаемых зависимостей. Метод бросания производится в режиме экстренного торможения до полной остановки единиц подвижного состава, не позволяя производить торможение в поддерживающем режиме, без полной остановки единиц подвижного состава [6]. Полученные на основе данного метода формулы учитывают только два параметра – скорость движения единицы подвижного состава и силу прижатия колодки. Остаются неучтенными такие параметры, как температура поверхностей трения, влажность поверхностей, геометрия поверхностей и многие другие.

Для композиционных колодок эмпирическая формула имеет вид:

$$\varphi_k = 0,44 \frac{v+150}{2v+150} \frac{K+20}{4K+20}. \quad (2)$$

Для чугунных соответственно:

$$\varphi_k = 0,6 \frac{v+100}{5v+100} \frac{16K+100}{80K+100}. \quad (3)$$

Российский опыт проектирования усовершенствованных тормозных систем для железнодорожного транспорта опирается на эмпирический опыт и современную методологию изучения коэффициента трения. Основной стратегией является модернизация и упрощение механических узлов тормозной системы, в частности, ее механических элементов. В данном контексте следует отметить разработку инновационной тормозной системы инженеров ОАО «Транспневматика» (рисунок 4), которая основывается на отказе от избыточности функций, присутствующей при использовании в составе тормозной системы воздухораспределителя и авторежима в части регулирования давления сжатого воздуха в тормозном цилиндре, а также применении тормозного цилиндра (ТЦ) со встроенным авторегулятором выхода штока [11].

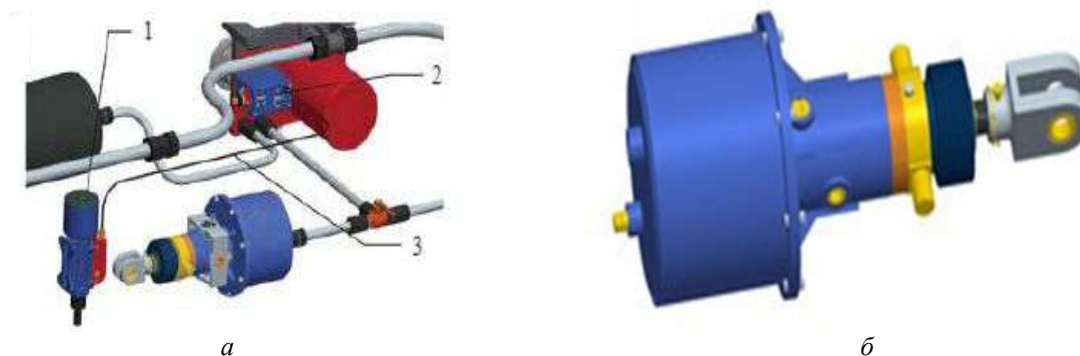


Рисунок 4 – Конструкция инновационной тормозной системы с использованием ТЦ со встроенным авторегулятором выхода штока. Общий вид и расположение элементов: *а* – схема компоновки элементов усовершенствованной тормозной системы (1 – датчик загрузки вагона, 2 – привод регулятора давления, 3 – тросовый привод); *б* – тормозной цилиндр со встроенным авторегулятором выхода штока

Помимо разработки инновационных и применения устройств, позволяющих значительно оптимизировать работу тормозной системы поезда в целом, в настоящее время активно ведется изучение зоны контакта в ходе прижатия тормозной колодки к колесу, влияния третьего тела в зоне контакта на характер трения, а также всевозможных способов регулировки температуры в зоне контакта. В качестве третьего тела используют материал, характеризующийся анизотропными свойствами. При этом обеспечивается высокий – не менее 0,3 при продольном крепе и низкий, не более – 0,14 при поперечном крепе коэффициент сцепления. Третье тело может быть в виде металла (Al, Zn, Cu) или его окислов (Al_2O_3 , ZnO, CuO). В зоне трения происходят процессы создания динамического воздействия на фрикционную систему в виде внешних, собственных колебаний или фрикционных автоколебаний контактирующих микро- и макрошероховатостей. Кроме того, могут происходить процессы подавления собственных колебаний, контактирующих микро- и макрошероховатостей, а также изменяется суммарная контактная жесткость при изменении направления относительного скольжения поверхностей трения.

Зарубежный опыт изучения вопросов трения в тормозных системах также рассматривает всевозможные пути регулировки температуры в зоне контакта трибологической пары, применение специальных перфорированных вставок, теплоотводящих материалов, использование прокладок с охлаждающими ребрами и с самовентилируемыми тормозными дисками (рисунки 5, 6).

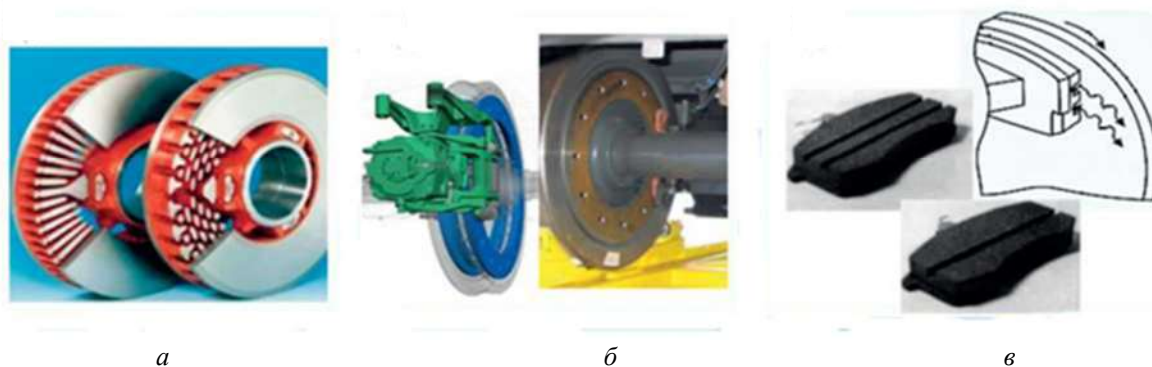


Рисунок 5 – Внешний вид вентилируемых тормозных элементов, используемых на зарубежном железнодорожном транспорте: *а, б* – вентилируемые тормозные дисковые элементы; *в* – накладки с ребрами вентиляции

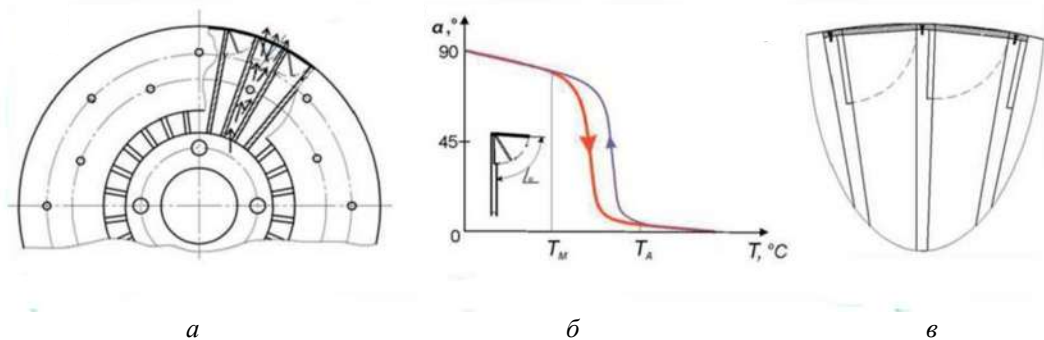


Рисунок 6 – Технические решения для снижения энергозатрат высокоскоростных поездов:
а – схема вентиляции тормозных дисков; б – график зависимости температуры тормозных элементов от угла каналов обдува; в – схема каналов для подачи воздуха

На основании проведенного анализа работ зарубежных исследователей можно сделать вывод о том, что наиболее широко используемым способом стабилизации температуры является выполнение диска с вентиляционными каналами. Конструкция дисков с вентиляционными каналами улучшает тормозной эффект, но в то же время увеличивает сопротивление движению поезда, что является негативным фактором.

Предлагаемая исследователями процедура обработки результатов экспериментов основывается на переводе вербальных переменных в количественную оценку и определение степени соответствия экспертных заключений, т.е. вычисление ранга корреляции по методу Спирмена. Обязательным условием применения методов ранговой корреляции для ранжированных данных является то, что количество рангов должно быть равно количеству методов исследования, после чего производится экспертная оценка результатов в Excel.

Как следствие, можно отметить малое количество методик и технологий по оценке непосредственно характера процесса трения и его природы при разработке инновационных тормозных систем и технических решений. В связи с этим авторами был разработан и предложен «Способ определения коэффициента трения трибологической пары по потребляемой электрической мощности электропривода», который относится к области механических испытаний материалов трибологического характера, в частности, к определению коэффициента трения скольжения.

Задачей предлагаемого способа является комплексная оценка силового взаимодействия с последующим определением коэффициента трения при различных условиях трения и параметрах трущихся пар [7]. Опытные исследования образцов трущихся пар могут осуществляться с учетом ряда таких факторов, как температура, скорость скольжения, сила прижатия, геометрия – радиус вращающейся детали, площадь контакта, форма трущихся тел, условия охлаждения трущихся деталей, материал, наличие третьего тела в зоне контакта – влажность поверхностей, запыление, загрязнение, твердость материала, химического состава трущейся пары. Зависимости, полученные экспериментально, могут анализироваться на предмет корреляции и аппроксимироваться [8].

В основе предложенной методики определения коэффициента трения лежат общие принципы определения тормозных сил (рисунок 7).

Согласно известной формуле сила трения трибологической пары определяется по формуле:

$$B = K \cdot \varphi_k, \quad (4)$$

где K – сила прижатия фрикционной накладки к телу вращения;

φ_k – коэффициент трения скольжения фрикционной накладки по телу вращения.

Выразив моменты, возникающие от приведения во вращение тела через потребляемую приводом мощность, а также при прижатии тормозной колодки к колесу, получим:

$$M_B = 9,55 \frac{P}{n}, \quad (5)$$

где P – мощность, потребляемая электроприводом;

n – количество оборотов в минуту.

9,55 – const, переводной коэффициент ($9,55 = \frac{60}{2 \cdot \pi}$)

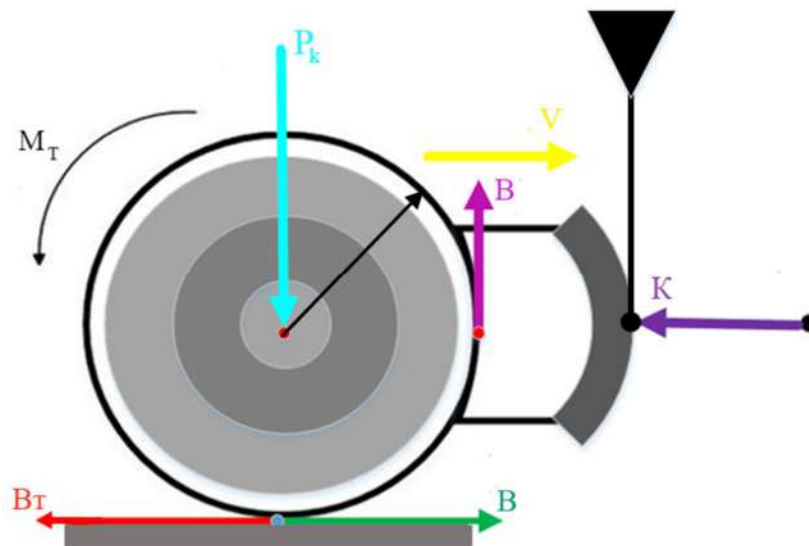


Рисунок 7 – Распределение сил при осуществлении прижатия тормозной колодки к колесу в ходе движения колеса со скоростью V

Известно также, что возникающий момент можно найти по уравнению:

$$M_T = B \cdot r_k, \quad (6)$$

где B – тормозная сила (4), возникающая в трибологической паре;

r_k – радиус тела вращения.

Записав условие возникновения трения при постоянной скорости вращения тела через равенство противоположно направленных моментов, создаваемых асинхронным приводом (5), а также прижатием фрикционной накладке (6), согласно новому способу получим математическую формулу для определения коэффициента трения скольжения:

$$\varphi_k = 9,55 \frac{1,73 \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta}{K \cdot r_k \cdot n}, \quad (7)$$

где I – ток, потребляемый из сети;

U – напряжение в сети;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности;

η – КПД привода;

K – сила прижатия фрикционной накладки к телу вращения;

r_k – радиус тела вращения;

n – количество оборотов в минуту;

1,73 – коэффициент для расчета в трехфазной сети ($\sqrt{3}$).

Основополагающая особенность данного способа определения и оценки коэффициента трения согласно предложенной формуле заключается в возможности учесть обобщенный коэффициент трения непосредственно по всей поверхности контакта, исключая возможность появления выпадающих точек в ходе получения контактной кривой. Сущность и новизна способа состоит в измерении и оценке косвенных параметров контактного процесса, нежели непосредственных трибологических величин, которые в настоящее время существующие

методики предлагают определять исключительно в определенных точках. Универсальность предлагаемого метода заключается в возможности использовать различные тела вращения в ходе эксперимента (колесо, каток, барабан и др.), изменяя их характеристики и условия взаимодействия, включая случаи наличия третьего тела в зоне трения, а также комбинировать их с разными фрикционными накладками, экспериментальными образцами реальных тормозных систем.

Результатом будет являться комплексная оценка коэффициента трения трибологической пары, которая позволит исключить вероятность получения выпадающих значений в ходе определения коэффициента трения относительно различных точек контакта поверхности, и отслеживать общий характер изменения коэффициента трения по всей поверхности контакта с учетом различных факторов, влияющих на процесс трения. Универсальность рассматриваемого метода позволит применять его в различных отраслях при поиске решений по оптимизации трибологических взаимодействий.

Основополагающие особенности данного способа определения и оценки коэффициента трения:

- возможность учесть обобщенный коэффициент трения непосредственно по всей поверхности контакта;

- исключение вероятности появления выпадающих точек в ходе получения контактной кривой;

- высокая мощность и силовые характеристики, реализуемые предлагаемым устройством в отличие от существующих ныне аналогов;

- характерная простота метода и устройства, позволяющего реализовать предложенный метод;

- удобство корреляции полученных в результате непрерывного контроля зависимостей;

- возможность имитировать различные условия, возникающие в ходе осуществления прижатия колодки к колесу с последующей корректировкой и уточнением предлагаемой методики.

В основе предложенной методики определения коэффициента трения лежат общие принципы определения тормозных сил [9], а также достигнутые принципиально новые возможности, которые позволят реализовать устройство, разработанное и сконструированное авторами для реализации предлагаемого метода (рисунок 8).

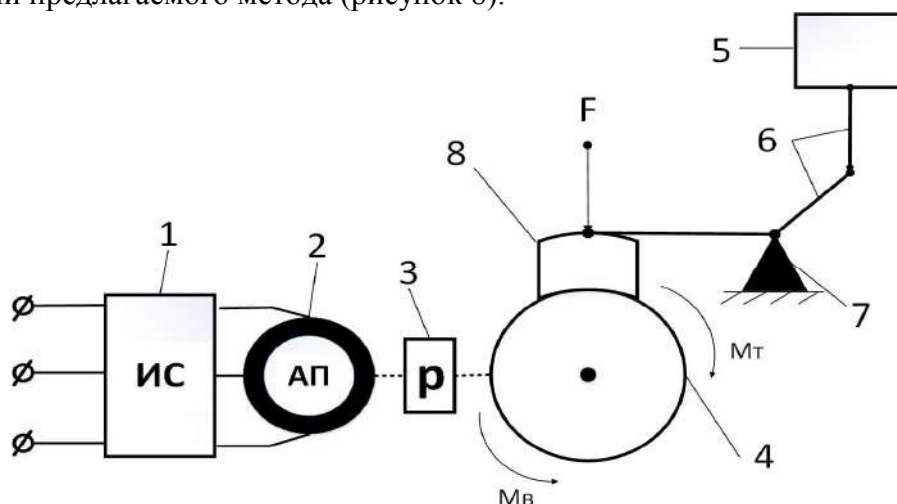


Рисунок 8 – Функциональная схема устройства для реализации методики по определению коэффициента трения: 1 – измерительные системы; 2 – асинхронный электропривод; 3 – редуктор; 4 – цилиндрический образец; 5 – подвесной груз; 6 – системы рычагов; 7 – блок; 8 – прижимной образец

Конструктивное исполнение устройства «Стенд для исследования параметров тормозного нажатия колодки на колесо» (рисунок 9) позволяет задавать различную скорость вращения

колесной пары от асинхронного привода посредством переключаемого многоступенчатого редуктора. Нагрузочное устройство представляет собой силовую опорную стойку с двумя усиленными осями, на которых закрепляются рычаги с передаточным отношением 1:5. С одной стороны рычаг нагружается тросом через блоки, натянутым под действием силы веса грузов, а с другой стороны на рычаг закрепляется башмак. В башмак устанавливается тормозная колодка, геометрически идентичная кругу катания колесной пары. С учетом размещения оборудования спроектировано основание, удовлетворяющее условиям надежной фиксации всех узлов конструкции с целью минимизации вибрации при работе стенда. Процесс фиксации выходных данных осуществляется посредством комплекса электроизмерительного и термометрического оборудования.

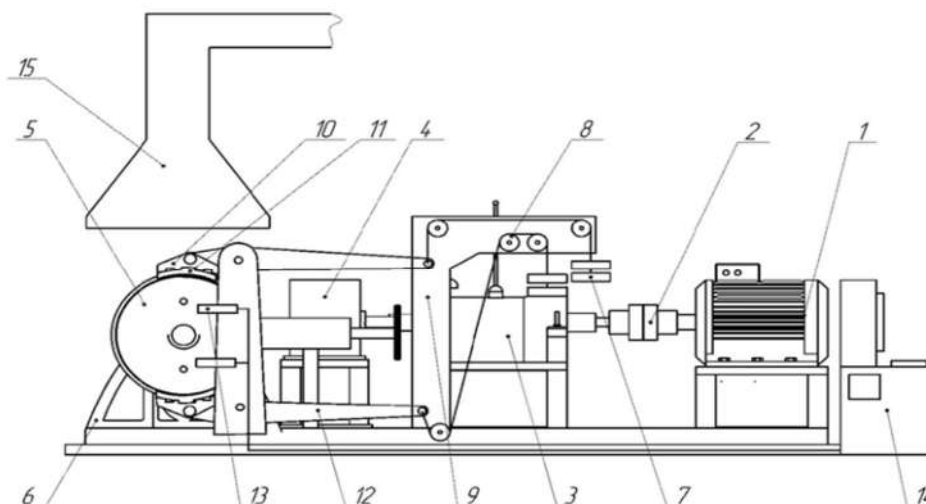


Рисунок 9 – Схема стенд для исследования параметров тормозного нажатия колодки на колесо:

1 – асинхронный привод; 2 – муфта электродвигателя; 3 – коробка передач; 4 – многоступенчатый редуктор; 5 – колесная пара; 6 – стойки для колесной пары; 7 – бетонный груз; 8 – система блоков; 9 – стойки для грузов; 10 – башмак; 11 – тормозная колодка; 12 – рычаг; 13 – измерительные системы; 14 – блок фиксации и контроля измеряемых параметров; 15 – система обдува

Основой для реализации предложенной методики является сконструированное представленное выше устройство.

Задачей предлагаемого устройства является возможность оценивать усилие прижатия колодки к колесу по всей поверхности, учитывая при этом влияние всевозможных факторов, с последующим определением коэффициента трения, значительное упрощение конструкции в сравнении с аналогами и повышение мощностей и нагрузок, реализуемых устройством [10].

Необходимый результат достигается за счет использования стенда для исследования параметров тормозного прижатия колодки к колесу, который содержит механизм создания трения между двумя расположенными друг над другом элементами. Нижний элемент приводят во вращение двигателем, а верхний элемент подвергают прижатию к нижнему элементу. Отличается предлагаемое устройство тем, что содержит следующие узлы:

узел вращения колесной пары, включающий в себя асинхронный привод, который через муфту электродвигателя, соединенную с коробкой передач, взаимодействует с многоскоростным редуктором и приводит во вращение колесную пару, установленную на специальных стойках;

узел прижатия тормозных колодок, в котором под действием веса переменного груза через систему блоков, закрепленных на стойке, приводят в действие башмаки с тормозными колодками, установленные на специальных рычагах, тем самым осуществляя регулируемое тормозное прижатие;

узел охлаждения зоны контакта при помощи системы обдува, при этом параметры контролируются электроизмерительными и теплоизмерительными устройствами в ходе чего осуществляются их автоматизированное снятие и контроль блоком фиксации и контроля.

Стенд является максимально возможным приближением к реальной системе «колесная пара – колодка» в ходе ее эксплуатации (рисунок 10). Вибрационный фон в ходе проведения эксперимента является естественным и не учитывается в ходе опытных испытаний по аналогии с применяющейся на железнодорожном транспорте методикой.



Рисунок 10 – Внешний вид стенда для исследования параметров тормозного нажатия колодки на колесо

Предварительный порядок работы устройства по проведению эксперимента:

- 1) в башмаки устанавливаются предлагаемые к испытанию сменные тормозные колодки;
- 2) при помощи асинхронного привода, установленного на специальном постаменте, задается скорость вращения колесной пары, которая находится на специальной стойке. Вращение колесной пары осуществляется через муфту электродвигателя, коробку передач и многоступенчатый редуктор;
- 3) производятся замер и фиксация параметров асинхронного электродвигателя, осуществляющего вращение колесной пары. Замеры производятся посредством стандартного электротехнического измерительного оборудования по типу амперметра, вольтметра и др.;
- 4) в ходе вращения колесной пары производится имитация двухстороннего тормозного нажатия колодки на колесо посредством рычагов, установленных на специальных стойках. Рычаги приводятся в действие благодаря натяжению троса, который через систему подвижных блоков соединен с грузами, установленными на специальных опорных дисках;
- 5) производятся повторный замер и фиксация параметров при осуществлении тормозного нажатия. В ходе осуществления нажатия дополнительно используются пирометры для фиксации температурных явлений в зоне контакта между колесом и колодкой;
- 6) увеличивая либо уменьшая количество грузов на опорных дисках, производят соответственно увеличение или уменьшение силы тормозного нажатия;
- 7) выполняются повторный замер и фиксация параметров с учетом изменившейся силы нажатия;
- 8) при помощи асинхронного привода и коробки передач меняют скорость вращения колесной пары до необходимой величины;
- 9) производятся очередной замер и фиксация параметров с учетом не только изменившейся силы нажатия, но и скорости вращения колесной пары;
- 10) после выполнения программы эксперимента и выключения оборудования производим замену испытуемых колодок на другие, отличающиеся по свойствам материала, степени износа и геометрическим параметрам, после чего повторно проводят эксперимент;

11) после фиксации и обработки данных, полученных в ходе экспериментов, а также выполнения математических расчетов согласно предлагаемой формуле производят корреляцию полученных зависимостей. Следствием выполнения расчетов и корреляции обработанных данных будет являться наглядное и полное представление коэффициента трения как в графической, так и в аналитической (цифровой) форме.

На основании изложенного сделаем вывод о том, что данная статья является отправной точкой в долгосрочном исследовании, конечной целью которого является оптимизация трибологических процессов в контактной паре «колодка – колесо» железнодорожного подвижного состава, в частности, разработка системы адаптивного управления тормозным нажатием поездов с учетом изменения динамики коэффициента трения в режиме реального времени. В статье рассмотрены применяемые способы определения коэффициента трения, в ходе анализа выявлены недостатки. На основе выполненного анализа авторами разработана и предложена методика определения коэффициента трения, позволяющая устранить выявленные недостатки существующих методов. Для реализации нового метода авторами был разработан и сконструирован испытательный стенд, представленный в статье.

Совокупное использование метода и устройства по его реализации отличается простотой, что является предпосылкой к широкому использованию в научно-исследовательской отрасли. Результаты исследований станут основой для поиска оптимальных решений и алгоритмов по обеспечению наибольшей эффективности тормозного нажатия с учетом совокупности различных параметров и их изменения во времени в процессе торможения. Данная методика будет скорректирована учеными-исследователями в ходе проведения экспериментов, опытных испытаний с учетом ряда факторов, непосредственно влияющих на характер изменения коэффициента трения.

Использование инновационных методов и устройств в изучении фундаментальных научных вопросов контактного взаимодействия тел позволит сделать значительный шаг в направлении получения новых научных знаний в этой отрасли, а также на их основе формировать конкретные технические решения, касающиеся, в частности, повышения надежности, экономичности и эффективности использования тормозных систем на железнодорожном транспорте.

Список литературы

1. Мартыненко, Л. В. Оценка динамических параметров, возникающих в колесных парах тележки грузового вагона при прохождении кривых участков пути / Л. В. Мартыненко, Д. О. Емельянов. – Текст : непосредственный // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 1 (11). – С. 65–71.
2. Дульский, Е. Ю. Существующие способы управления тормозным нажатием пассажирского подвижного состава / Е. Ю. Дульский, А. А. Корсун, Д. О. Емельянов. – Текст : непосредственный // Научные междисциплинарные исследования: сборник статей междунар. науч.-практ. конф. – Москва : КДУ, Добросвет, 2021. – С. 20–27.
3. Иванов, П. Ю. Существующие способы управления тормозным нажатием с повышенной эффективностью / П. Ю. Иванов, А. А. Корсун, Д. О. Емельянов. – Текст : непосредственный // Научные междисциплинарные исследования : сборник статей междунар. науч.-практ. конф. – Москва : КДУ, Добросвет, 2021. – С. 28–36.
4. Емельянов, Д. О. Анализ развития дефектов на поверхности катания грузовых вагонов в пути следования от места погрузки до места выгрузки / Д. О. Емельянов, Л. В. Мартыненко. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 67–75.
5. Математическая модель работы тормозной системы поезда в процессе торможения с учетом динамики коэффициента трения колодки о колесо и сцепления с рельсом в компьютерной среде / А. А. Корсун, П. Ю. Иванов, С. П. Круглов [и др.]. – Текст : непосредственный //

Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 104–113.

6. Анализ влияния человеческого фактора на безотказную работу тормозного оборудования поездов / Н. И. Мануилов, П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский. – Текст : непосредственный // Наука вчера, сегодня, завтра. – 2016. – № 12-2 (34). – С. 48–57.

7. Заявка на изобретение № 2022111793 Российская Федерация от 27.04.22 г. Способ определения коэффициента трения трибологической пары по потребляемой электрической мощности электропривода / Дульский Е. Ю., Емельянов Д. О., Иванов П. Ю. и др.; заявитель ФГБОУ ВО ИРГУПС. – Текст : непосредственный.

8. Иванов, П. Ю. Причины самопроизвольного срабатывания автотормозов в грузовых поездах / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 2 (30). – С. 17–25.

9. Мануилов, Н. И. Моделирование работы резиновых уплотнений тормозной сети подвижного состава в условиях низких температур / Н. И. Мануилов, П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 3 (55). – С. 112–119.

10. Заявка на изобретение № 2022118561 Российская Федерация от 06.07.22 г. Стенд для исследования параметров тормозного прижатия колодки к колесу / Дульский Е. Ю., Емельянов Д. О., Иванов П. Ю. и др.; заявитель ФГБОУ ВО ИРГУПС. – Текст : непосредственный.

11. Старостин, С. С. Новые подходы к проектированию инновационных тормозных систем грузовых вагонов / С. С. Старостин, Е. С. Сипягин. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 3 (52). – С. 36–39.

12. Карвацкий, Б. Л. Общая теория автотормозов : учебное пособие / Б. Л. Карвацкий. – Москва : Трансжелдориздат, 1947. – 300 с. – Текст : непосредственный.

13. Журавлев, В. Ф. К истории закона сухого трения / В. Ф. Журавлев. – Текст : непосредственный // Доклады академии наук. – 2010. – Т. 433. – № 1. – С. 46–47.

References

1. Martynenko L.V., Emel'ianov D.O. Evaluation of dynamic parameters arising in the wheel pairs of a freight car trolley during the passage of curved sections of the track. *Molodaia nauka Sibiri – Young Science of Siberia*, 2021, no. 1(11), pp. 65-71 (In Russian).

2. Dul'skii E.Iu., Korsun A.A., Emel'ianov D.O. [Existing methods of controlling the braking pressure of passenger rolling stock]. *Nauchnye mezhdistsiplinarnye issledovaniia: sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Scientific interdisciplinary research: collection of articles of the international scientific and practical conference]. Moscow, 2021, pp. 20-27 (In Russian).

3. Ivanov P.Iu., Korsun A.A., Emel'ianov D.O. [Existing methods of brake pressure control with increased efficiency]. *Nauchnye mezhdistsiplinarnye issledovaniia: sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Scientific interdisciplinary research: collection of articles of the international scientific and practical conference]. Moscow, 2021, pp. 28-36 (In Russian).

4. Semenov A.P., Lakin I.K., Khromov I.Iu. Information entropy of locomotive technical diagnostics systems. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2020, no. 3(67), pp. 42-53 (In Russian).

5. Korsun A.A., Ivanov P.Iu., Kruglov S.P. and others. A mathematical model of the operation of the train's braking system during braking, taking into account the dynamics of the friction coefficient of the pad on the wheel and the coupling with the rail in a computer environment. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – Bulletin of the Rostov State University of Railways*, 2022, no. 2(86), pp. 104-113 (In Russian).

6. Manuilov N.I., Ivanov P.Iu., Dul'skii E.Iu. Analysis of the influence of the human factor on the trouble-free operation of train braking equipment. *Nauka vchera, segodnia, zavtra – Science yesterday, today, tomorrow*, 2016, no. 12-2(34), pp. 48-57 (In Russian).

7. Dul'skii E.Iu., Emel'ianov D.O., Ivanov P.Iu. and others. *Application for invention No. 2022111793*, 27.04.2022.

8. Ivanov P.Iu., Manuilov N.I., Dul'skii E.Iu. The reasons of spontaneous operation of autobrakes in freight trains. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 2(30), pp. 17-25 (In Russian).

9. Manuilov N.I., Ivanov P.Iu., Dul'skii E.Iu. Simulation of the operation of rubber seals of the rolling stock brake network at low temperatures. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2017, no. 3(55), pp. 112-119 (In Russian).

10. Dul'skii E.Iu., Emel'ianov D.O., Ivanov P.Iu. and others. *Application for invention No. 2022118561*, 06.07.2022.

11. Starostin S.S., Sipiagin E.S. New approaches to the design of innovative braking systems of freight cars. *Transport Rossiiskoi Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2014, no. 3(52), pp. 36-39 (In Russian).

12. Karvatskii B.L. *Obshchaia teoriia avtotormozov: uchebnoe posobie* [General theory of auto brakes: textbook]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1947, 300 p. (In Russian).

13. Zhuravlev V.F. On the history of the Law of dry friction. *Doklady akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 2010, vol. 433, no. 1, pp. 46-47 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Емельянов Денис Олегович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ИрГУПС.

Тел.: 8-950-051-56-53.

E-mail: emelyanovdenis1995@mail.ru

Иванов Павел Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-950-065-21-77.

E-mail: p_ivanov@ssdigit.ru

Дульский Евгений Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

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

ГАУ ДО ИО «Центр развития дополнительного образования детей». Детский технопарк «Кванториум Байкал»

Сергеева ул., д. 5/6, г. Иркутск, 664043, Российская Федерация.

Педагог дополнительного образования.

Тел.: 8-983-403-46-43.

E-mail: e_dulskiy@ssdigit.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Emelyanov Denis Olegovich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Railcars and wagon facilities», IrGUPS.

Phone: 8-950-051-56-53.

E-mail: emelyanovdenis1995@mail.ru

Ivanov Pavel Yuryevich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Docent, associate professor of the department «Electric rolling stock».

Phone: 8-950-065-21-77.

E-mail: p_ivanov@ssdigit.ru

Dulsky Evgeny Yuryevich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Docent, associate professor of the department «Railcars and wagon facilities», IrGUPS.

GAU DO IO «Center for the development of additional Education of children» Children's Technopark «Quantum Baikal»

Sergeeva str., 5/6, Irkutsk, 664043, the Russian Federation.

Teacher of additional education.

Phone: 8-983-403-46-43.

E-mail: e_dulskiy@ssdigit.ru

Емельянов, Д. О. Инновационная методика определения коэффициента трения в системе «колодка – колесо» / Д. О. Емельянов, П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 99 – 112.

Emelyanov D.O., Ivanov P.Yu., Dulsky E.Yu. Innovative method of determining the coefficient of friction in the «pad – wheel» system. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 3 (51), pp. 99-112 (In Russian).

УДК 21. 332. 015: 629. 423. 1

С. И. Макашева¹, П. С. Пинчуков¹, О. В. Мельниченко²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
г. Хабаровск, Российская Федерация;

²Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПРИ РАБОТЕ ЭЛЕКТРОВОЗОВ С ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НА БАЗЕ ТИРИСТОРОВ И IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ

Аннотация. Статья посвящена исследованию эффективности применения новых выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока с коллекторным тяговым приводом. Рассмотрены аспекты организации тягеловесного движения по электрифицированным железным дорогам Сибири и Дальнего Востока России с учетом обеспечения пропускной и провозной способности. Отмечается, что задача обеспечения пропускной и провозной способности электрифицированных участков железных дорог по устройствам электроснабжения в значительной мере зависит от величины напряжения в контактной сети.

Предметами исследования являются параметры системы тягового электроснабжения 25 кВ, 50 Гц при работе электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе тиристорных и IGBT-транзисторов. Для сравнительной оценки эффективности применения электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе IGBT-транзисторов относительно параметров существующих электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе тиристорных выполняется количественная оценка уровня напряжения, токов и потерь напряжения в тяговой сети переменного тока. Произведен анализ осциллограмм кривых тока и напряжения тиристорного и IGBT-транзисторного выпрямительно-инверторных преобразователей.

Для сравнительной оценки предложено использовать коэффициент подобия кривых тока электровозов с различными типами выпрямительно-инверторных преобразователей, рассчитанный методом эквивалентной синусоиды. Построение векторных диаграмм токов и напряжений в контрольных точках системы тягового электроснабжения переменного тока выполнялось при помощи графоаналитического метода, в результате рассчитаны напряжения и потери напряжения в контрольных точках тяговой сети. Численно доказывалось, что электровозы с новыми выпрямительно-инверторными преобразователями на базе IGBT-транзисторов имеют в три раза меньшие суммарные потери напряжения в тяговой сети по сравнению с аналогичными показателями работы тиристорного преобразователя.

Ключевые слова: выпрямительно-инверторный преобразователь, электровоз, IGBT-транзистор, коэффициент мощности, потери напряжения.

Svetlana I. Makasheva¹, Pavel S. Pinchukov¹, Oleg V. Mel'nichenko²

¹Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation;

²Irkutsk State Transport University (IrSTU), Irkutsk, the Russian Federation

ASSESSMENT OF VOLTAGE LOSSES IN THE AC TRACTION NETWORK FOR TWO DIFFERENT TYPES OF THE LOCOMOTIVE'S RECTIFIER-INVERTER CONVERTERS: ON THYRISTORS OR IGBT-TRANSISTORS

Abstract. The paper deals with benefits of a new rectifier-inverter converter of an electric locomotive based on IGBT-transistors. Main directions of heavy haul traffic's development are considered for Siberia and Russian Far East electrified railways. Throughput and carrying capacity of power supply devices extremely depends on the voltage level in the catenary network of electrified sections of railways.

Objects of our research are electric parameters of the 25 kV, 50 Hz AC traction power supply system. Operation parameters of two different types of the electric locomotive's rectifier-inverter converters are calculated and discussed. We investigated operation parameters for thyristor-based and IGBT-transistors-based rectifier-inverter converter.

Current and voltage curves for the thyristor and the transistor type of the rectifier-inverter converter are given and discussed. Similarity factor of current curves for electric locomotives was calculated by equivalent sinusoid's method. Quantitative assessment of the voltage level, currents and voltage losses in the AC catenary network is given. The graph-analytical method was used for constructing currents and voltages vector diagrams. It is proved that electric locomotives with a new rectifier-inverter conversion based on IGBT transistors provides a reducing of the total voltage losses in three times in the traction network comparing the thyristor conversion's operation.

Keywords: rectifier-inverter converter, AC electric locomotive, IGBT- transistor, power factor, voltage losses.

По данным ОАО «РЖД» погрузка на сети железных дорог по итогам 2021 г. составила 1282,9 млн т, что на 3,2 % больше, чем годом ранее [1]. Объемы контейнерных перевозок ОАО «РЖД» во всех видах сообщения увеличились и составили по итогам 2021 г. более 6,5 млн груженых и порожних контейнеров в двадцатифутовом эквиваленте (TEU – от англ. *twenty-foot equivalent*), что на 12,1 % больше, чем за 2020 г., причем за последние пять лет произошло двукратное увеличение объемов перевозок [2]. В условиях роста интенсивности перевозок на полигоне железных дорог Сибири и Дальнего Востока особую актуальность приобретают аспекты обеспечения пропускной способности электрифицированных участков железных дорог, заявленной в ключевых документах ОАО «РЖД» в соответствии с Постановлениями Правительства Российской Федерации и Указами Президента [3 – 5].

Транспортировка грузов тяжеловесными поездами по электрифицированным железным дорогам обеспечивает экономически эффективную доставку руды, угля и других сыпучих материалов с мест их добычи до пунктов переработки и районов потребления, но существенно повышает нагрузку на элементы системы электроснабжения – питающие тяговые подстанции, контактную сеть, систему электроснабжения нетяговых потребителей и электроподвижной состав (ЭПС), значительно усложняя условия их функционирования [6 – 8].

Пропускная и провозная способность электрифицированных участков железных дорог в значительной мере зависит от величины напряжения в контактной сети. Уровень напряжения на токоприемнике ЭПС определяет скорость и время хода состава по участку, напрямую влияя на исполнение предписанного графика движения поездов [6, 7]. Снижение напряжения на токоприемнике ЭПС приводит к ухудшению условий охлаждения тяговых двигателей и всего его силового электрооборудования за счет уменьшения частоты вращения вентиляторов. Увеличение времени хода на подъеме в условиях менее эффективной вентиляции тяговых двигателей вызывает их перегрев и приводит к их отказам [8, 9]. Таким образом, количественная оценка уровня напряжения в контактной сети позволяет оценить пропускную способность электрифицированных участков железных дорог и является актуальной инженерной и научной проблемой.

За более чем 70-летнюю историю работы на электрифицированных участках железных дорог переменного тока напряжением 25 кВ выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИПы) отечественных магистральных электровозов прошли большой путь от ртутных выпрямительных установок в 1939 г. до замены элементной базы ВИПов на силовые диоды в 1970-х гг., а затем и на тиристоры в 1980-х гг. [9]. Следующим шагом в развитии силовой электроники являются транзисторы, которые находят все более широкое применение в различных отраслях народного хозяйства, в том числе и на транспорте [10]. Тем не менее у современного отечественного электровоза для тяжеловесного движения серии ЗЭС5К «Ермак» ВИП аналогичен предыдущим модификациям магистральных ЭПС (ВЛ80Р, ВЛ85 и др.) и изготавливается в тиристорном исполнении [11]. Общей проблемой тиристорных ВИПов является относительно низкий коэффициент мощности на всех зонах регулирования, вызывающий значительные потери напряжения в контактной сети, приводящий к снижению уровня напряжения, что значительно лимитирует пропускную способность системы тягового электроснабжения участков железных дорог [6, 9, 12].

В системе тягового электроснабжения решение задачи повышения напряжения в контактной сети достигается различными способами, основными из которых являются регулирование под нагрузкой напряжения тяговых трансформаторов, применение компенсирующих устройств различной конструкции, многопроводных систем электроснабжения, установка

подпитывающих подстанций и вольтодобавочных устройств и т. д. [7, 8, 13]. Все перечисленные технические мероприятия по повышению уровня напряжения с применением специальных устройств требуют значительных капитальных вложений и дополнительных затрат на их обслуживание и содержание.

Вместе с тем существует и другой путь решения проблемы повышения пропускной способности электрифицированных железных дорог, который позволяет в полной мере использовать имеющуюся систему тягового электроснабжения 25 кВ с минимальным ее усилением – применение электроподвижного состава с ВИПами на базе IGBT-транзисторов. Причем в расчете технико-экономической эффективности необходимо учесть, что ВИП на базе IGBT-транзисторов при серийном изготовлении будет вдвое дороже, чем штатный ВИП на тиристорах. В странах Западной Европы применение транзисторов на ЭПС успешно ведется уже более 30 лет для асинхронного тягового привода [13, 14]. Для отечественного электровозостроения это направление все еще находится в стадии проектных разработок. Тем не менее коллективом ученых Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) разработан и испытан ВИП для коллекторного тягового привода на основе IGBT-транзисторов, а также созданы алгоритмы его управления для режимов тяги и рекуперативного торможения [12, 15, 16]. В этой связи актуальность и практическую значимость представляет оценка степени влияния на уровень напряжения в контактной сети переменного тока хорошо известного (тиристорного) и нового (транзисторного) ВИПа ЭПС, что и является целью проводимого исследования.

Оценка уровня напряжения в контактной сети переменного тока 25 кВ, 50 Гц выполняется для двух вариантов исполнения ВИПа ЭПС:

- 1) на базе тиристорных (тиристорный ВИП);
- 2) на базе IGBT-транзисторов (транзисторный ВИП).

Расчет распределения токов по участкам контактной сети и напряжения в контрольных точках (узлах) системы тягового электроснабжения производится по правилам Кирхгофа. Для определения токов и напряжений применяются первый закон Кирхгофа и закон Ома [7, 8, 17 – 19]. Построение векторных диаграмм токов и напряжений в контрольных точках системы выполняется графоаналитическим способом. Метод эквивалентных синусоид применен для определения коэффициентов подобия кривых тока электровозов с ВИПами, выполненными на различной элементной базе [7, 8, 17 – 19].

В электрических сетях расчет напряжения в линии (в нашем случае – в контактной сети переменного тока) при известном токе нагрузки производят по величинам токов, протекающих по участкам линии. При этом значения напряжений в отдельных точках линии находят последовательно от конца линии к ее началу или от начала линии к ее концу [7, 8, 17 – 19].

Рассмотрим на рисунке 1, а простейшую схему замещения участка тяговой сети (ТС) и нагрузки, которой является электровоз, при одностороннем питании от тяговой подстанции (ТП). Векторная диаграмма токов и напряжений в различных точках ТС представлена на рисунке 1, б.

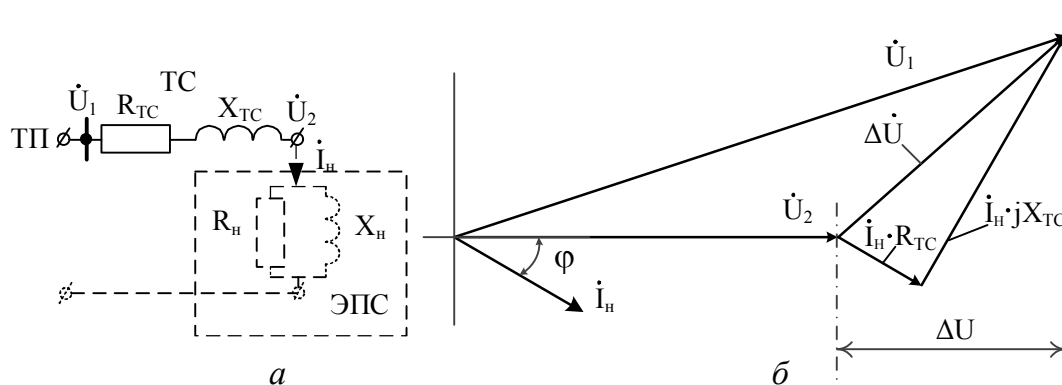


Рисунок 1 – К расчету потерь и падения напряжения в тяговой сети:
расчетная схема замещения (а) и векторная диаграмма токов и напряжений ТС (б)

Полное сопротивление участка ТС, приведенного на рисунке 1, а, можно записать в комплексном виде как $\dot{Z}_{ТС} = R_{ТС} + jX_{ТС}$. Электровоз с током нагрузки $\dot{I}_н$ получает питание от одной ТП. Потребляемый электровозом ток протекает по активному $R_н$ и реактивному $X_н$ сопротивлениям нагрузки соответственно, которые показаны на рисунке 1 штриховыми линиями. Как показано на векторной диаграмме на рисунке 1, б, ток нагрузки $\dot{I}_н$ сдвинут относительно напряжения нагрузки $\dot{U}_2$ на некоторый угол φ . На шинах ТП в начале участка действует напряжение $\dot{U}_1$, а в точке нахождения нагрузки (в конце участка ТС) – напряжение $\dot{U}_2$. Ток нагрузки $\dot{I}_н$ протекает по реактивному и активному составляющим сопротивления тяговой сети $R_{ТС}$ и $X_{ТС}$ и вызывает на них падение и потерю напряжений.

В соответствии с законом Ома для участка цепи напряжение в начале участка $\dot{U}_1$, В, запишется так:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta\dot{U}. \quad (1)$$

Между напряжениями в начале линии $\dot{U}_1$ и в ее конце $\dot{U}_2$ существует некоторая разность напряжений как по величине, так и по углу сдвига фаз. Разность комплексных действующих значений напряжений в начале и в конце участка называется падением напряжения $\Delta\dot{U}$, В, и определяется выражением [18]:

$$\Delta\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2. \quad (2)$$

Заменив комплексную запись величин тока $\dot{I}_н$ и сопротивления $\dot{Z}_{ТС}$ на их действительные и мнимые составляющие, получим выражение для определения падения напряжения $\Delta\dot{U}$, В, в виде:

$$\Delta\dot{U} = (I_{на} - jI_{нр})(R_{ТС} + jX_{ТС}) = I_{на} \cdot R_{ТС} + I_{нр} \cdot X_{ТС} + j(I_{на}X_{ТС} - I_{нр}R_{ТС}), \quad (3)$$

где $I_{на}$ и $I_{нр}$ – активная и реактивная составляющие тока нагрузки, А, соответственно.

Активная и реактивная составляющие тока нагрузки могут быть рассчитаны при известном угле сдвига фаз тока, потребляемого нагрузкой, относительно напряжения, приложенного к нагрузке, φ , эл. град., по известным из электротехники выражениям [17]:

$$I_{на} = I_н \cdot \cos \varphi, \quad I_{нр} = I_н \cdot \sin \varphi, \quad (4)$$

где $I_н$ – действующее (эффективное) значение тока нагрузки, А.

Потеря напряжения ΔU , В, есть проекция вектора падения напряжения $\Delta\dot{U}$ на горизонтальную ось, как показано на векторной диаграмме рисунка 1, б.

Потеря напряжения ΔU , В, для схемы на рисунке 1, а может быть записана так [19]:

$$\Delta U = I_н \cdot R_{ТС} \cdot \cos \varphi + I_н \cdot X_{ТС} \cdot \sin \varphi. \quad (5)$$

Таким образом, падение напряжения – это геометрическая (векторная) разность между напряжениями на шинах тяговой подстанции и в точке нахождения нагрузки (в нашем случае – на токоприемнике ЭПС). Потеря напряжения – это арифметическая разность между напряжениями у питающей подстанции и в точке нахождения нагрузки.

Как показано в работах [7, 8], уровень напряжения для потребителя (выпрямленное напряжение на клеммах преобразователя электровоза) определяется именно потерей напряжения, поэтому необходимо оценить ее при прочих равных условиях для двух разных ВИПов ЭПС (на базе тиристоров и IGBT-транзисторов).

В качестве расчетной схемы рассмотрим схему наиболее тяжелого режима работы для системы тягового электроснабжения режима – одностороннее питание межподстанционной зоны при отключении одной из смежных ТП [20]. На рисунке 2 приведена схема питания двух нагрузок (ЭПС 1 и ЭПС 2) от ТП А. Вторая подстанция ТП Б отключена, ее высоковольтный выключатель обозначен на рисунке 2 перечеркнутым квадратом.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Расположим на межподстанционной зоне от ТП А до ТП Б два ЭПС в режиме тяги с одинаковыми тяговыми токами $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$. Расстояние в километрах от питающей ТП А до первого ЭПС 1 обозначим как l_1 , а расстояние между электровазонами – l_2 . Удаление первого ЭПС от шин питающей ТП А на расстояние l_1 соответствует середине межподстанционной зоны, а удаление второго ЭПС на расстояние l_2 от ЭПС1 – концу зоны. Углы сдвига фаз каждого тока ЭПС относительного напряжения на токоприемнике ЭПС примем равными между собой: $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, эл. град.

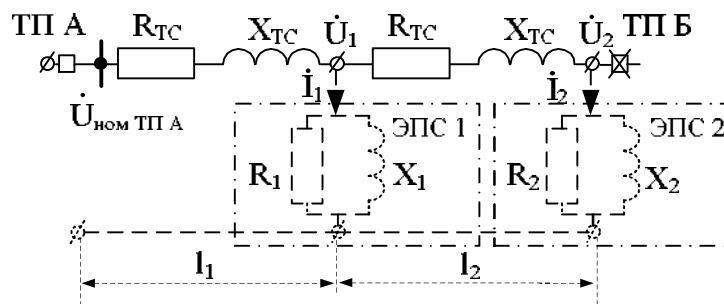


Рисунок 2 – Расчетная схема тяговой сети с двумя ЭПС

Чтобы определить уровни напряжения $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ в точках нахождения каждого ЭПС, в расчет необходимо задать следующие параметры:

- 1) действующее значение тягового тока каждого ЭПС, $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$, А, потребляемого электро-возом из контактной сети;
- 2) угол φ сдвига фаз между питающим напряжением в точке нахождения каждого электровоза и током, который он потребляет (например, для первого ЭПС – это угол между напряжением $\dot{U}_1$ и током $\dot{I}_1$).

Для проводимого исследования необходимо знать величины токов нагрузок и углов сдвига фаз φ , которые играют существенную роль в расчете величин падения и потерь напряжений. Поэтому определим численные значения токов ЭПС и их углов сдвига фаз. Для решения этой задачи применим графоаналитический метод анализа реальных осциллограмм тока сети и напряжения ВИПов на базе тиристоров и транзисторов.

На рисунке 3 приведены осциллограммы кривых тока и напряжения на токоприемнике рассматриваемых электровозов, полученные при одинаковых нагрузочных условиях и параметрах тяги [12, 21].

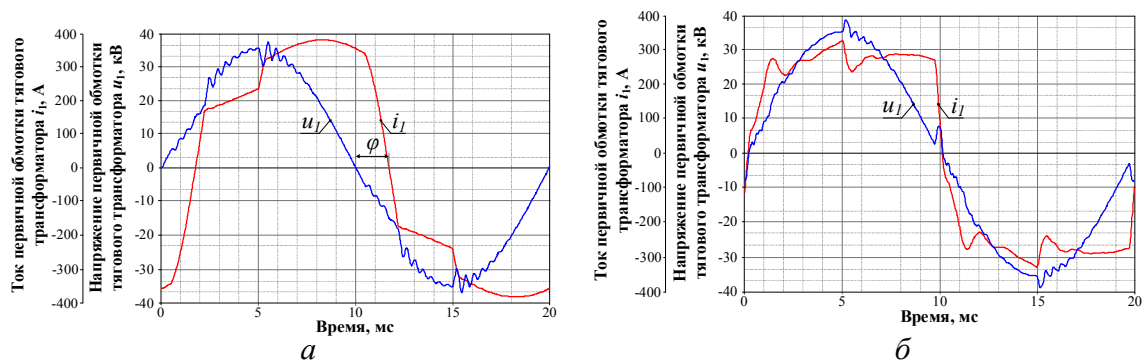


Рисунок 3 – Осциллограммы кривых напряжения (u_1) и тока (i_1) в первичной обмотке тягового трансформатора электроваза при работе ВИПов на базе тиристоров (а) и IGBT-транзисторов (б) на 4-й зоне регулирования

Из рисунке 3 графоаналитическим методом определим угол сдвига фаз φ между кривыми тока и напряжения сети:

- для тиристорного ВИПа ЭПС из рисунка 3, *а* угол $\varphi_{\text{тир}} = 30$ эл. град.;
- для транзисторного ВИПа ЭПС из рисунка 3, *б* угол $\varphi_{IGBT} = 0$ эл. град.

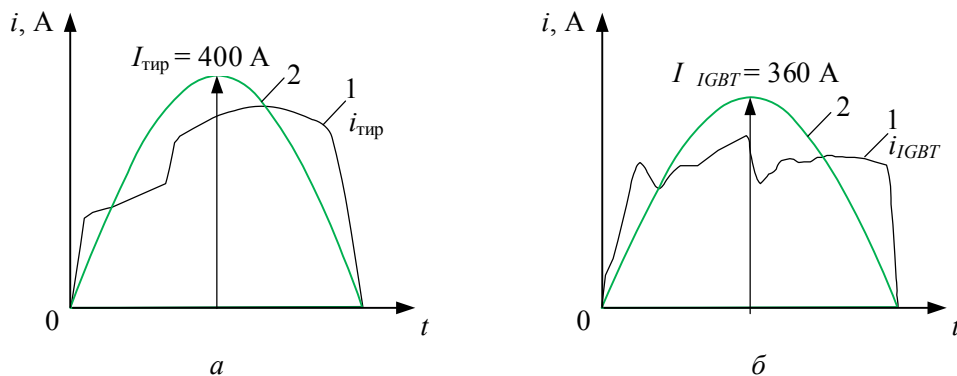
Из рисунка 3 следует, что площади фигур, ограниченных кривыми тока ЭПС тиристорного (см. рисунок 3, *а*) и транзисторного (см. рисунок 3, *б*) ВИПов, существенно различаются. Методом эквивалентных синусоид [22] определим действующее (эффективное) значение тока для ВИПов ЭПС на базе транзисторов и на базе тиристоров. Общеизвестно, что действующее значение I , A , переменного тока i равно величине такого же постоянного тока, который за время, равное периоду T переменного тока i , произведет такую же работу (тепловую или электродинамическую), что и рассматриваемый переменный ток i . Действующее значение тока I , A , можно записать так:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (6)$$

Из анализа рисунка 3 и формулы (6) очевидно, что площадь фигуры на рисунке 3, *а*, ограниченная кривой тока тиристорного ВИПа ЭПС, в K раз больше, чем площадь фигуры, ограниченной кривой тока транзисторного ВИПа ЭПС на рисунке 3, *б*. Таким образом, отношение действующих значений токов тиристорного и транзисторного ВИПов ЭПС будет таким же, что и отношение площадей фигур, ограниченных кривыми тока этих ЭПС на рисунке 3. Иначе говоря, можно выразить соотношения площадей и токов через некий коэффициент подобия K по выражению:

$$K = I_{\text{тир}}/I_{IGBT} = S_{i_{\text{тир}}}/S_{i_{IGBT}}. \quad (7)$$

Вычислив графоаналитическим способом коэффициент K , можно выразить действующие значение тока тиристорного ЭПС через действующее значение тока транзисторного как $I_{\text{тир}} = K \cdot I_{IGBT}$. Результаты определения действующих значений тока тиристорного $I_{\text{тир}}$ и транзисторного I_{IGBT} ВИПов ЭПС из осциллограмм, изображенных на рисунке 3, методом эквивалентных синусоид приведены на рисунке 4.



1 – реальная осциллограмма тока; 2 – эквивалентная синусоида тока

Рисунок 4 – Замена реальных осциллограмм кривых тока эквивалентными синусоидами для тиристорного ВИПа ЭПС (*а*) и транзисторного ВИПа ЭПС на базе IGBT-транзисторов (*б*)

Рассчитаем коэффициент K по формуле (7) и рисунку 4:

$$K = I_{\text{тир}}/I_{IGBT} = 400/360 = 1,11.$$

Таким образом, численно определили, что при одинаковых нагрузочных условиях потребление тока ЭПС на тиристорах будет в 1,11 раза больше, чем для ЭПС с ВИПом на IGBT-транзисторах.

Перейдем к расчету напряжений в тяговой сети переменного тока при наличии ЭПС с ВИПами на различной базе. Положим в расчет действующее значение тока тиристорного ВИПа ЭПС из рисунка 4, *а* $I_{\text{тир}} = 400$ A . Для транзисторного ВИПа ЭПС из рисунка 4, *б*

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$I_{IGBT} = 360$ А. На рисунке 5 представим результаты построения векторных диаграмм токов и напряжений для ВИПа ЭПС на базе тиристоров (рисунок 5, а) и транзисторов (рисунок 5, б).

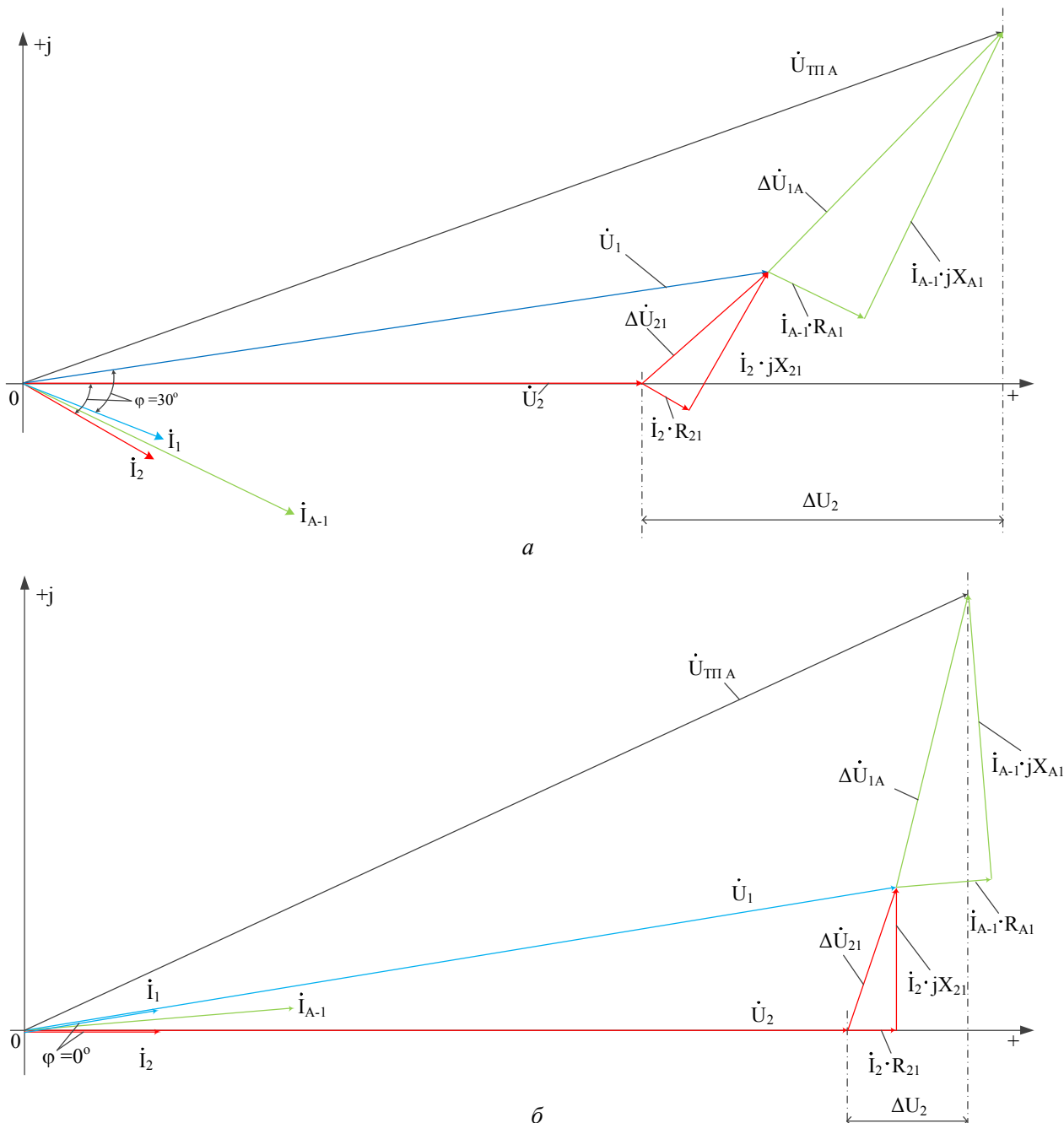


Рисунок 5 – Векторные диаграммы токов и напряжений для тиристорного ВИПа ЭПС (а) и для ВИПа ЭПС на IGBT-транзисторах (б)

Построение векторных диаграмм будем проводить для схемы, соответствующей рисунку 2 от конца электрической сети к ее началу, т. е. от точки сети, наиболее удаленной от шин подстанции (токоприемник электровоза ЭПС 2 на рисунке 2), до питающей ТП А. Напряжение на шинах питающей ТП А примем равным номинальному напряжению холостого хода подстанции при номинальном напряжении на ее вводах $\dot{U}_{ном\ ТП\ А} = 27500 + j0$ В. В расчет положим марку подвески контактной сети и рельса, которые в настоящее время применены на грузонапряженных участках железных дорог переменного тока Дальнего Востока РФ [6, 23]: контактная подвеска марки ПБСМ-95+МФ-100, марка рельса Р65. Погонное сопротивление тяговой сети в этом случае согласно работам [7, 8] будет равно $\dot{Z}_{0\ TC} = 0,141 + j0,421 =$

$= 0,444e^{+i71,5}$ Ом/км. По участку электрической цепи длиной l_1 от шин подстанции ТП А до первого электровоза ЭПС 1 протекает ток $\dot{I}_{A-1}$, который является суммой токов двух электровозов ЭПС 1 и ЭПС 2: $\dot{I}_{A-1} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$.

Пошаговое объяснение построения дадим для транзисторного ВИПа ЭПС (см. рисунок 5, б). Порядок построения для тиристорного ВИПа ЭПС (рисунок 5, а) будет проводиться аналогичным образом. Вектор напряжения $\dot{U}_2$ в точке нахождения электровоза ЭПС 2 расположим горизонтально. Ток электровоза $\dot{I}_2$ совпадает с напряжением $\dot{U}_2$ этого электровоза, так как ранее из осциллограммы, изображенной на рисунке 3, был определен угол сдвига фазы $\varphi_{IGBT} = 0$ эл. град. К концу вектора $\dot{U}_2$ последовательно прибавляем векторы активной и реактивной составляющих падения напряжения на участке l_2 между ЭПС 1 и ЭПС 2, которые определяются током $\dot{I}_2$, протекающим по этому участку. Геометрическая сумма активной и реактивной составляющих образуют вектор падения напряжения $\Delta\dot{U}_{21}$. Сумма векторов $\dot{U}_2$ и $\Delta\dot{U}_{21}$ формирует вектор напряжения $\dot{U}_1$ на токоприемнике электровоза ЭПС 1.

Последовательно откладывая от конца вектора $\dot{U}_1$ активную и реактивную составляющие падения напряжения на участке между ЭПС 1 и подстанцией ТП А, получаем вектор напряжения $\dot{U}_{ТП А}$ на шинах ТП А. Падение напряжения на участке l_1 от точки нахождения первого электровоза ЭПС 1 до подстанции ТП А формируется током $\dot{I}_{A-1}$, который протекает на этом участке. Вектор тока $\dot{I}_{A-1}$ (см. рисунок 5, б) есть векторная сумма токов электровозов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$.

Вектор $\Delta\dot{U}_{1A}$ есть вектор падения напряжения на участке l_1 от первого электровоза ЭПС 1 до ТП А. В результате суммарное падение напряжения от шин ТП А до токоприемника второго электровоза ЭПС 2 на рисунке 5 показано отрезком $\Delta\dot{U}_{1A} + \Delta\dot{U}_{21}$. Проекция этого отрезка на горизонтальную ось есть искомая потеря напряжения, она обозначена на рисунке 5, б как ΔU_2 . Длина отрезка ΔU_2 и есть искомая величина потери напряжения от шин подстанции ТП А до токоприемника второго электровоза, находящегося в конце межподстанционной зоны.

Анализируя результаты векторного построения для тиристорного и транзисторного ВИПов ЭПС, можно заключить, что длина вектора потери напряжения ΔU_2 для случая работы ВИПа на IGBT-транзисторах значительно меньше, чем для тиристорного ВИПа ЭПС. Для количественной оценки и сравнения потерь напряжения рассматриваемых ВИПов ЭПС (тиристорного и транзисторного) далее произведем расчеты по формулам (1) – (5).

Приведем пример расчета для транзисторного ВИПа ЭПС. Ток каждого ЭПС запишем как $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = 400e^{-i30}$ А. Ток, протекающий по участку l_1 электрической цепи от шин ТП А до ЭПС 1, $\dot{I}_{ТП А-1} = 798e^{-i25,75}$ А.

Согласно классическому расчету распределения токов в электрической сети, приведенному в работах [7 – 8, 15 – 17], при известном значении напряжения на токоприемнике ЭПС 2 $\dot{U}_2$ напряжение $\dot{U}_1$ в точке нахождения ЭПС 1 может быть определено по уравнению:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + (\dot{I}_2 \cdot r_0 \cdot l_2 + \dot{I}_2 \cdot jx_0 \cdot l_2) = \dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_{21}. \quad (8)$$

Напряжение на шинах тяговой подстанции $\dot{U}_{ТП А}$, В, в точке нахождения ЭПС 1 может быть определено по выражению:

$$\dot{U}_{ТП А} = \dot{U}_1 + (\dot{I}_{ТП А-1} \cdot r_0 \cdot l_1 + \dot{I}_{ТП А-1} \cdot jx_0 \cdot l_1) = \dot{U}_1 + \Delta\dot{U}_{1A}. \quad (9)$$

В ряде литературных источников расчет начинают от известной величины $\dot{U}_2$ и далее уже определяют уровень напряжения на шинах питающей подстанции. В нашем случае значения напряжений $\dot{U}_2$ и $\dot{U}_1$ неизвестны, их и надо найти расчетом при известном напряжении на шинах тяговой подстанции ТП А. Поэтому расчет будем производить путем определения падений напряжения на участках l_1 и l_2 , а затем их нужно будет отнять из известной величины напряжения на шинах ТП А. Однако необходимо какой-то из векторов расположить по горизонталь-

ной оси и уже от него производить дальнейшие построения. Примем горизонтальным расположение вектора $\dot{U}_2$, значение длины которого пока не известно, но направление будет уже обозначено. Таким образом, падение напряжения $\Delta\dot{U}_{21}$ на участке l_2 будет определяться по выражению:

$$\Delta\dot{U}_{21} = 400e^{-i30} \cdot 0,141 \cdot 25 + 400e^{-i30} \cdot 0,421 \cdot 25 = 4440e^{i41,5}\text{В}.$$

Следующим шагом определим потерю напряжения на участке l_1 от ЭПС 1 до шин ТП А. На этом участке протекает суммарный ток $\dot{I}_{1-A}$ от двух ЭПС. Поэтому при определении тока $\dot{I}_{1-A}$ нужно знать его угол сдвига фазы относительно вектора напряжения $\dot{U}_1$ на токоприемнике ЭПС 1.

Угол сдвига фазы вектора тока $\dot{I}_2$ относительно напряжения $\dot{U}_2$ известен, поскольку он был ранее задан как 30 эл. град. Вектор напряжения $\dot{U}_2$ расположен на горизонтальной оси. Вектор тока $\dot{I}_2$ отстает от вектора $\dot{U}_2$ (см. рисунок 5, а). Как видно из векторной диаграммы на рисунке 5, вектор $\dot{U}_1$ расположен не горизонтально.

Вектор $\dot{U}_1$ будет опережать вектор $\dot{U}_2$ на некоторый угол, величина которого будет определяться как длиной вектора $\dot{U}_2$, так и длиной и углом поворота вектора $\Delta\dot{U}_{21}$. Но на данном этапе расчета нам не известна длина вектора $\dot{U}_2$, что делает невозможным точное определение угла поворота вектора $\dot{I}_1$ и угла сдвига фазы вектора $\dot{I}_{1-A}$, от которого зависит вектор падения напряжения на участке от ЭПС 1 до шин ТП А. Поэтому необходимо использовать метод итераций, последовательно просчитывая значения $\Delta\dot{U}_{21}$, $\dot{U}_1$, φ_2 , $\dot{I}_{1-A}$, $\Delta\dot{U}_{1A}$, задаваясь значениями $\dot{U}_2$ и изменяя их. Расчет производился до тех пор, пока напряжение $\dot{U}_{ТПА}$ не стало равным 27500 В.

При использовании программного комплекса Mathcad потребовалось минимальное время, а погрешность расчета при этом составила не более 0,004 %. Таким образом, задавшись значением $\dot{U}_2 = 16380e^{+i0}$ В, далее расчетом было определено, что $\dot{U}_1 = 19924e^{+i8,5}\text{В}$. При этом выяснилось, что неизвестный ранее угол между горизонтальной осью и вектором $\dot{U}_1$ равняется 8,5 эл. град., а ток на участке l_1 $\dot{I}_{1-A} = 798e^{-i25,75}\text{А}$.

Падение напряжения на участке l_1 от ЭПС 1 до шин ТП А из формулы (9) будет таким:

$$\Delta\dot{U}_{1A} = 798e^{-i25,75} \cdot 0,141 \cdot 25 + 798e^{-i25,75} \cdot 0,421 \cdot 25 = 4440e^{i41,5}\text{В}.$$

Значение напряжения на шинах ТП А

$$\dot{U}_{ТПА} = \dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_{21} + \Delta\dot{U}_{1A}; \quad (10)$$

$$\dot{U}_{ТПА} = 16380e^{+i0} + 4440e^{i41,5} + 4440e^{i41,5} = 27501e^{i19,7}\text{В}.$$

Использование выражения (5) позволяет определить потери напряжения на участке от шин ТП А до ЭПС 2 как проекции векторов $\Delta\dot{U}_{21}$ и $\Delta\dot{U}_{1A}$ на горизонтальную ось. Таким образом, значение потерь напряжения при токах ЭПС 400 А и их фазовом сдвиге 30 эл. град. $\Delta U_2 = 9550$ В.

Аналогично описанному выше был произведен расчет и для случая использования ВИПа ЭПС на IGBT-транзисторах. Значение потерь напряжения при токе каждого ЭПС $I_{IGBT} = 360$ А и $\varphi_{IGBT} = 0$ эл. град. составило $\Delta U_2 = 3180$ В, что втрое меньше, чем для случая работы ВИПа ЭПС на тиристорах.

Сравнительные диаграммы результатов проведенных расчетов представлены на рисунке 6.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

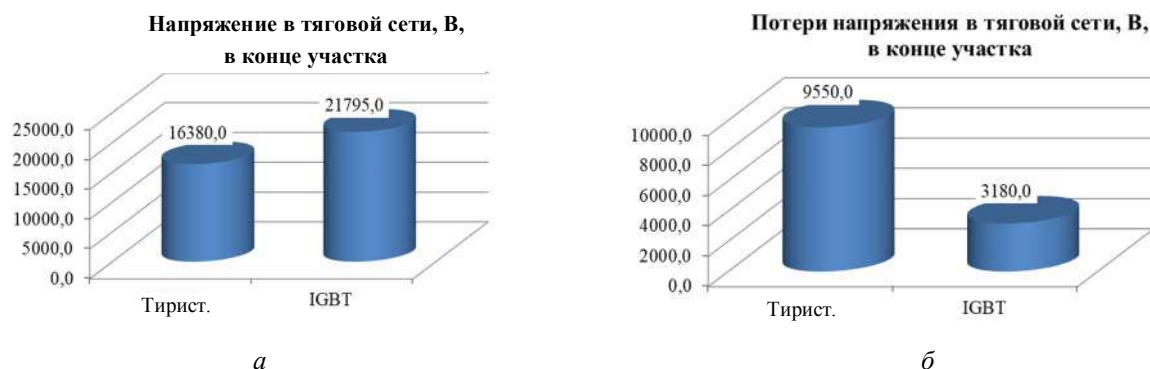


Рисунок 6 – Результаты расчета напряжения (а) и потерь напряжения (б) в тяговой сети

Из анализа рисунка 6 можно заключить, что потери напряжения при применении ВИПа ЭПС на IGBT-транзисторах в три раза меньше, чем при использовании тиристорного ВИПа ЭПС ($3180 < 9550$ В), что доказывает преимущества ВИПа электровозов на IGBT-транзисторах.

Согласно Приложению 4 п. 2 Правил технической эксплуатации железных дорог [24] для обеспечения заданной пропускной и провозной способности электрифицированных участков железных дорог РФ уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава должен быть не менее 21 кВ при переменном токе. В нашем случае требование указанного нормативного документа не выполняется, так как расчетное значение напряжения на токоприемнике электровоза с тиристорным ВИПом составило 16,38 кВ, что меньше требуемых 21 кВ. Как показано на рисунке 6, обозначенному условию соответствует только работа ЭПС в режиме тяги с ВИПом ЭПС на IGBT-транзисторах, при котором расчетное напряжение составило 21,795 кВ, что выше требуемого по Правилам... [24] 21 кВ.

Результаты произведенных исследований показывают неоспоримые преимущества использования новых ВИПов на базе IGBT-транзисторов для коллекторного ЭПС в части улучшения уровня напряжения в тяговой сети переменного тока железнодорожного транспорта и значительного (в три раза) снижения потерь напряжения по сравнению с использованием существующих ВИПов ЭПС на базе тириستоров. Применение новых электровозов с ВИПами на базе IGBT-транзисторов позволяет при аналогичных тяговых усилиях более эффективно осуществлять тяжеловесное движение, чем применение ВИПов на базе тиристоров на существующих электровозах.

Работа выполнена в рамках государственного задания по государственной работе «Проведение прикладных научных исследований» на 2022 г. по теме «Разработка математических моделей электрической части электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения и энергосберегающих алгоритмов управления его преобразователями с применением диодно-транзисторного разрядного плеча» № 121050600025-2 от 06.05.2021.

Список литературы

1. Погрузка РЖД в 2021 году превысила доковидный уровень // [vedomosti.ru](https://vedomosti.ru/business/articles/2022/01/09/903983-pogruzka-rzhd) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/01/09/903983-pogruzka-rzhd> (дата обращения: 02.02.2022).
2. Перевозки контейнеров по сети РЖД превысили 6,5 млн ДФЭ в 2021 году // [company.rzd.ru](https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=269852) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=269852> (дата обращения: 12.01.2022).
3. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года / Утв. Указом Президента Российской Федерации № 204 от 07.05.2018 // Правительство Российской Федерации. – Москва, 2018. – 19 с. – Текст : непосредственный.

4. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года / Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от № 466р 19.03.2019 // Правительство Российской Федерации. – Москва, 2019. – 135 с. – Текст : непосредственный.
5. Белая книга ОАО «РЖД» № 769/р от 17.04.2018 «Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года». – Текст : электронный. – URL: https://www.irgups.ru/sites/default/files/irgups/science/document/strategiya_nauchno-tehnologicheskogo_razvitiya_holdinga_rzhd_na_period_do_2025_goda_i_na_perspektivu_do_2030_goda_belaya_kniga_2018.pdf (дата обращения: 05.10.2021).
6. Пинчуков, П. С. Устройства релейной защиты в условиях тяжеловесного движения / П. С. Пинчуков, С. И. Макашева. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 8. – С. 40–42.
7. Чернов, Ю. А. Электроснабжение железных дорог : учебное пособие / Ю. А. Чернов. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». – 2016. – 406 с. – Текст : непосредственный.
8. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с. – Текст : непосредственный.
9. Борцов, П. И. Подвижной состав и основы тяги поездов / П. И. Борцов. – Москва : Транспорт, 1976. – 342 с. – Текст : непосредственный.
10. Natesan C., Devendiran A., Chozhavendhan S., Thaniga D., Revathi R. IGBT and MOSFET: a Comparative Study of Power Electronics Inverter Topology in Distributed Generation // International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2015], 2015, pp. 1-5.
11. Гужва, С. А. Электрическая схема электровоза типа ЭС5К «Ермак» (цветная схема – на вкладке) / С. А. Гужва. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2022. – № 1 (781). – С. 11–17.
12. Знаенок, В. Н. Выпрямительно-инверторный преобразователь электровоза на базе IGBT-транзисторов как способ повышения пропускной способности участков железной дороги / В. Н. Знаенок, А. О. Линьков, О. В. Мельниченко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 66–75.
13. Герман, Л. А. Повышение пропускной способности железной дороги с установкой компенсации реактивной мощности / Л. А. Герман. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТа). – 2021. – Т. 80. – № 1. – С. 35–44. – DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-35-44>.
14. Steimel A. Power-Electronics Issues of Modern Electric Railway Systems // 10th Intern. Conf. on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania., 2010, pp. 1–8. DOI: <https://dx.doi.org/10.4316/AECE.2010.02001>.
15. Мельниченко, О. В. Разработка нового энергосберегающего алгоритма управления ВИП электровоза на IGBT-модулях / О. В. Мельниченко, Д. А. Яговкин, А. Ю. Портной. – Текст : непосредственный // Вестник института тяги и подвижного состава : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. А. Е. Стецюка и Ю. А. Гамоли. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2013. – Вып. 9. – С. 17–24.
16. Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока / В. С. Томилов, О. В. Мельниченко, С. Г. Шрамко, С. А. Богинский. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 65. – № 1. – С. 172–182. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).172-182.
17. Веников, В. А. Регулирование напряжения в электрических сетях / В. А. Веников, В. И. Идельчик, М. С. Лисеев. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 214 с. – Текст : непосредственный.
18. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. – Москва : Энергоатомиздат. – 1989. – 592 с. – Текст : непосредственный.

19. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Москва : Феникс, 2008. – 720 с. – Текст : непосредственный.
20. Распоряжение ОАО «РЖД» от 25.11.2010 № 2412р «Об утверждении стандарта ОАО «РЖД» «Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых поездов повышенного веса и длины. Технические требования» // consultant.ru: сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=679855#6q2ikoSthIvIXFNJ> (дата обращения: 12.03.2022).
21. Яговкин, Д. А. Совершенствование выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока и принципа его управления в режиме тяги : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Яговкин Дмитрий Андреевич. – Санкт-Петербург, 2016. – 16 с. – Текст : непосредственный.
22. Нейман, В. Ю. Теория электрических цепей : учебное пособие / В. Ю. Нейман, Л. И. Малинин. – Москва : Юрайт, 2020. – 345 с. – Текст : непосредственный.
23. Пинчуков, П. С. Анализ влияния обратного тягового тока на работу рельсовых цепей / П. С. Пинчуков, С. И. Макашева. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 40–49.
24. Приказ Минтранса России от 21.12.2010 № 286 (ред. от 25.12.2018) «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России 28.01.2011 № 19627) // consultant.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=329069&dst=100680#vyHckoSJpF2Vn146> (дата обращения: 07.02.2022).

References

1. *Pogruzka RZhD v 2021 godu prevysila dokovidnyj uroven'* (Loading of Russian Railways in 2021 exceeded the pre-covid level). Available at: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/01/09/903983-pogruzka-rzhd> (accessed 2 February 2022).
2. *Perevozki kontejnerov po seti RZhD prevysili 6,5 mln DFJe v 2021 godu* (Russian Railways' network transported over 6.5 million TEU containers in 2021). Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=269852> (accessed 12 January 2022).
3. *O nacional'nyh celjah i strategicheskikh zadachah razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2024 goda* № 466r. Utv. Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 07.05.2018. / Prezident Rossijskoj Federacii. Moscow, 2018, 19 p.
4. *Dolgosrochnaja programma razvitiya otkrytogo akcionernogo obshhestva «Rossijskie zheleznye dorogi»* № 466r. Utv. Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 07.05.2018. Pravitel'stvo Rossijskoj Federacii. Moscow, 2019, 135 p.
5. White Paper of JSCo Russian Railways no. 769/p dated 04.17.2018 «*Strategiya nauchnotekhnicheskogo razvitiya kholdinga «RZHD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda*». («Strategy of the Scientific and Technical Development of the Russian Railways Holding for the Period up to 2025 and the Prospect until 2030»). Available at: https://www.irgups.ru/sites/default/files/irgups/science/document/strategiya_nauchno-tehnologicheskogo_razvitiya_holdinga_rzhd_na_period_do_2025_goda_i_na_perspektivu_do_2030_goda_belaya_kniga_2018.pdf (accessed 5 October 2021).
6. Pinchukov P.S., Makashyova S.I. Relay protection devices under conditions of heavy-freight motion [Ustrojstva relejnoj zashhity v uslovijah tjazhelovesnogo dvizhenija]. *Railway Transport*, 2018, no. 8, pp. 40–42.
7. Chernov Ju. A. *Jelektrosnabzhenie zheleznyh dorog* (Electricity supply of railways). Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Educational and Methodical Center for Education in Railway Transport», 2016, 406 p.

8. Markvardt K.G. *Jelektrosnabzhenie jelektrificirovannyh zheleznyh dorog* (Electricity supply for electrified railways). Moscow: Transportation, 1982, 528 p.
9. Borcov P.I. *Podvizhnoj sostav i osnovy tjagi poezdov* (Rolling stock and fundamentals of train traction). Moscow: Transportation., 1976, 342 p.
10. Natesan C., Devendiran A., Chozhavendhan S., Thaniga D., Revathi R.. IGBT and MOSFET: a Comparative Study of Power Electronics Inverter Topology in Distributed Generation // *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2015]*, 2015, pp. 1-5.
11. Guzhva S.A. Electrical diagram of electric locomotive type ES5K «Ermak» [Jelektricheskaja shema jeleketrovoza tipa JeS5K «Ermak»]. *Locomotive*, 2022, no. 1 (781), pp. 11-17.
12. Znaenok V.N., Lin'kov A.O., Mel'nichenko O.V. Rectifier-inverter converter of an electric locomotive based on IGBT transistors as a way to increase the capacity of railway sections [Vyprjavitel'no-invertornyj preobrazovatel' jeleketrovoza na baze IGBT-tranzistorov kak sposob povyshenija propusknoj sposobnosti uchastkov zheleznoj dorogi]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 1 (45), pp. 66-75.
13. German L.A. Increasing railway capacity with the installation of reactive power compensation [Povyshenie propusknoj sposobnosti zheleznoj dorogi s ustanovkoj kompensacii reaktivnoj moshhnosti]. *RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL*, 2021, vol. 80, no. 1. pp. 35-44.
14. Steimel A. Power-Electronics Issues of Modern Electric Railway Systems, *10th Intern. Conf. on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, Romania, 2010, pp. 1-8. DOI: <https://dx.doi.org/10.4316/AECE.2010.02001>.
15. Mel'nichenko O.V., Yagovkin D.A., Portnoi A.Yu. Razrabotka novogo energosberegayushchego algoritma upravleniya VIP elektrovoza na IGBT modulyakh [Development of a new energy-saving control algorithm of the reversible converter of the electric locomotive using IGBT modules]. *Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava: mezhvuz. sb. nauch. tr. [Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock: Interuniversity proc.]*. In Stetsyuk A.E. and Gamolya Yu.A. (eds.) DVGUPS Publ., 2013, Iss. 9, pp. 17-24.
16. Tomilov V.S., Mel'nichenko O.V., Shramko S.G., Boginskii S.A. Povysenie energeticheskoi effektivnosti raboty elektrovozov peremennogo toka [AC-fed electric locomotives energy performance increase]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 172-182.
17. Venikov V.A., Idel'chik V.I., Liseev M.S. *Regulirovanie naprjazheniya v jelektricheskikh setjah* [Regulation of voltage in electric networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 214 p.
18. Idel'chik V.I. *Jelektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 592 p.
19. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. *Peredacha i raspredelenie jelektricheskoy jenerгии* [Transmission and distribution of electric power]. Moscow: Phoenix., 2008, 720 p.
20. *Rasporjazhenie OAO «RZhD» ot 25.11.2010 № 2412r «Ob utverzhdenii standarta OAO «RZhD» «Infrastruktura zheleznodorozhnogo transporta na uchastkah obrashheniya gruzovyh poezdov povyshennogo vesa i dliny. Tehnicheskie trebovaniya»* (Order of JSCo «RZD» dated November 25, 2010 No. 2412r «On approval of the standard of Russian Railways» «Railway infrastructure in the areas of circulation of freight trains of increased weight and length. Technical requirements»). Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=679855#6q2ikoSthIvIXFNJ> (accessed 12 March 2022).
21. Yagovkin D. A. *Sovershenstvovanie vyprjavitel'no-invertornogo preobrazovatelja jeleketrovoza peremennogo toka i principa ego upravleniya v rezhime tjagi* (Improvement of the rectifier-inverter converter of an AC electric locomotive and the principle of its control in the traction mode). Extended Ph.D. in Technology Dissertation, Saint Petersburg, 2016, 16 p.
22. Hejman V.Ju. *Teorija jelektricheskikh cepej* [Theory of electrical circuits]. Moscow: Urait, 2020, 45 p.

23. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Analysis of the reverse traction current influence on the track circuits operation [Analiz vliyanija obratnogo tjagovogo toka na rabotu rel'sovyh cepej]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2021, no. 3(71), pp. 40-49.

24. *Prikaz Mintransa Rossii ot 21.12.2010 № 286 (red. ot 25.12.2018) «Ob utverzhdenii Pravil tehniceskoy jekspluatacii zheleznih dorog Rossijskoj Federacii» (Zaregistrovano v Minjuste Rossii 28.01.2011 № 19627)* (Order of the Ministry of Transport of Russia dated December 21, 2010 No. 286 (as amended on December 25, 2018) «On approval of the Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation» (Registered in the Ministry of Justice of Russia on January 28, 2011 No. 19627). Available at: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=329069&dst=100680#vyHckoSjPf2Vn146> (accessed 07.02.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макашева Светлана Игоревна

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680000, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения», ДВГУПС.

Тел.: 8-914-548-27-78.

E-mail: jap_svet@mail.ru

Пинчуков Павел Сергеевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680000, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения», ДВГУПС.

Тел.: 8-914-548-27-79.

E-mail: pinchukov-pavel@mail.ru

Мельниченко Олег Валерьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-902-170-24-37.

E-mail: olegmelnval@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Макашева, С. И. Оценка потерь напряжения в тяговой сети при работе электропоездов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе тиристорных и IGBT-транзисторов / С. И. Макашева, П. С. Пинчуков, О. В. Мельниченко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 112 – 125.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Makasheva Svetlana Igorevna

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680000, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Power Supply Systems».

Phone: 8-914-548-27-78.

E-mail: jap_svet@mail.ru

Pinchukov Pavel Sergeevich

Far Eastern State Transport University (FESTU)

47, Serysheva St., Khabarovsk, 680000, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Power Supply Systems».

Phone: 8-914-548-27-79

E-mail: pinchukov-pavel@mail.ru

Melnichenko Oleg Valerevich,

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electric Rolling Stock.

Phone: 8-902-170-24-37.

E-mail: olegmelnval@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Makasheva S.I., Pinchukov P.S., Melnichenko O.V. Assessment of voltage losses in the ac traction network for two different types of the locomotive's rectifier-inverter converters: on thyristors or IGBT-transistors. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 3 (51), pp. 112-125 (In Russian).

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Аннотация. Вопросы повышения эффективности основной деятельности компании ОАО «РЖД» в настоящее время актуальны и значимы. Согласно положениям основных стратегических документов компании ключевые показатели эффективности использования локомотивов должны улучшаться к 2025 г. и на перспективу до 2035 г. Статья посвящена анализу проблем и предложениям по совершенствованию управления электровозами, выполняющими большую часть перевозочной работы на железных дорогах РФ. Выполнен анализ возможностей улучшения основных эксплуатационных показателей локомотивного комплекса через повышение эффективности организации работы электровозов. Одним из ключевых показателей эффективности локомотивного комплекса является среднесуточная производительность электровозов. Для улучшения данного показателя необходимо увеличивать объемы работы, приходящейся на единицу тягового электроподвижного состава. В работе отмечены два пути достижения этого. Во-первых, качественное улучшение перспективных локомотивов, повышение их тяговых свойств, а во-вторых, совершенствование технологии управления тяговыми ресурсами. Показано, что для достижения целевых ориентиров компании ОАО «РЖД» необходима обязательная реализация второго направления, а именно внедрение и совершенствование полигонных технологий управления тяговыми ресурсами с переходом на удлиненные плечи работы электровозов. Отмечены основные требования и условия для осуществления данных технических решений.

Ключевые слова: локомотивный комплекс, среднесуточная производительность локомотивов, плечи работы локомотивов, полигонные технологии, электровозы, управление тяговыми ресурсами, эксплуатируемый парк электровозов.

Aleksandr S. Vilgelm, Aleksandr A. Komyakov, Alexey L. Kashtanov

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

INFLUENCE OF THE TRANSPORTATION PROCESS TECHNOLOGY ON THE ELECTRIC FREIGHT LOCOMOTIVES EXPLOITATION EFFICIENCY

Abstract. Improving the efficiency of the main activities of JSC «Russian Railways» is currently a relevant and significant issue. According to the provisions of the company main strategic documents, the key performance indicators for the locomotives are to be improved by 2025 and continue so until 2035. The paper deals with the analysis of problems and proposals for improving the management of electric locomotives that carry most of goods on the railways of the Russian Federation. The paper analyzes the possibilities to improve the main operational indicators of locomotive complex by increasing the efficiency of the organization of electric locomotives operation. One of the key performance indicators of the locomotive complex is the average daily performance of electric locomotives. To improve this indicator, it is necessary to increase the amount of work per unit of electric traction rolling stock. The given paper proposes two ways to achieve this. Firstly, it is the qualitative improvement of advantageous locomotives, increasing their traction properties; secondly, the improvement of the technology used to manage traction systems. The paper shows that in order to achieve the company targets, JSC «Russian Railways» has to necessarily implement the second solution, namely, introduce and improve the polygon technologies for managing traction resources and switch to extended railroad hauls of electric locomotives. The paper presents the main requirements and conditions for implementing these technical solutions.

Keywords: locomotive complex, average daily performance of locomotives, locomotive hauls, polygon technologies, electric locomotives, traction resources management, operational fleet of electric locomotives.

Около трети всех эксплуатационных расходов ОАО «РЖД» приходится на локомотивный комплекс. Порядка 190 тыс. работников занято в локомотивном хозяйстве. Примерно пятую часть в общей себестоимости железнодорожных перевозок составляет доля затрат на техническое содержание тягового подвижного состава. Инвентарный парк локомотивов ОАО «РЖД» составляет более 20 тыс. единиц, эксплуатируемый парк – более 14 тыс. единиц.

Все это говорит о существенном значении работы локомотивного комплекса в общей работе, выполняемой на сети железных дорог РФ. Также и эффективность деятельности локомотивного комплекса играет важную роль в общей эффективности компании. Более того, при

низкой эффективности работы локомотивов и организации управления ими вся прочая достигаемая эффективность может попросту не иметь существенного значения в масштабах затрат на содержание инфраструктуры и тягового подвижного состава.

В целом эффективность локомотивного комплекса складывается из следующих составляющих:

- 1) готовности локомотивного парка и бригад выполнять в полном объеме перевозки на всей сети;
- 2) надежности локомотивного парка в эксплуатации и безопасности его работы;
- 3) укомплектованности локомотивными бригадами;
- 4) производительности локомотивов и бригад;
- 5) технологической эффективности и экономичности работы комплекса.

Первые три составляющих должны неукоснительно выполняться и, безусловно, регулярно выполняются на сети дорог. При этом производительность, технологическая эффективность и экономичность – это понятия относительные и зависящие от принятых критериев их оценки.

Так, производительность и технологическая эффективность работы локомотивного комплекса железных дорог может быть охарактеризована большим числом качественных показателей, к основным из которых можно отнести следующие:

- средние технические, участковые, ходовые скорости движения поездов;
- среднюю массу перевозимых поездов;
- среднесуточный пробег локомотивов;
- общее время полезной работы локомотивов;
- удельную энергоемкость (или энергетическую эффективность) тяги поездов;
- среднесуточную производительность локомотивов;
- затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание локомотивов [1].

Вопросам повышения энергетической эффективности тяги поездов посвящено множество работ, связанных и с оптимизацией режимов управления электроподвижным составом [2], и с повышением эффективности работы системы тягового электроснабжения и организации управления тяговыми ресурсами [3]. При этом важным является улучшение и других из приведенных показателей. Так, например, согласно Долгосрочной программе развития компании ОАО «РЖД» показатель среднесуточной производительности локомотивов рабочего парка к 2025 г. должен увеличиться на 11,6 % относительно уровня 2019 г. Работа в данном направлении ведется и пути улучшения данного показателя очевидны: увеличение загрузки имеющихся в наличии локомотивов [4] и обновление парка за счет приобретения новых более мощных и технически совершенных локомотивов, в том числе работающих на газе и других альтернативных источниках энергии [5, 6].

Резерв повышения загрузки имеющихся электровозов не бесконечен и потому обновление и усиление парка локомотивов является важным мероприятием, способствующим достижению плановых показателей. И динамика закупки новых электровозов на сегодняшний день сохраняет положительную тенденцию. Всего за период реализации Долгосрочной программы развития планируется закупка порядка 6000 локомотивов, благодаря чему ожидается, что к 2025 г. случаи задержек поездов по причинам, связанным с техническим состоянием локомотивов, сократятся на 25 – 33 %, что, в свою очередь, повысит и производительность локомотивов, и эффективность работы локомотивного комплекса.

Технические требования к новым локомотивам с течением времени также становятся более жесткими. Так, среди основных требований к новым проектируемым электровозам можно выделить увеличенную нагрузку на ось до 27 – 30 т, возможность вождения поездов массой до 10000 т, реализацию функций интеллектуальной системы управления и безопасности движения, возможность перехода на техническое обслуживание по техническому состоянию, в том числе за счет развития диагностических бортовых систем [7], и многие другие.

Однако само по себе качественное улучшение парка эксплуатируемых электровозов без грамотной организации их работы (с минимизацией задержек поездов и простоев локомотивов [8]) не способно существенно повысить эффективность работы локомотивного комплекса. Для этих целей необходимо, чтобы каждый электровоз работал в режимах, близких к его номинальным возможностям [9]. Однако технология работы железных дорог и местные условия эксплуатации всегда будут формировать задачи и проблемы, решение которых необходимо для достижения оптимальных значений показателей эффективности эксплуатации локомотивов. В этом направлении заключен значительный потенциал повышения эффективности работы локомотивного комплекса.

Целью настоящего исследования является обоснование применения таких средств организации эксплуатации электровозов, как полигонные технологии управления тяговыми ресурсами с переводом электровозов на удлиненные плечи работы и оценка потенциала улучшений за счет этого ключевых показателей эффективности работы локомотивного комплекса.

Исходя из изложенного выше можно утверждать, что важным является не только создание мощных, надежных, быстроходных локомотивов, но и такая организация их эксплуатации, при которой они работали бы с наибольшим эффектом и максимальной отдачей.

Эффективность использования локомотива характеризуется его производительностью, т. е. выполняемой им полезной работой по перемещению грузов в единицу времени. Производительность локомотива определяется произведением массы перевезенных им за сутки грузов на расстояние, на которое эти грузы перемещены.

Основным интегральным показателем эффективности работы локомотивного комплекса можно считать среднесуточную производительность локомотивов. Данный показатель зависит от объемов выполненной работы, отнесенных к количеству локомотивов, задействованных на выполнение этой работы. Таким образом, основным путем повышения среднесуточной производительности локомотивов является увеличение грузоперевозок большими темпами, чем рост численности парка локомотивов. Среднесуточная производительность может быть определена по отношению к эксплуатируемому или рабочему парку электровозов.

Как было отмечено выше, сложности на пути улучшения показателей эффективности локомотивов будут создавать, во-первых, особенности технологии работы железных дорог, а во-вторых, местные условия эксплуатации.

Под первым понимаются такие особенности, как наличие обязательной работы во вспомогательных видах движения и в движении с порожними поездами, необходимость систематического выполнения технического обслуживания с отцепкой электровозов от поездов, необходимость замены электровозов по станциям стыкования по причине смены рода тока и др.

Под вторым подразумевается такие условия, как план и профиль пути, которые обуславливают необходимость обязательного использования кратной тяги или подталкивающих локомотивов на отдельных перегонах участка и, как следствие, необходимость дополнительных остановок в процессе доставки грузов; климатические условия, которые создают дополнительное сопротивление движению и влияют на возможность применения оптимальных режимов работы локомотивов, в том числе рекуперативного торможения [10].

Учет данных особенностей является важнейшим условием как при совершенствовании самих локомотивов, так и при планировании организации управления их эксплуатацией. Например, в наиболее грузонапряженных направлениях вывоза угля Кузбасс – Северо-Запад и Кузбасс – Центр встречается по три станции стыкования, в направлении Кузбасс – Юг – две станции стыкования. А на Восточном полигоне множество участков как на электротяге, так и на теплотяге требуют использования подталкивающих локомотивов даже при работе с установленными в настоящее время весовыми нормами, не говоря уже о целевых весовых нормах. Профиль пути и климатические условия на данных направлениях также могут существенно различаться в процессе движения поезда от места отправления до станции назначения.

При этом необходимо понимать, что каждая остановка поезда – это потеря времени, снижение скорости доставки грузов и увеличение времени полного оборота локомотива. Соответственно это и увеличение необходимой численности локомотивов рабочего и эксплуатируемого парков и, как следствие, при тех же объемах выполняемой работы сокращение показателя среднесуточной производительности локомотивов и увеличение расходов на их содержание. Следовательно, остановки, обусловленные необходимостью смены локомотива или установки подталкивающего локомотива, – это в любом случае обстоятельства, снижающие показатели эффективности локомотивов при том, что фактически вызваны они несовершенством технических систем. Под несовершенством здесь подразумевается отсутствие двухсистемных грузовых электровозов, отсутствие развитых бортовых систем диагностики, способных обеспечить организацию их обслуживания по техническому состоянию, недостаточность мощности и тяговых свойств электровозов для работы без вспомогательных локомотивов.

Как видно, одним из факторов, обуславливающих вынужденные остановки для смены локомотива, является необходимость выполнения его технического обслуживания. Эксплуатируемые сегодня электровозы должны проходить техническое обслуживание второго объема (ТО-2) через определенные временные промежутки, регламентированные руководством по эксплуатации и другими нормативными документами. Для различных серий электровозов эта величина варьируется от 48 до 180 ч и определяет максимально возможный пробег между необходимыми отцепками электровоза для выполнения технического обслуживания, км:

$$L_{\max} = \alpha \cdot V \cdot (T - t), \quad (1)$$

где α – коэффициент, характеризующий размещение пунктов технического обслуживания;

V – средняя участковая скорость, км/ч;

T – регламентированное время между ТО-2, ч;

t – суммарное время нахождения электровоза в пунктах оборота, ч.

Из приведенного выражения видно, что для значений средней участковой скорости порядка 40 км/ч и наименьших значений регламентированного времени между ТО-2 (48 ч) в зависимости от суммарного времени нахождения электровозов в пунктах оборота (от 6 до 12 ч) пробег $L_{\max}$, определяющий длину участка возможного следования без отцепки электровоза, находится в диапазоне 1400 – 1800 км. Расчеты показывают, что в случае использования электровозов с увеличенным временем между ТО-2 (72 – 180 ч) величина возможного пробега и, следовательно, длина допустимого плеча работы электровоза увеличиваются кратно. Например, при регламентированном времени между ТО-2 в размере 180 ч пробег без отцепки электровоза может достигать 6700 км, что может быть полезно использовано при работе электровозов на длинных участках Восточного полигона.

С целью совершенствования и оптимизации технологии перевозочного процесса, ликвидации «узких мест» пропускной и провозной способности, а также расширения или устранения лимитирующих факторов повышения эффективности работы локомотивного комплекса в ОАО «РЖД» создаются, внедряются и по сей день являются перспективными Центры управления тяговыми ресурсами с применением полигонных технологий эксплуатации локомотивов. Основной задачей этих Центров является организация оптимального и оперативного руководства использованием тяговых ресурсов на удлинённых участках обращения локомотивов (до четырех железных дорог).

В рамках настоящей работы были выполнены расчеты по оценке возможностей улучшения основных показателей эффективности электровозов при использовании данной технологии. Для этого были составлены расчетные выражения для определения ключевых показателей эффективности для двух вариантов использования электровозов:

а) на двух смежных коротких участках двумя обособленными парками электровозов двух разных депо (рисунок 1, а);

б) на объединенном длинном участке общим парком электровозов двух разных депо (рисунок 1, б).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На первой схеме (см. рисунок 1, *а*) представлена стандартная схема обслуживания участков электровозами, когда два соседних основных депо *B* и *D* обслуживают два смежных участка *A – B – C* и *C – D – E* соответственно в отдельности. При этом на станциях *A*, *C* и *E* происходит отцепка электровозов, их увязка со встречными поездами и отправка в обратном направлении. На станциях *C* и *E* осуществляется ТО-2 электровозов приписки депо *B* и *D* соответственно.

На второй схеме (см. рисунок 1, *б*) представлена перспективная схема обслуживания участков электровозами, когда все электровозы находятся в корпоративном парке двух депо и работают на всем участке *A – B – C – D – E*. При этом отцепка электровозов для их оборота осуществляется только на станциях *A* и *E*, а на станции *C* в данном случае выполняется лишь остановка поездов для смены локомотивных бригад, что повышает среднюю скорость оборота электровозов и доставки грузов за счет сокращения времени простоя поездов по станции *C*.

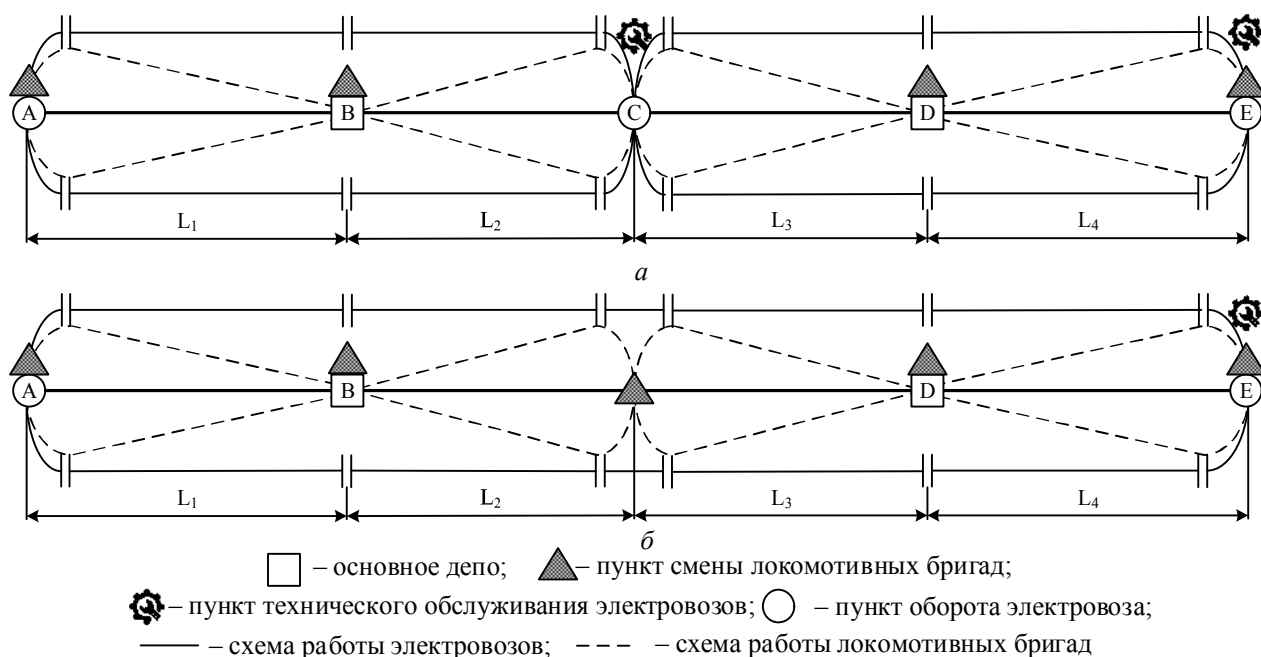


Рисунок 1 – Схемы организации эксплуатации электровозов на двух коротких участках обращения (*а*) и одном объединенном удлинненном участке (*б*)

Для данных расчетных схем для участка *A – B – C* были выполнены тяговые расчеты, составлены графики движения поездов, выполнена увязка электровозов с поездами по соответствующим станциям оборота, составлены ведомости оборота электровозов. Для участка *C – D – E* были приняты аналогичные значения параметров работы. На основе полученных данных ведомости оборота электровозов участка *A – B – C* и ряда допущений относительно работы на смежном участке были выполнены расчеты ключевых показателей эффективности работы локомотивных депо.

Далее приведем расчетные выражения для определения данных показателей для варианта «*а*» организации работы электровозов (см. рисунок 1, *а*) и варианта «*б*» организации работы электровозов (см. рисунок 1, *б*).

Суммарное время работы электровозов на двух коротких участках обращения рассчитывается по формуле, ч:

$$\sum_1^n T_i^a = \sum_1^n T_i^{ABC} + \frac{2 \cdot (L_3 + L_4) \cdot n}{V^{CDE}} + \sum_1^n t_1, \quad (2)$$

где n – количество пар поездов на участке *A – B – C – D – E*;

$\sum_1^n T_i^{ABC}$ – суммарное время работы электровозов на участке $A - B - C$, определенное по полученной ведомости оборота электровозов;

V^{CDE} – участковая скорость на участке $C - D - E$, принятая равной полученной из графика движения поездов для участка $A - B - C$;

$\sum_1^n t_1$ – суммарное время нахождения всех электровозов в пунктах оборота, ч.

Суммарное время работы электровозов на объединенном участке обращения рассчитывается по формуле, ч:

$$\sum_1^n T_i^b = \sum_1^n T_i^{ABC} + \frac{2 \cdot (L_3 + L_4) \cdot n}{V^{CDE}} + \sum_1^n t_2, \quad (3)$$

где $\sum_1^n t_2$ – суммарное время простоя электровозов по причине смены локомотивных бригад, ч.

Количественный состав эксплуатируемого парка электровозов по двум депо для работы на двух коротких участках обращения определяется по формуле:

$$N^a = \frac{\sum_1^n T_i^a}{24}. \quad (4)$$

Количественный состав эксплуатируемого парка электровозов по двум депо для работы на объединенном участке обращения определяется по формуле:

$$N^b = \frac{\sum_1^n T_i^b}{24}. \quad (5)$$

Среднесуточный пробег электровозов эксплуатируемого парка на двух коротких участках обращения рассчитывается по уравнению, лок.-км:

$$S^a = \frac{2 \cdot (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \cdot n}{(1 - \beta_0) \cdot N^a}, \quad (6)$$

где β_0 – коэффициент вспомогательного пробега электровозов.

Среднесуточный пробег электровозов эксплуатируемого парка на объединенном участке обращения рассчитывается по выражению, лок.-км:

$$S^b = \frac{2 \cdot (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \cdot n}{(1 - \beta_0) \cdot N^b}. \quad (7)$$

Время чистого движения электровозов эксплуатируемого парка на двух коротких участках обращения рассчитывается по формуле, ч:

$$t_3^a = \frac{\sum_1^n t_3^{ABC} + \frac{2 \cdot (L_3 + L_4) \cdot n}{V^{CDE}} - \sum_1^n t_2}{N^a}, \quad (8)$$

где $\sum_1^n t_3^{ABC}$ – суммарное время чистого движения электровозов на участке $A - B - C$, определенное по полученной ведомости оборота электровозов.

Время чистого движения электровозов эксплуатируемого парка на объединенном участке обращения рассчитывается по формуле, ч:

$$t_3^b = \frac{\sum_1^n t_3^{ABC} + \frac{2 \cdot (L_3 + L_4) \cdot n}{V^{CDE}} - \sum_1^n t_2}{N^b}. \quad (9)$$

Время полезной работы электровозов эксплуатируемого парка на двух коротких участках обращения вычисляется по уравнению, ч:

$$t_4^a = \frac{\sum_1^n t_3^{ABC} + \sum_1^n t_2 + \frac{2 \cdot (L_3 + L_4) \cdot n}{V^{CDE}}}{N^a}. \quad (10)$$

Время полезной работы электровозов эксплуатируемого парка на объединенном участке обращения определяется по уравнению, ч:

$$t_4^b = \frac{\sum_1^n t_3^{ABC} + 2 \cdot \sum_1^n t_2 + \frac{2 \cdot (L_3 + L_4) \cdot n}{V^{CDE}}}{N^b}. \quad (11)$$

Среднесуточная производительность электровозов эксплуатируемого парка на двух коротких участках обращения рассчитывается по формуле, ткм брутто:

$$W_a = Q \cdot S^a \cdot (1 - \beta_0), \quad (12)$$

где Q – средняя масса поездов на участке $A - B - C - D - E$.

Среднесуточная производительность электровозов эксплуатируемого парка на объединенном участке обращения рассчитывается по формуле, ткм брутто:

$$W_b = Q \cdot S^b \cdot (1 - \beta_0). \quad (13)$$

Совокупность подготовительных работ, включающая в себя тяговые расчеты, создание графиков движения поездов и все остальное вплоть до получения расчетных ведомостей и необходимых для дальнейших расчетов параметров, была выполнена для различных значений участковой скорости на участке в диапазоне от 40 до 48 км/ч. Затем по приведенным выше выражениям были определены значения ключевых показателей эффективности эксплуатации электровозов для двух случаев организации их работы и для различных значений участковой скорости на участке. Далее рассмотрим полученные результаты.

Сравнение результатов определения основных эксплуатационных показателей для двух коротких плеч работы электровозов и для объединенного удлиненного плеча работы приведено на рисунке 2. «Свечи» на графике показывают диапазон изменения основных эксплуатационных показателей грузовых локомотивов в результате использования полигонных технологий. На рисунке 2 обозначены следующие показатели работы локомотивов: 1 – суммарное время работы электровозов, лок.-час; 2 – эксплуатируемый парк грузовых локомотивов, ед; 3 – среднесуточный пробег, км; 4 – время чистого движения, ч; 5 – время полезной работы, ч; 6 – среднесуточная производительность, ткм брутто. Рассматривается диапазон изменения участковой скорости от 40 до 48 км/ч.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

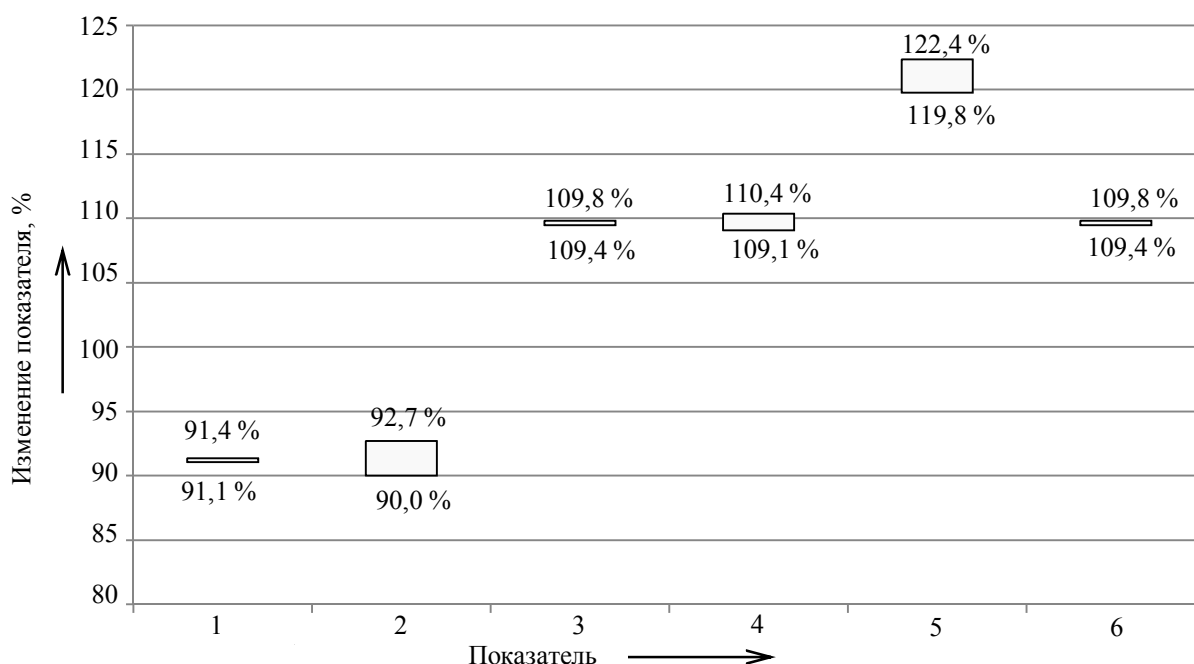


Рисунок 2 – Изменение основных эксплуатационных показателей грузовых локомотивов в результате использования полигонных технологий

Очевидно, что во всем диапазоне рассмотренных участковых скоростей на участке переход на удлиненное плечо работы электровозов улучшает анализируемые показатели. Наиболее существенно увеличивается время полезной работы электровозов, сокращается потребный эксплуатируемый парк электровозов, увеличивается среднесуточная производительность электровозов. При этом следует отметить, что участковая скорость в данной модели не оказывает существенного влияния на суммарное время работы электровозов, среднесуточный пробег и среднесуточную производительность, в то время как по прочим показателям наблюдается более существенная вариация.

Представленные результаты показывают, что реализация полигонной технологии управления тяговыми ресурсами с переходом на удлиненные плечи работы электровозов способна обеспечить рост ключевых показателей эффективности локомотивного комплекса. Значения роста этих показателей сопоставимы с цифрами, являющимися ориентирами в Долгосрочной программе развития компании ОАО «РЖД», согласно которой среднесуточная производительность локомотивов к 2025 г. должна увеличиться на 11,6 % относительно уровня 2019 г. Выполненные в работе расчеты на примере предложенных расчетных схем организации эксплуатации грузовых электровозов по условным расчетным участкам показали результаты, приближенные к данному ориентиру.

Основной ценностью работы является доказательство реальности достижения плановых показателей эффективности локомотивного комплекса при условии совершенствования технологии управления перевозочным процессом в совокупности с усилением тяговых свойств, мощности и технической оснащенности локомотивов. Необходимо понимать, что все основные показатели эффективности работы локомотивного комплекса определяются объемами и скоростью выполняемой работы по перевозке грузов. И то и другое зависит, в том числе, от интенсивности использования тяговых ресурсов и качества организации управления перевозочным процессом. Предложенные в работе расчетная схема и методология оценки ключевых показателей эффективности работы локомотивного комплекса позволяют на простейших примерах понять суть и значение изменений, происходящих в организации работы локомотивов при ускорении их оборота за счет сокращения времени, проведенного без поездов (по причине, например, выполнения операций ТО-2), и увеличении времени полезной работы с поездами. Предложенная методология позволяет и количественно оценить процентное улучшение

показателей и в случае ее применения к реальным участкам может быть полезна с практической точки зрения для технико-экономической оценки мероприятий по совершенствованию управления работой локомотивного комплекса.

Дальнейшие исследования в данном направлении должны лежать в плоскости определения технических требований к электровозам и условиям их эксплуатации для обеспечения безотказной и безопасной их работы в условиях обслуживания поездов по схемам с удлиненными плечами.

Подводя итог представленным результатам работ, еще раз отметим, что совершенствование электровозов, безусловно, важное направление на пути к достижению целевых параметров Долгосрочной программы развития ОАО «РЖД», однако без параллельной оптимизации системы управления тяговыми ресурсами достижение плановых показателей становится более сложной задачей.

В настоящей работе показано, что технологические особенности работы железнодорожного транспорта обуславливают наличие паразитных задержек поездов по причине смены локомотивов, что создает определенный резерв повышения эффективности работы локомотивного комплекса. Достигнуть резерва можно, увеличивая допустимые пробеги электровозов между отцепками для выполнения ТО-2, а также за счет совершенствования при этом системы управления тяговыми ресурсами.

Предложенные расчетная схема и методология оценки улучшения показателей работы электровозов за счет их перевода на работу на удлиненных плечах позволяют выполнять количественную оценку ожидаемого процентного улучшения ключевых показателей эффективности локомотивного комплекса. Выполненные в работе расчеты на основе предложенной методологии показали результаты, позволяющие утверждать, что использование полигонных технологий управления тяговыми ресурсами с переводом электровозов на удлиненные плечи работы способно повысить значение среднесуточной производительности электровозов на величину порядка 10 %.

Дальнейшая реализация полигонных технологий управления тяговыми ресурсами с учетом использования положений настоящего исследования позволит добиться того, чтобы как можно большее число электровозов работало в режимах, близких к своим номинальным возможностям.

Список литературы / References

1. Tulecki, A., Szkoda, M. Ecology, energy efficiency and resource efficiency as the objectives of rail vehicles renewal. *Transportation Research Procedia*, vol. 25, pp. 386-406 (2017). doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.416.
2. Domanov, K., Nekhaev, V., Cheremisin V. Optimization of Operating Modes of a Train by the Haul Distance. *Transportation Research Procedia*, vol. 54, pp. 842-853 (2021). doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.142.
3. Cheremisin, V. T., Vilgelm, A. S. Intellectual monitoring and planning system of energy efficiency indices of the traction power supply system. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering* 918 (2020) 012092 VIII International Scientific Conference Transport of Siberia (2020). doi: 10.1088/1757-899X/918/1/012092.
4. Kuo, C.-C., Gillian M. Nicholls A mathematical modeling approach to improving locomotive utilization at a freight railroad. *Omega*, vol. 35, 472-485 (2007). doi: 10.1016/j.omega.2005.09.003.
5. Seyam, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M. Development and assessment of a cleaner locomotive powering system with alternative fuels. *Fuel*, vol. 296, (2021). doi: 10.1016/j.fuel.2021.120529
6. Kumara, D., Valera H., Gautam, A., Agarwal, A. K. Simulations of methanol fueled locomotive engine using high pressure co-axial direct injection system. *Fuel*, vol. 295, (2021). doi: 10.1016/j.fuel.2021.120231.
7. Lazarev, A. A., Grishin, E. M., Galakhov, S. A., Tarasov, G. V. Algorithms for locomotives

maintenance schedule. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, pp. 951-956 (2019). doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.317.

8. Xu, X., Li, K., Lu, X. Simultaneous locomotive assignment and train scheduling on a single-track railway line: A simulation-based optimization approach. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 127, pp. 1336-1351 (2019). doi: 10.1016/j.cie.2017.11.002.

9. Vaidyanathan, B., Ahuja, R. K., Liu, J., Shughart L. A. Real-life locomotive planning: New formulations and computational results. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 42, pp. 147-168 (2008). doi: 10.1016/j.trb.2007.06.003.

10. Vilgelm A.S., Cheremisin V.T., Nikiforov M.M. Concept of intelligent system for controlling regenerative braking and using recovery energy. *MATEC Web of Conferences*, vol. 239, 01039, Siberian Transport Forum – TransSiberia 2018. doi: 10.1051/mateconf/201823901039.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вильгельм Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7-983-528-93-74.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

Каштанов Алексей Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, директор «Института автоматизации, телекоммуникаций и информационных технологий», ОмГУПС.

Тел.: +7-905-942-30-18.

E-mail: Al.kashtanov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Вильгельм, А. С. Влияние технологии перевозочного процесса на эффективность эксплуатации грузовых электровозов / А. С. Вильгельм, А. А. Комяков, А. Л. Каштанов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 126 – 135.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vilgelm Aleksandr Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, K. Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Docent, associate professor of the department «Electric railways rolling stock», OSTU.

Phone: +7-983-528-93-74.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

Komyakov Aleksandr Anatol'evich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, K. Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor Of Sciences in Engineering, Docent, professor of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: +7-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

Kashtanov Alexey Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, K. Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Docent, Director of the «Institute of Automation, Telecommunications and Information Technologies», OSTU.

Phone: +7-905-942-30-18.

E-mail: Al.kashtanov@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Vilgelm A. S., Komyakov A.A., Kashtanov A.L. Influence of the transportation process technology on the electric freight locomotives exploitation efficiency. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 3 (51), pp. 126-135 (In Russian).

З. Г. Мухамедова, Д. Ш. Бобоев, Х. М. Якупбаев

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

ОБОСНОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТЕХНОЛОГИЮ КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК

Аннотация. Управление интермодальными перевозками является сложным и ответственным процессом. При осуществлении международных и межконтинентальных контрейлерных перевозок традиционно используется железнодорожный транспорт. Задача железнодорожного транспорта заключается в обеспечении транспортировки по так называемым «сухопутным мостам» – сухопутным участкам, на которых маршрут начинается или заканчивается или через которые он проходит транзитом. Несмотря на значительный уровень компьютеризации и информатизации, уровень задержек доставки грузов в области контрейлерных интермодальных перевозок не уменьшается. Неудовлетворительная скорость продвижения контрейлерных поездов является существенным фактором возникновения этих задержек. Данная проблема является общей, а не только предстает перед интермодальными операторами, эксплуатирующими Сибирский и Евразийский континентальные сухопутные мосты, которые проходят соответственно по территории России и Казахстана и для доставки товаров из Японии, Южной Кореи и Тайваня в страны Восточной Европы. Названная проблема касается также и Американского, и Канадского сухопутных мостов, через которые японские товары попадают к потребителям в США и Канаде и через порты Германии и Нидерландов к потребителям в Западной Европе. Такая ситуация сложилась вследствие отсутствия действенных подходов к построениям систем управления, которые бы демонстрировали высокий уровень эффективности в условиях неопределенности, которая является естественной составляющей перевозочного процесса.

Ключевые слова: контрейлер, факторы, перевозки, контрейлерные железнодорожные перевозки, интермодальные перевозки.

Ziyoda G. Mukhamedova, Diyor Sh. Boboev, Khamid M. Yakupbaev

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

SUBSTANTIATION OF FACTORS AFFECTING THE TECHNOLOGY OF CONTRAILER TRANSPORTATION

Abstract. Intermodal transportation management is a complex and responsible process. When carrying out international and intercontinental contrailer transportation, rail transport is traditionally used. The task of railway transport is to ensure transportation along the so-called «land bridges» – land sections where the route begins or ends, or through which it passes in transit. Despite a significant level of computerization and informatization, the level of delays in the delivery of goods in the field of contrailer intermodal transportation does not decrease. The unsatisfactory progress of the contrailer trains is a significant factor in the occurrence of these delays. This problem is common, and not only appears before intermodal operators operating the Siberian and Eurasian continental land bridges, which pass through the territory of Russia and Kazakhstan, respectively, and for the delivery of goods from Japan, South Korea and Taiwan to the countries of Eastern Europe. Named problem applies to the American and Canadian land bridges, through which Japanese goods reach consumers in the United States and Canada and through the ports of Germany and the Netherlands to consumers in Western Europe. This situation is due to the lack of effective approaches to the construction of control systems that would demonstrate a high level of efficiency in conditions of uncertainty, which is a natural component of the transportation process.

Keywords: contrailer, factors, transportation, contrailer rail transportation, intermodal transportation.

При осуществлении анализа основных количественных и качественных показателей работы подсистемы контрейлерных перевозок были применены методы математической статистики и теории вероятностей; при построении модели управления железнодорожными контрейлерными перевозками были использованы методы системного подхода, теории случайных потоков. Для оптимизации модели стохастического программирования был использован метод отжига.

В статье на основе системного подхода решена научная задача по формированию автоматизированной технологии транспортировки контрейлеров по железной дороге при осуществлении интермодальных перевозок с использованием теории случайных потоков, что позволяет уменьшить общие эксплуатационные расходы на перевозку контрейлеров.

В случае железнодорожной доставки контейнеров важным является вопрос согласованности этого процесса с расписанием прибытия поездов. Таким образом, актуальной задачей является формирование автоматизированной технологии организации контейнерных железнодорожных перевозок, которая обеспечила бы высокий уровень надежности и конкурентоспособности системам интермодальных контейнерных перевозок за счет создания и использования системного эффекта при взаимодействии предприятий железнодорожного транспорта.

Уменьшение себестоимости перемещения контейнеров на всех участках пути является ключевым моментом системы интермодальных перевозок, ведь себестоимость является их основным конкурентным преимуществом. Использование контейнеров, несмотря на удобство при оперировании ими, должно обеспечивать уменьшение использования человеческого труда, продолжительности грузовых операций, затрат на охрану и времени доставки грузов. Время доставки грузов для грузовладельцев имеет важное экономическое значение. Даже незначительное увеличение скорости доставки грузов в международном сообщении для средних и крупных компаний имеет существенный экономический эффект. Суть данного эффекта заключается в ускорении оборота оборотных средств, ведь в контейнерах перевозят грузы, которые преимущественно имеют высокую удельную стоимость.

Основным недостатком является значительный срок доставки, который связан с небольшой скоростью перемещения грузов, затратами времени на проверку и оформление документов, возможной необходимостью пресечения контейнеровозов для выполнения грузовых операций. Вместе с тем грузовые перевозки и их дальнейшая оптимизация возможны как за счет организационных мероприятий, как, например, усовершенствования систем управления процессами эксплуатации, так и за счет внедрения новых технических решений, например, повышения экономичности энергетических установок и т. д. Другим делом является перемещение контейнеров железнодорожными путями, где организационные факторы имеют решающее значение.

Применение несовершенных технологий организации перевозок связано с возможными значительными непроизводительными потерями времени и увеличением эксплуатационных расходов для интермодальных операторов вследствие перепростоев поездов, содержащих в своем составе фитинговые платформы с контейнерами, на сортировочных и припортовых станциях. В последнее время все эти негативные явления лишь усиливаются на фоне укрепления таких тенденций, как нехватка тягового подвижного состава, нехватка и неудовлетворительное состояние парка контейнеров и фитинговых платформ. Усложняет ситуацию также и постепенная деградация железнодорожной инфраструктуры, в результате которой уменьшается пропускная способность линий и перерабатывающих мощностей сортировочных станций.

Кроме этого к значительному увеличению эксплуатационных затрат при осуществлении интермодальных контейнерных перевозок приводит и несвоевременное обеспечение судов контейнерами для загрузки вследствие высокой стоимости простоя поездов.

Таким образом, процесс организации железнодорожной части интермодальных перевозок имеет значительные резервы для его оптимизации, однако для этого необходимо разработать современную автоматизированную технологию организации железнодорожных контейнерных перевозок, которая обеспечит надлежащую скорость доставки контейнеров железнодорожными путями с минимальными затратами.

Для разработки такой технологии необходимо формализовать в рамках единой модели процессы накопления контейнеров на терминальных станциях, формирования и продвижения контейнеров в железнодорожном сообщении в условиях функционирования системы интермодальных перевозок. Основная задача управления процессом формирования и продвижения контейнерных поездов железнодорожными путями для своевременной перегрузки основана на выборе стратегии накопления контейнеров на терминальных пунктах.

Стратегия накопления маршрутов, т. е. полносоставных поездов, содержащих в своем составе только фитинговые платформы с контейнерами и направляющихся без переделок к припортовой станции, на первый взгляд кажется наиболее рациональной. Отсутствие переделок

прямых поездов на сортировочных станциях должна приводить не только к уменьшению эксплуатационных расходов, но и обеспечивать минимизацию времени на транспортировку контейнеров от терминального пункта до станции.

Однако при детальном изучении данной стратегии оказывается, что она также может приводить к значительным потерям [1]. Накопление маршрута из контейнеров может потребовать гораздо больше времени, чем было запланировано. Причиной этого могут стать изменчивость рыночной конъюнктуры или другие факторы. При таких условиях доставка партии контейнеров может не состояться вовремя, что в свою очередь может стать причиной перепростоя поезда под погрузкой. Другая стратегия, по которой даже несколько контейнеров, которые прибывают на терминальную станцию, отправляются в сторону станции в составе поездов, формируемых на станции, или проходят его транзитом, также может быть неэффективной [6, 7]. По такой схеме время доставки контейнеров может значительно увеличиться в результате прохождения переработок на сортировочных станциях, что также может стать причиной дополнительного простоя поезда.

Рациональным подходом к организации железнодорожной части интермодальных перевозок является формирование смешанной стратегии, которая позволит определять наиболее выгодный вариант отправки контейнеров с учетом текущей и прогнозной информации. Под точной информацией можно понимать предварительные данные, которые станция может получать от грузоотправителей. Но достоверность даже такой информации никогда не приближается к 100 %, ведь могут иметь место неверные расчеты, непредсказуемые задержки вследствие выхода из строя грузового оборудования и по другим причинам.

Таким образом, адекватная модель технологического процесса, которая будет пригодна для использования в качестве основы для формирования автоматизированной технологии организации транспортировки контейнеров железнодорожными путями в рамках системы интермодальных перевозок, должна учитывать его стохастическую составляющую.

Необходимо учитывать выбор математического аппарата для формализации процесса прибытия контейнеров в терминальных станциях. Сразу следует отметить, что классическая теория вероятностей направлена на моделирование вероятности наступления единичных событий или их комбинаций. Моделирование случайных процессов, которые связаны с последовательностями событий во времени, имеет множество специфических особенностей и является сложной задачей, однако существуют несколько способов математического аппарата, которые кажутся такими, что могут быть применены для его решения. Например, аппарат сетей Петри был разработан именно для моделирования дискретных случайных процессов.

Однако при более детальном его изучении можно обнаружить, что данный математический аппарат является своеобразной «вещью в себе», его практически невозможно применить в составе других математических моделей, которые содержат традиционные математические конструкции. Существует также сложность получения некоторых характеристик процесса, к тому же все полученные числовые характеристики модели Петри носят исключительно эмпирический характер. Однако построить необходимую модель, используя исключительно сети Петри, также практически невозможно. Даже в самых современных версиях этого математического аппарата, такого как Петри, не существует некоторых важных механизмов моделирования таких процессов, как, например, процесс накопления элементов, которыми в данном случае являются контейнеры. Его можно смоделировать только с помощью введения в модель искусственных конструкций, что обусловлено необходимостью сохранения простоты семантики этого популярного математического аппарата.

Другим математическим аппаратом, который сохраняет всю полноту и точность математического описания случайных процессов и в то же время направлен на практическое применение, является математический аппарат теории случайных потоков [8, 9]. Его преимуществами является возможность описания числовых характеристик случайных последовательностей событий, которые относятся не только к классу марковских процессов и которые предусматривают возможность одновременного наступления нескольких событий и

изменение вероятностных характеристик во времени. Таким образом, теория случайных потоков является наиболее адекватным математическим аппаратом для представления потоков прибытия контейнеров на терминальные железнодорожные станции.

В то же время в реальном мире существует небольшое количество процессов, которые могут при определенных условиях считаться детерминированными. Транспортные процессы гораздо больше испытывают влияние случайных факторов по сравнению с процессами в других отраслях производства. При таких условиях крайне важным этапом развития автоматизированных систем управления является построение моделей, которые не только реализуют типовую логику технологического процесса, но и способны выбирать лучшее решение из множества альтернатив на основе анализа его текущих вероятностных характеристик в реальном масштабе времени.

Ключевым моментом решения задачи организации транспортировки контейнеров является определение оптимального времени завершения накопления контейнерной партии. Это время должно соответствовать максимуму или приемлемому значению вероятности того, что уже накоплена партия контейнеров будет доставлена в порт вовремя и не произойдет задержки судна. Таким образом, задача состоит в том, чтобы обеспечить доставку необходимого количества контейнеров максимально дешевым способом и вовремя.

Успешное решение данной задачи возможно лишь при условии, что решение по терминалам, которые связаны единым транспортным процессом, т. е. по терминалам, которые отправляют контейнерные партии для загрузки одного и того же поезда, будут приниматься с учетом системного эффекта в едином центре принятия решений [10]. Так, для возможности принятия обоснованных решений по определению времени завершения накопления контейнерных партий и выбора способов их доставки необходимо решить не только задачу прогнозирования процесса поступления контейнеров к терминальным станциям, но и построить модель оценки вероятности возможных вариантов реализации этого процесса.

Следовательно, первоочередной задачей для построения данной модели является исследование процесса поступления контейнеров к терминальным станциям. Также на пути формализации процесса управления транспортировкой контейнеров при осуществлении интермодальных перевозок важным является исследование процесса поступления контейнеров к терминальным железнодорожным станциям, а также вероятности экспоненциального закона распределения.

Результаты расчетов вероятности экспоненциального закона распределения приведены в таблице. Проверка была проведена с применением статистического критерия согласованности Пирсона.

Результаты расчетов в ходе проведения статистического исследования по методу гистограммы

Номер интервала	Левая граница, ч	Правая граница, ч	Эмпирические		Теоретические	
			частота	частость	частота	частость
1	0,0484	0,2464	23	20,3293	0,3898	0,4015
2	0,2464	0,4444	14	12,4285	0,2373	0,2454
3	0,4444	0,6424	11	7,5982	0,1864	0,1500
4	0,6424	0,8403	5	4,6452	0,0847	0,0917
5	0,8403	1,4343	6	5,6375	0,1017	0,1113
Σ			59	50,6387	1,0000	1,0000
$\chi^2 = 2,1230$			$\chi_{\alpha}^2 (\alpha = 0,05) = 7,815$		$\chi^2 < \chi_{\alpha}^2$	

Полученная в результате величина 2,123 не превысила критического значения критерия 7,815, которое было рассчитано с учетом числа степеней свободы и уровня статистической значимости теста 0,05. Таким образом, по результатам проверки гипотеза о экспоненциальном законе распределения интервала оказалась такой, что не была отклонена. На разных времен-

ных интервалах потоки прибытия имеют независимые паттерны времен прибытия контрейлеров на станцию, следовательно, их можно считать потоками без последствия, т. е. пуассоновскими.

Следует отметить, что эти потоки также не являются ординарными, ведь контрейлеры могут прибывать группами, т. е. на один момент времени может приходиться несколько событий потока. Для моделирования таких потоков целесообразно применить понятие пуассоновского потока групповых точек или кратного понятия пуассоновского потока. Одновременное же поступление нескольких контрейлеров отображается одной точкой на временной оси и по такой терминологии представляет одно событие, но это событие является кратным, и величина кратности события является ее дополнительным признаком. В таком случае возникает вопрос формализации процесса изменения количества контрейлеров, поступающих к терминальной станции. Такой процесс называется счетным процессом (англ. counting process).

Счетный процесс – случайный процесс – представляется счетной функцией, которая является положительной, неубывающей и целочисленной [3]. Тогда счетный процесс можно считать производным процессом от случайного процесса, которым он вызван, или его иной интерпретацией.

Данный процесс не является ординарным, ведь в момент наступления события потока одновременно на станцию может прибывать разное количество контрейлеров (от одного до трех). С точки зрения теории случайных потоков с целью упрощения процедуры анализа данного процесса его целесообразно рассматривать как суперпозицию трех потоков различной кратности. Рассмотрим поток кратности. С этой целью необходимо временно отбросить все остальные события основного потока. Следует отметить, что важнейшей характеристикой потока с точки зрения теории является характеристика, которая имеет название интенсивности. Интенсивность потока – это среднее число событий, приходящееся на единицу времени на определенном временном интервале. Теория разделяет потоки на стационарные и нестационарные. Стационарным потоком является такой поток, основные характеристики которого, и в первую очередь интенсивность, являются неизменными во времени [4].

Исследование данного потока выявило тот факт, что количество событий, приходящихся на разные временные интервалы одинаковой продолжительности, не являются постоянной величиной. В частности, количество событий, приходящихся на два соседних временных интервала, значительно различается. Таким образом, данный поток контрейлеров относится к классу нестационарных потоков.

Хотя в данной задаче рассматривается система интермодальных перевозок, которая содержит только две терминальные железнодорожные станции, реальные системы могут насчитывать гораздо больше таких станций, которые одновременно отправляют контрейлерные партии, ведь количество сверхкрупных контрейлеровозов, вместимость которых превышает 20000 т, постоянно увеличивается.

Таким образом, исходя из того, что средний состав грузового поезда составляет 50 ~ 60 вагонов, для загрузки только одного такого контрейлеровоза нужно более 200 железнодорожных составов. При таких условиях задача может представлять значительную вычислительную сложность. К тому же целевая функция может иметь значительное количество локальных минимумов, что делает невозможным использование определенных классов алгоритмов для ее оптимизации, в частности алгоритмов, построенных, например, на основе метода градиентного спуска. Еще одной особенностью данной задачи является то, что при ее решении возникает необходимость выполнения значительных объемов вычислений, которые непосредственно не связаны с вариативностью решений, а обусловлены увеличением множества возможных комбинаций количества контрейлерных потоков различных кратностей вследствие расширения горизонта планирования.

Так, при осуществлении выбора метода оптимизации данной модели в первую очередь следует рассматривать эвристические и стохастические методы, которые являются быстрыми и не перегруженными лишними вычислениями. К методам, которые соответствуют указанным

качествам, в первую очередь можно отнести метод имитации отжига (англ. simulated annealing method) [5]. Этот эвристический метод относится также и к классу стохастических методов, он считается разновидностью метода Монте-Карло, который в том числе используется для решения задач комбинаторной и стохастической оптимизации. Весомым преимуществом метода имитации отжига является и то, что во многих задачах он опережает по скорости такой популярный метод оптимизации, как метод генетических алгоритмов.

На основе сформированной модели был разработан программный продукт в среде Matlab. Исследуемый полигон представляет собой два маршрута доставки контейнеров. На каждом маршруте находятся терминальная грузовая станция и сортировочная станция, оба маршрута проходят через одну припортовую станцию и завершаются на территории морского порта.

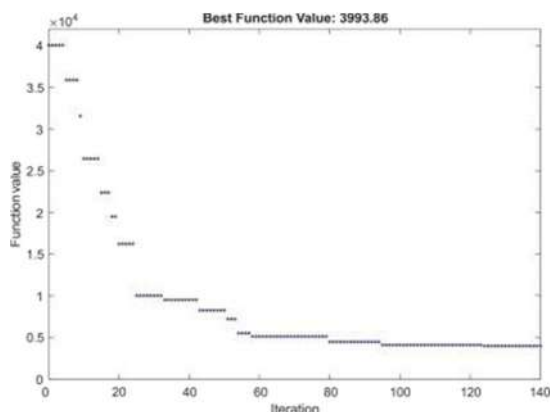


Рисунок 1 – Динамика изменения целевой функции в процессе оптимизации модели методом имитации отжига

В качестве механизма оптимизации стохастической модели был использован математический аппарат симуляции отжига. На рисунке 1 приведена динамика изменения целевой функции в процессе оптимизации модели 130 организации транспортировки контейнеров по железной дороге при осуществлении интермодальных перевозок методом имитации отжига.

Наличие минимума целевой функции, который соответствует приемлемому уровню затрат, дополнительно свидетельствует об адекватности модели. Его величина равна 390,86 тыс.

руб. и сопоставима со средним удельным значением себестоимости транспортировки контейнеров. Этот минимум достигается при значении времен окончания накопления контейнеров на двух терминальных станциях в 5,52 и 8,05 ч соответственно.

Как видно из полученной зависимости, приведенной на рисунке 2, эти значения времени соответствуют минимуму затрат и отделены от критического времени временными промежутками значительной продолжительности. Критическое время накопления на обеих терминальных станциях равно примерно 15 ч от начала планового периода, что связано с включением режима использования поезда.

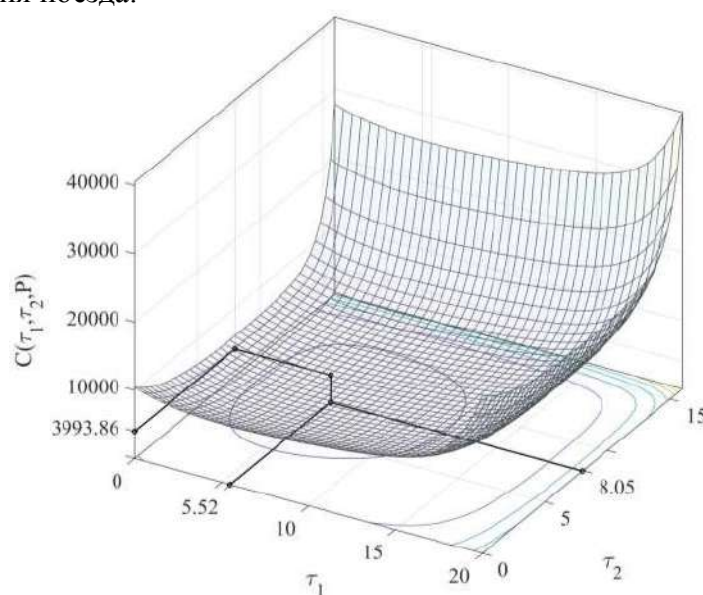


Рисунок 2 – Зависимость удельных расходов, приходящихся на транспортировку одного контейнера по железной дороге, по времени завершения накопления партий контейнеров на двух терминальных станциях

Итак, наиболее нежелательными недостатками в процессе планирования работы интермодальных железнодорожных терминалов, которые формируют и отправляют контейнерные поезда, является несогласованность времени накопления контейнерных партий и времен отправления поездов. В частности, на интермодальном железнодорожном терминале Гетеборга было установлено, что при несогласованности продолжительности этих процессов на 20 % сразу на 20 % увеличиваются и эксплуатационные расходы на транспортировку контейнерной партии железной дорогой. Такой результат был получен даже без учета возможности задержки или опоздания поезда, а также несогласованности отправки контейнерных партий смежными терминалами, которые функционируют в рамках общей системы интермодальных перевозок. И такие недостатки являются обычным явлением, даже если рабочие места оперативных руководителей терминалов оборудованы информационными системами, но без специализированных систем поддержки принятия решений (СППР) [2].

Результаты исследований уровня влияния человеческого фактора на качество управления в сфере железнодорожных перевозок также свидетельствуют о том, что средний уровень погрешностей руководящего персонала железнодорожных станций при планировании и реализации стратегических, тактических и оперативных задач, несмотря на уровень информатизации, постоянно повышается и остается на достаточно высоком уровне, который составляет примерно 20 %. С другой стороны теоретически доказано, что применение математического аппарата теории точечных процессов для формализации процессов, протекание которых связано со случайными потоками, вместо более общих классических моделей позволяет получить улучшение точности модели минимум на 7 – 10 %.

Дать приблизительную оценку эффективности разработанной технологии можно, оценив уровень повышения эксплуатационных расходов в зависимости от уровня неточности определения времен завершения накопления контейнерных партий на терминалах. Учитывая возможные варианты, обусловленные комбинацией направлений отклонений, повышения эффективности, используя результаты оптимизации целевой функции, можно определить по формуле:

$$e = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \frac{C(t_{1,i}t_{2,i}) - C_{\text{опт}}}{C_{\text{опт}}} \times 100 \%,$$

где q – количество вариантов предельных отклонений;

$t_{1,i}t_{2,i}$ – значения аргументов целевой функции, которые соответствуют i -му варианту отклонения;

$C(t_{1,i}t_{2,i})$ – значение целевой функции, что соответствует i -му варианту отклонения.

Тогда при условии, что среднее отклонение при традиционной технологии планирования составляет 15 %, получим:

$$e = \frac{1}{4} \times \frac{4444,4 - 3993,7}{3993,7} + \frac{4591,4 - 3993,7}{3993,7} + \frac{4571 - 3993,7}{3993,7} + \frac{4464,8 - 3993,7}{3993,7} \times 100 \% = 11,59 \, \%.$$

Таким образом, эффективность разработанной технологии заключается в первую очередь в возможности уменьшения эксплуатационных затрат при осуществлении перевозок контейнеров железнодорожным транспортом в среднем не менее чем на 10 %. Такой уровень эффективности обусловлен не только точностью прогноза интенсивности контейнеропотоков, а в первую очередь созданием системного эффекта, который обеспечивает определение оптимальной комбинации параметров процессов накопления одновременно для нескольких смежных терминальных станций в рамках общей системы интермодальных перевозок и продвижение железнодорожными путями контейнерных партий с учетом вероятностных характеристик железнодорожных операций и с одновременным обеспечением достаточного уровня уверенности принятых решений.

Полученные зависимости были использованы в ходе решения задачи оперативного планирования процесса транспортировки контейнеров по железной дороге в рамках системы интермодальных перевозок, которая включает в себя две терминальные железнодорожные станции, работающие в синхронном режиме. С этой целью была осуществлена оптимизация модели стохастического программирования с помощью алгоритма имитации отжига. В ходе оптимизации модели была построена поверхность отклика целевой функции и получен ее глобальный минимум, который соответствует минимуму удельных эксплуатационных затрат на транспортировку контейнерных партий для погрузки. Наличие минимума целевой функции модели находится в пределах планового периода и его величина, которая согласуется с данными о себестоимости транспортировки контейнеров, свидетельствуют об адекватности разработанной модели.

Также в ходе моделирования было доказано, что результаты оптимизации позволяют определить ключевые элементы оперативного плана работы терминальных железнодорожных станций, а именно: моменты времени окончания накопления контейнерных партий на терминальных станциях и способ их транспортировки (в составе прямого полносоставного или не полносоставного маршрутного поезда или в составе попутных грузовых поездов с возможным последующим реформированием на сортировочных станциях).

Контроль уровня основных составляющих транспортного процесса при осуществлении оптимизации, который является неотъемлемой составляющей разработанной модели, обеспечивает обоснованность в принятии управленческих решений и надежность построенного оперативного плана в целом.

Таким образом, совокупность разработанной математической модели, метода получения исходных данных для ее оптимизации в виде прогнозов функций интенсивности контейнеропотоков и непосредственно метода оптимизации модели и интерпретации его результатов в виде оперативного плана представляют собой технологию организации транспортировки контейнеров от терминальных станций по железной дороге в составе системы интермодальных перевозок.

В результате оценки эффективности разработанной технологии было установлено, что она предоставляет возможность уменьшить эксплуатационные расходы на железнодорожные перевозки контейнеров по меньшей мере на 10 % по сравнению с традиционной технологией планирования. Данный результат был достигнут в первую очередь благодаря созданию и использованию системного эффекта, который является следствием включения в единый процесс планирования всех терминальных железнодорожных станций, технологически связанных через адрес контейнерных партий. Таким образом, внедрение данной технологии позволит уменьшить простои контейнеров и железнодорожного подвижного состава на железнодорожных станциях, а также минимизировать количество случаев задержки контейнеровозов, что в свою очередь приведет к удешевлению и ускорению доставки грузов в международном сообщении.

Список литературы / References

1. Russo F.U. *Sansone The terminal cycle time in road-rail combined transport*. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 2021, vol. 186, pp. 875-886.
2. Ballis A., Golias J. *Towards the improvement of a combined transport chain performance*. European Journal of Operational Research, 2018, vol. 152 (2), pp. 420-436.
3. Bortas I., Brnjac N., Dundovic C. *Transport routes optimization model through application of fuzzy logic*. Promet - Traffic & Transportation, 2018, vol. 30 (1), pp. 121-129.
4. Boschian V., Dotoli M., Pia Fanti M., Iacobellis G., W. Ukovich W. *A metamodeling approach for performance evaluation of intermodal transportation networks*. European Transport, 2020, vol. 46, pp. 100-113.
5. Chang Zhu. *A Novel two-stage heuristic for solving storage space allocation problems in rail-water intermodal container terminals*. Symmetry, 2019, vol. 11 (10). 1229.

6. Mukhamedova Z.G., Ergasheva Z.V. *Economic and mathematical model of container block-trains. Technical sciences*, 2021, no. 3, pp. 30-36.

7. Z.G Mukhamedova. *Analysis and assessment of power efficiency of special self - propelled railway rolling stock. Bulletin of the Turin Polytechnic University in the city of Tashkent*. Tashkent, № 3, 2019. pp. 104-109.

8. Mukhamedova Z.G. *Mathematical Model for Calculation of Oscillations in the Main Bearing Frame of Railcar with Changing Stiffness and Physical Parameters, Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2017, no. 10 (5), pp. 682-690.

9. Mukhamedova Z.G. *Modeling of fluctuations in the main bearing frame of railcar, International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48-53, ISSN 2067-3604.

10. Boboev D.Sh., Bozorov R.Sh., Shermatov E.S. *Choose types of transport and improve their cooperation in the process of delivery of cargo. Economy and society*, no. 5 (84), 2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мухамедова Зиёда Гафурджановна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Доктор технических наук, и. о. профессора кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Бобоев Диёр Шомуротович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (90) 414-18-03.

E-mail: diyor1803boboyev@gmail.com

Якупбаев Хамид Маратович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Студент магистратуры, ТГТрУ.

Тел.: +998 (90) 006-18-36.

E-mail: xamidjon19962303@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мухамедова, З. Г. Обоснование факторов, влияющих на технологию контейнерных перевозок / З. Г. Мухамедова, Д. Ш. Бобоев, Х. М. Якупбаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 136 – 144.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mukhamedova Ziyoda Gafurdjanovna

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1, Temiryulchilar st., Tashkent, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctor of Technical Sciences, acting professor of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Boboev Diyor Shomurotovich

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1, Temiryulchilar st., Tashkent, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (90) 414-18-03.

E-mail: diyor1803boboyev@gmail.com

Yakupbaev Khamid Maratovich

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1, Temiryulchilar st., Tashkent, 100060, Republic of Uzbekistan.

Master's degree student, TSTU.

Phone: +998 (90) 006-18-36.

E-mail: xamidjon19962303@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mukhamedova Z.G., Boboev D.Sh., Yakupbaev Kh.M. Substantiation of factors affecting the technology of contrailer transportation. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 3 (51), pp. 136-144 (In Russian).

Р. Г. Король¹, О. Н. Числов²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск,
Российская Федерация;

²Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), г. Ростов-на-Дону,
Российская Федерация

ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК АМУРСКОГО БАСЕЙНА

Аннотация. В условиях санкционной политики западных стран основными экономическими партнерами России и потребителями товарных потоков становятся страны Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). По итогам восьми месяцев 2022 г. товарооборот между Российской Федерацией и Китайской Народной Республикой (КНР), по данным Главного таможенного управления КНР, увеличился на 31,4 % и составил 117,2 млрд долларов [1]. Китайская Народная Республика граничит с южными регионами Дальнего Востока России – Амурской областью, ЕАО, Приморским, Забайкальским и Хабаровским краями. В Хабаровском крае расположено девять пограничных пунктов пропуска: воздушные, речные, смешанные, автомобильные, морские, что позволяет формировать новые мультимодальные транспортные маршруты по доставке внешнеторговых грузов. Целью настоящей статьи является рассмотрение альтернативных вариантов мультимодальной транспортировки внешнеторговых грузопотоков через транспортную сеть Хабаровского края и перегрузочные пункты Амурского бассейна. Задачами данного исследования являются анализ объемов внешнеторгового товарооборота между Россией и Китаем, разработка технологических схем перевозки контейнеров на направлении « речные порты КНР – Хабаровский речной порт (РФ) – наземный транспорт – западные регионы », рассмотрение перспективных маршрутов транспортировки внешнеторговых грузов через грузопассажирские пункты пропуска «Покровка – Жаохэ» и остров Большой Уссурийский Амурского бассейна. Предметом данного исследования является транспортно-логистическая инфраструктура международных мультимодальных маршрутов Амурского бассейна. В данной работе использованы теоретические методы исследования, включая системный анализ и синтез информации. В статье рассматриваются характеристика терминально-логистической инфраструктуры речных портов Амурского бассейна и динамика перевозки контейнеров речным транспортом из портов Китая на терминалы Хабаровского речного порта, дано технико-технологическое обоснование организации постоянной зоны таможенного контроля на станции Хабаровск II, описаны преимущества использования пограничного пункта пропуска «Покровка – Жаохэ» как элемента альтернативного мультимодального маршрута транспортировки контейнеров. В заключительной части статьи представлено описание имитационной модели работы смешанного (автомобильно-речного) пункта пропуска при наличии таможенно-транзитных терминалов для оценки пропускной способности пограничных пунктов пропуска Дальневосточного округа.

Ключевые слова: мультимодальные перевозки, терминально-логистическая инфраструктура речного транспорта, пограничные пункты пропуска.

Roman G. Korol¹, Oleg N. Chislov²

¹Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation;

²Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, the Russian Federation

TRANSPORT AND LOGISTICS ARCHITECTURE OF MULTIMODAL TRANSPORTATION OF THE AMUR BASIN

Abstract. In the context of the sanctions policy of Western countries the main economic partners of Russia and consumers of commodity flows are the countries of the Asia-Pacific region (APR). According to the results of 8 months of 2022, the trade turnover between the Russian Federation and the People's Republic of China (PRC), according to the General Customs Administration of the People's Republic of China, increased by 31,4 % and amounted to \$ 117,2 billion [1]. The People's Republic of China borders on the southern regions of the Russian Far East – the Amur Region, the EAO, the Primorsky, Zabaikalsky and Khabarovsk Territories. There are 9 border checkpoints located in the Khabarovsk Territory: air, river, mixed, automobile, sea, which makes it possible to form new multimodal transport routes for the delivery of foreign trade goods. The purpose of the work is to consider alternative options for multimodal transportation of foreign trade cargo flows through the transport network of the Khabarovsk Territory and transshipment points of the Amur Basin. The objectives of this study are: analysis of the volume of foreign trade turnover between Russia and China, development of technological schemes for the transportation of containers in the direction of «river ports of China –

Khabarovsk River Port (RF) – land transport – western regions», consideration of promising routes for the transportation of foreign trade goods through cargo and passenger checkpoints «Pokrovka – Zhaohe» and Bolshoy Ussuriysky Island of the Amur swimming pool. The subject of this study is the transport and logistics infrastructure of international multimodal routes of the Amur Basin. In this work, theoretical research methods are used, including system analysis and synthesis of information. The article examines the characteristics of the terminal and logistics infrastructure of the Amur Basin river ports, the dynamics of container transportation by river transport from the ports of China to the terminals of the Khabarovsk River Port, gives a feasibility study for the organization of a permanent customs control zone at the Khabarovsk II station, and also describes the advantages of using the Pokrovka - Zhaohe border checkpoint as an element of an alternative multimodal container transportation routes. In the final part of the work, a description of the simulation model of the operation of a mixed (automobile-river) checkpoint in the presence of customs and transit terminals for assessing the capacity of border checkpoints of the Far Eastern District is presented.

Keywords: multimodal transportation, terminal and logistics infrastructure of river transport, border checkpoints.

Возрастающая загруженность Восточного полигона железных дорог и дальневосточных транспортных узлов требует разработки новых инфраструктурных и технологических решений. Дефицит провозной способности Восточного железнодорожного полигона в 2022 г. составит 73 млн т, в 2025 г. дефицит может достигнуть 150 млн т грузов [2]. Министерство транспорта России анонсировало реализацию 15 проектов по увеличению перерабатывающей способности дальневосточных морских портов с 300 до 417 млн т грузов [3]. На площадке Восточного экономического форума (г. Владивосток, сентябрь 2022 г.) обсуждалось строительство железнодорожной инфраструктуры необщего пользования «Тихоокеанская железная дорога», которая соединит Эльгинское угольное месторождение с терминалами порта Эльга Хабаровского края. Проект позволит перенаправить часть грузопотока (30 млн т угля) с Восточного полигона железных дорог на Тихоокеанскую железную дорогу, что повысит пропускную способность железнодорожного транспорта. Строительство новой и развитие существующей транспортно-логистической инфраструктуры направлено на увеличение пропускной способности международных транспортных коридоров и организацию новых мультимодальных транспортных маршрутов на направлении «Россия – Китай».

Географически Хабаровский край является транзитным транспортным узлом Дальнего Востока России, перерабатывая и перенаправляя грузопотоки, поступающие из стран Азиатско-Тихоокеанского региона в западные регионы, а также обеспечивая доставку товаров для снабжения отдаленных северо-восточных территорий страны. Основным объемом внешнеторговых грузов, поступающий из Китайской Народной Республики на территорию Хабаровского края, проходит через пограничные пункты пропуска, расположенные вдоль водной границы реки Амур и ее притока – реки Уссури. В 2021 г. товарооборот с Китаем превысил 1 203 млн долларов США, что составляет 33 % от внешнеторговой деятельности Хабаровского края. За шесть месяцев 2022 г. товарооборот между Хабаровским краем и Китаем увеличился на 24 % относительно аналогичного периода 2021 г. [4].

Экспортно-импортный грузопоток проходит через смешанные, речные и морские пограничные пункты пропуска Хабаровского края: морские торговые порты «Ванино», «Советская Гавань» и «Николаевск-на-Амуре». Смешанный автомобильно-речной пункт пропуска «Покровка» Бикинского района Хабаровского края соединяет через реку Уссури российско-китайский участок государственной границы. Речной грузовой пункт пропуска расположен на территории Хабаровского речного торгового порта.

ОАО «Хабаровский речной торговый порт» является одним из крупных речных портов Амурского бассейна (таблица 1) и осуществляет перевозки леса, контейнеров, наливных, насыпных, тарно-штучных грузов между портами Амурского бассейна в объемах, необходимых для обеспечения потребностей транспортной системы Хабаровского края. Терминально-логистическая инфраструктура порта включает в себя шесть механизированных причалов протяженностью 646 погонных метров, объединенных в три грузовых района, выполняющих перегрузочные работы. На территорию порта заходят три железнодорожных пути, примыкающих к парку Хабаровск – Пристань станции Хабаровск I. Хранение экспортных-импортных грузов осуществляется на открытой площадке склада временного хранения (СВХ)

№ 1 (таможенная площадка), открытой площадке склада временного хранения № 2 и в крытом помещении СВХ № 1.

Таблица 1 – Характеристика терминально-логистической инфраструктуры основных речных портов Амурского бассейна [5]

Показатель	Речной порт Амурского бассейна		
	Хабаровск	Благовещенск	Амурск
Протяженность причалов, пог. м	646	720	250
Площадь складов, м ²	84283	30520	15000
Перерабатывающая способность, млн т в год	4	2	0,5
Количество порталных кранов	11	8	2
Примыкание транспортной инфраструктуры	Железнодорожный и автомобильный подъезд	Железнодорожный и автомобильный подъезд	Автомобильный подъезд

Хабаровский речной торговый порт использует около 20 % от существующей пропускной способности терминально-логистической инфраструктуры порта. Планы развития порта включают в себя организацию дополнительных площадей для расширения номенклатуры грузов, переход на круглосуточный режим работы, приобретение техники для переработки крупнотоннажных контейнеров весом до 40 т, а также совместно с таможенными органами решение вопросов по ускорению оформления грузов. Приоритетным направлением производственной деятельности Хабаровского речного порта является развитие инфраструктуры грузовых районов «Ветка» и «Красная речка», привлечение дополнительных грузопотоков, увеличение емкостей терминалов для накопления партий грузов с последующей отправкой железнодорожным и автомобильным транспортом, а также речным транспортом по пунктам реки Амур и в порты Китая (Фуюань, Тунцзян, Миншань, Цзямусы и др.) [6].

Сложившаяся геополитическая ситуация в 2022 г. повлияла на перераспределение и интенсивность грузопотоков и на загруженность имеющейся транспортной и терминально-логистической инфраструктуры [7]. Транспортно-логистический бизнес сегодня нуждается в дополнительном подвижном составе, контейнерном оборудовании, морских судах, наращивании производственных мощностей дальневосточных транспортных узлов, формировании новых контейнерных линий, развитии инфраструктуры Восточного полигона железных дорог и международных транспортных коридоров, а также в увеличении пропускных способностей пограничных пунктов пропуска [8]. Переориентация внешнеторговых грузопотоков в направлении стран Юго-Восточной Азии привела к достижению пороговых значений провозной способности транспортной инфраструктуры Восточного полигона железных дорог, достигнув в 2021 г. 144 млн т. Российские железные дороги планируют в 2022 г. увеличить пропускную способность Дальневосточного железнодорожного полигона до 158 млн т [9]. Актуальным становится вопрос наличия резервов перерабатывающих способностей дальневосточных морских портов.

За январь – август 2022 г. грузооборот морских портов Дальнего Востока составил 151 млн т, что на 0,7 % меньше аналогичного периода 2021 г., при этом грузооборот основных портов увеличился и составил: Восточный – 53,9 млн т (+6,6 %), Ванино – 25,1 млн т (+3,0 %) и Владивосток – 21,4 млн т (+8,9 %). Контейнерооборот дальневосточных портов за восемь месяцев 2022 г. увеличился на 6,1 % относительно 2021 г., составив 1,46 млн контейнеров [10]. В результате переориентации импортного грузопотока с Азово-Черноморского и Балтийского бассейнов увеличилась нагрузка на терминальные объекты дальневосточ-

ных морских портов, не соблюдается график обработки судов, происходит скопление и простой морских судов в ожидании технологических операций, в том числе из-за отсутствия достаточного количества экспортного грузопотока для загрузки судов и порожнего железнодорожного подвижного состава для вывоза импортного грузопотока, в ожидании погрузки на железнодорожную платформу контейнеры могут находиться в порту до 10 сут [11]. На ритмичность работы морских портов повлияла также смена крупных иностранных судов-контейнеровозов на суда меньшей контейнеровместимости азиатских транспортных компаний, что потребовало изменения технологических процессов и привело к снижению операционной производительности портовой инфраструктуры [12]. Перед транспортной отраслью страны стоит важнейшая задача поиска новых альтернативных мультимодальных маршрутов доставки внешнеторговых грузов.

В Хабаровском крае сформирован новый международный транспортно-логистический маршрут доставки контейнеров с участием речного, автомобильного и железнодорожного транспорта [13]. Транспортно-логистическая цепь включает в себя перевозку контейнеров по реке Амур из китайских портов Фуюань и Тунцзян в адрес Хабаровского речного торгового порта [14], на площадках порта осуществляются таможенное оформление контейнеров и погрузка на автомобили, принадлежащие Хабаровской механизированной дистанции погрузочно-разгрузочных работ и коммерческих операций (МЧ-1) Дальневосточной железной дороги, которые доставляют контейнеры на грузовой двор станции Хабаровск II для формирования и отправки контейнерных поездов (рисунок 1). В 2021 г. со станции Хабаровск II было отправлено 10 поездов (1176 контейнеров), доход составил 41,69 млн руб. В 2022 г. планируется организовать отправку 12 контейнерных поездов с товарами КНР в направлении западных регионов России.

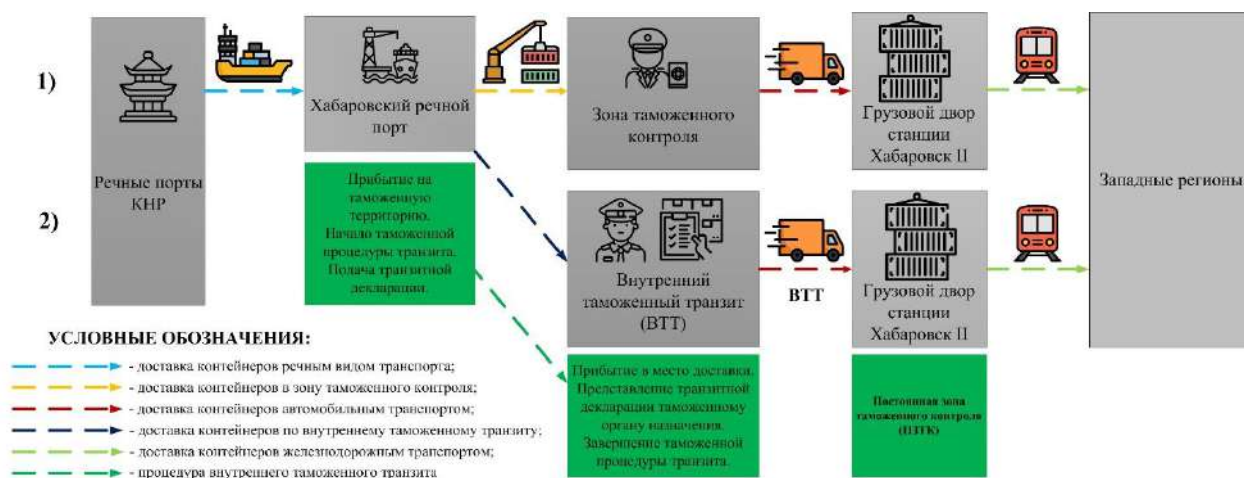


Рисунок 1 – Технологические схемы транспортировки контейнеров по маршруту «речные порты КНР – Хабаровский речной порт (РФ) – грузовой двор станции Хабаровск II – западные регионы» (1 – существующая; 2 – перспективная)

При организации мультимодального маршрута транспортировки контейнеров «речные порты КНР – Хабаровский речной порт (РФ) – грузовой двор станции Хабаровск II – западные регионы» задействовано девять речных судов, 12 автомобилей и 360 фитинговых железнодорожных платформ. Объемы экспортно-импортного контейнеропотока, перемещаемого по направлению «Китай – Россия» через речные порты Амурского бассейна за период работы в навигацию 2019 – 2021 гг., представлены в таблице 2.

За период навигации в 2021 г. количественный показатель внешнеторгового контейнерооборота через терминалы Хабаровского речного порта уменьшился на 30 % по сравнению с периодом навигации 2020 г., при этом произошло изменение структуры поступающего из Китая контейнеропотока в сторону увеличения количества 40-футовых контейнеров и уменьшения количества 20-футовых и среднетоннажных контейнеров.

Таблица 2 – Перевозка контейнеров речным транспортом из портов КНР на терминалы Хабаровского речного порта (РФ) за 2019 – 2021 гг.

Наименование груза	Год (экспорт/ импорт)		
	2019	2020	2021
Контейнеры 20 фт.	162/152	517/453	19/95
Контейнеры 40 фт.	25/29	31/28	0/630
Контейнеры трех- и пятитонные	5/8	20/17	0/3
Всего контейнеров	381	1066	747

Изменение динамики судозаходов с грузом в Хабаровский речной торговый порт (рисунок 2) в 2019 – 2021 гг. связано с технологическими ограничениями китайской стороны на приграничных территориях с целью минимизации рисков распространения коронавирусной инфекции. В навигацию 2021 г. объемы поступающих судов с грузом из Китая возросли, был продлен навигационный период на две недели, чтобы удовлетворить запросы грузоотправителей на доставку товаров. В том числе осуществляется экспорт угля речным транспортом в порты провинции Хэйлунцзян (КНР) с дальнейшей перевалкой на наземные виды транспорта и доставкой в точки потребления. Перевалочные мощности Хабаровского речного порта способны обработать дополнительные объемы угля для отправки в Китай, что позволит снизить загрузку Восточного полигона железных дорог путем перенаправления части грузопотока на речной транспорт. В настоящее время препятствием для транспортировки угля водным транспортом является дефицит балкерных судов на Дальнем Востоке. В 2021 г. группа компаний «Амурское пароходство» приобрели судно «Андромеда» дедвейтом 28 тыс. т и судно «Анатолий Сухов» дедвейтом 17,5 тыс. т, расширение состава морского флота позволит увеличить на 25 % объем перевозок грузов [15].

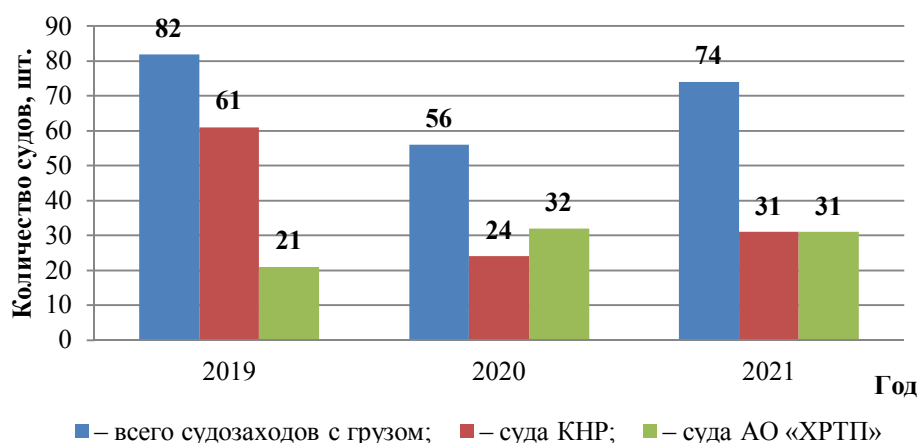


Рисунок 2 – Динамика судозаходов с грузом в Хабаровский речной торговый порт за период навигации 2019 – 2021 гг.

ОАО «Хабаровский речной торговый порт» располагается в центральной части города Хабаровска и не имеет возможностей территориального расширения, поэтому контейнерная площадка порта ограничена по вместимости контейнеров и применяемому подъемно-транспортному оборудованию. Накопление партии контейнеров на причалах речного порта для формирования и отправки контейнерных поездов со станции Хабаровск I невозможно по причине отсутствия технологических решений и инфраструктурного развития.

Перспективная технология международной мультимодальной транспортировки контейнеров с участием речного транспорта Амурского бассейна (см. рисунок 1) предполагает создание постоянной зоны таможенного контроля (ПЗТК) на территории Хабаровской механизированной дистанции погрузочно-разгрузочных работ и коммерческих операций (МЧ-1) с целью повышения уровня транспортного обслуживания, ускорения процесса доставки контейнеров и получения дополнительного дохода железнодорожным транспортом. Данная технологическая схема предполагает перемещение контейнеров с территории Хабаровского речного порт автомобильным транспортом МЧ-1 на площадку зоны таможенного контроля грузового двора станции Хабаровск II (МЧ-1) в рамках процедуры внутреннего таможенного транзита (ВТТ). На терминале МЧ-1 происходят таможенные операции, накопление контейнеров для погрузки на железнодорожный подвижной состав и отправки ускоренными контейнерными поездами в западные и центральные регионы России. Для реализации проекта организации ПЗТК на грузовом дворе станции Хабаровск II необходимо установить ограждения, ворота, мачты освещения по длине площадки, камеры видеонаблюдения с удаленным доступом, а также демонтировать склад ангарного типа для расширения территории имеющейся контейнерной площадки с учетом проезда транспорта. Данные инфраструктурные мероприятия позволят создать постоянную зону таможенного контроля вместимостью 256 контейнеров (ДФЭ) с потенциальным дополнительным доходом 43,6 млн руб. в год.

Грузовладельцы и грузоотправители Китая рассматривают организацию перспективных мультимодальных перевозок по маршруту «речные порты Китая – речные порты России – наземные виды транспорта – морской порт Ванино (РФ) – морские порты провинции Гуандун (КНР)» (рисунок 3) [16]. Ключевым элементом данного маршрута может стать развитие инфраструктуры транграничного острова Большой Уссурийский путем создания круглогодичного грузопассажирского пограничного пункта пропуска с ежегодным грузооборотом 1,3 млн т и пассажиропотоком 1,45 млн чел.

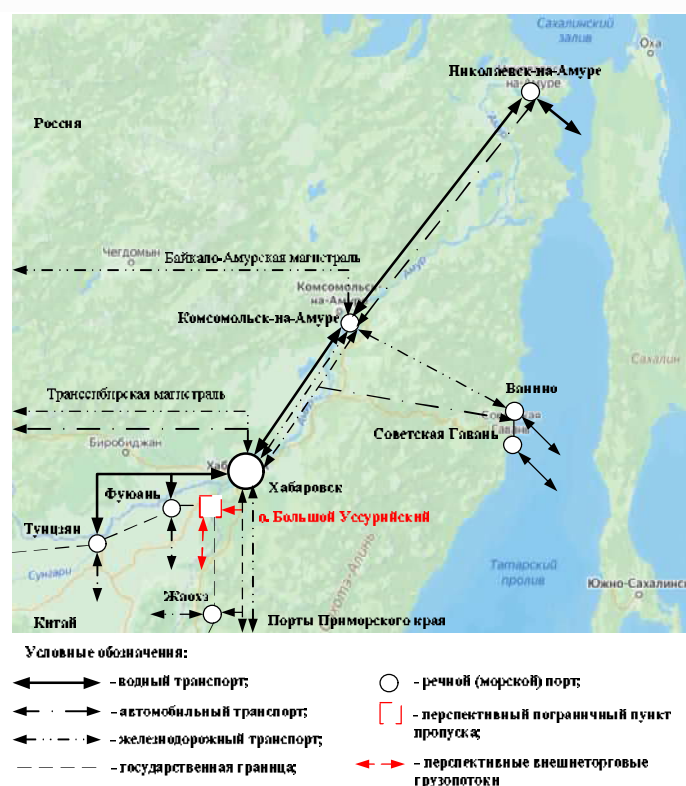


Рисунок 3 – Транспортные схемы международных мультимодальных транспортных маршрутов Амурского бассейна

В июле 2022 г. была открыта скоростная автомобильная магистраль «Обход Хабаровска», которая позволит увеличить пропускную способность дорожной сети Хабаровского края на

2000 автомобилей в час, а также увязать федеральные трассы «Амур», «Уссури» и «Восток» с сетью региональных дорог и в перспективе обеспечить выход на дорожную сеть Китая через грузопассажирский пограничный переход острова Большой Уссурийский. Привлекательным для транспортных компаний Китая является также мультимодальный маршрут через смешанный пограничный пункт пропуска «Покровка – Жаохэ».

18 июля 2022 г., после двухлетнего простоя из-за коронавирусных ограничений, возобновились перевозки через пограничный переход Покровка (РФ) – Жаохэ (КНР) с соблюдением мер противоэпидемического контроля. За июль – август 2022 г. пограничные пункты пропуска «Покровка – Жаохэ» и «Хабаровск – Фуюань» переработали более 70 тыс. т грузов. Технология перемещения транспорта через смешанный автомобильно-речной пункт пропуска «Покровка» (РФ) реализуется путем дистанционной проверки документов и температуры тела, исключая контакт граждан двух стран, водителям автотранспорта и членам судовых экипажей Китая запрещено сходить на российский берег, они должны находиться в защитных костюмах, очках и масках. Грузовой автотранспорт пересекает государственную границу на речном пароме, на берегу происходит отцепка прицепа с грузом, тягач с водителем возвращаются на российскую территорию. После грузовых операций с прицепом паром доставляет тягач с водителем для перемещения прицепа в Россию. Автотранспортные средства проходят обязательную санитарную обработку.

На направлении «Покровка – Жаохэ» курсирует паром вместимостью четыре грузовых автомобиля, при этом пропускная способность пограничного грузопассажирского пункта пропуска составляет 25 грузовых автомобилей, 12 автобусов, восемь паромов в сутки. В ближайшее время пограничный переход будет работать с грузопотоками, поэтому возможно увеличение пропускной способности пункта пропуска в три раза, в том числе за счет модернизации инфраструктуры пункта пропуска: капитальный ремонт наружного освещения, помещений для персонала контрольных государственных органов и сооружений досмотра грузового транспорта, установка весоизмерительного оборудования, шлагбаумов, ремонт дорожного покрытия на подъездах к пункту пропуска. В условиях увеличения внешнеторгового грузопотока возможен переход пункта пропуска на круглосуточный режим работы.

В Дальневосточном государственном университете путей сообщения была разработана имитационная модель работы смешанного (автомобильно-речного) пункта пропуска при наличии таможенно-транзитных терминалов [17]. Данная имитационная программа (рисунок 4) позволяет моделировать технологические процессы перемещения грузовых транспортных средств через государственную границу на паромных линиях, а также оценить пропускную способность инфраструктуры смешанного пункта пропуска в зависимости от инфраструктурного оснащения причальных устройств (зона наката транспорта), времени выполнения таможенного осмотра транспорта и вместимости речных грузовых судов.

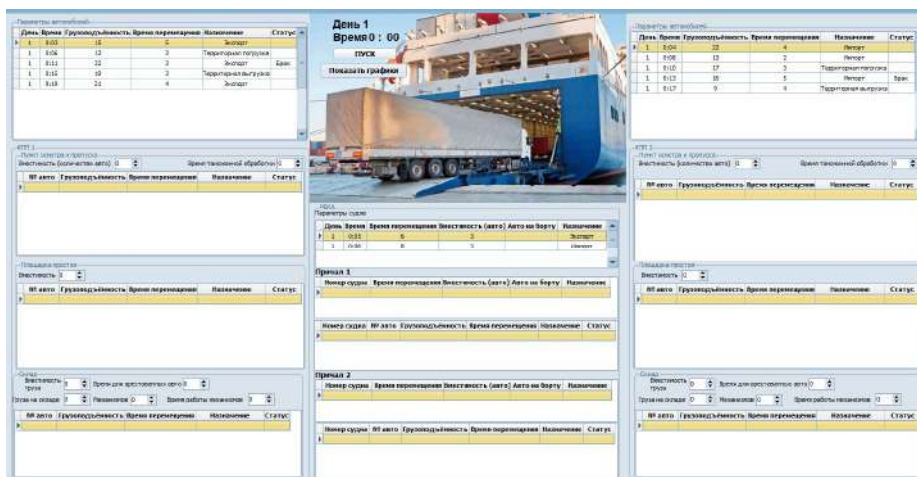


Рисунок 4 – Интерфейс программы имитационного моделирования работы смешанного (автомобильно-речного) пункта пропуска при наличии таможенно-транзитных терминалов

Дальнейшие научные исследования будут направлены на моделирование различных сценариев работы смешанного пункта пропуска «Покровка – Жаохэ» при изменении параметров грузопотока, графика движения речных и автомобильных транспортных средств, длительности процедуры таможенного оформления и т. д.

На Восточном экономическом форуме (ВЭФ-2022) было подписано соглашение между правительством Хабаровского края, представителями Министерства транспорта России и компанией «ФинИнвест» о строительстве транспортно-логистического центра «Хабаровский» для переработки контейнеропотока и формирования новых мультимодальных транспортных маршрутов. Центр будет создан в рамках ведомственного проекта «Формирование сети транспортно-логистических центров» государственной программы «Развитие транспортной системы». Определено расположение транспортно-логистического центра в границах территории опережающего развития (ТОР) «Хабаровск» с примыканием железнодорожных путей к станции Хабаровск II. В 2026 г. планируется завершить строительство транспортно-логистического центра «Угловая» и «Артем» в Приморском крае для обслуживания грузо- и контейнеропотоков Владивостокского транспортного узла и расширения перерабатывающих мощностей терминала станции Первая речка.

В феврале 2022 г. в Пекине (КНР) состоялся российско-китайский саммит, результатом которого является утверждение «Дорожной карты по высококачественному развитию российско-китайской торговли товарами и услугами». На заседании Совета глав государств – членов Шанхайской организации сотрудничества (ШОС, сентябрь 2022 г., г. Самарканд) обсуждалось, что согласно «дорожной карте» к 2024 г. планируется увеличить объемы двусторонней торговли России и Китая до 200 млрд долларов. Товарооборот России и Китая в 2021 г. увеличился на 35,8 %, достигнув 146,9 млрд долларов [18].

Переориентация грузопотоков с западного направления на восточную транспортную сеть и дальнейшее санкционное давление повышают востребованность и загруженность транспортной инфраструктуры дальневосточных регионов [19]. Развитие рассмотренных мультимодальных транспортных маршрутов позволит сформировать новые международные логистические цепи доставки товаров [20]. Экспертами прогнозируется увеличение объемов внешней торговли со странами Азиатско-Тихоокеанского региона, поэтому в условиях ограниченности развития транспортной инфраструктуры актуальными становятся вопросы формирования новых транспортных маршрутов и разработки новых логистических технологий, позволяющих удовлетворить потребности государства и внешнеторговых партнеров в транспортно-логистических услугах.

Список литературы

1. Товарооборот китайской провинции с Россией вырос за январь – август // 1prime.ru: Агентство экономической информации «Прайм». – Текст : электронный. – URL: https://1prime.ru/state_regulation/20220920/838187861.html (дата обращения: 20.09.2022).
2. Трутнев Ю.П.: дефицит мощностей Восточного полигона в 2022 г. превышает 100 млн т. Нагрузку должен принять Севморпуть // morvesti.ru: Морские вести России. – Текст : электронный. – URL: <http://www.morvesti.ru/news/1679/96415/> (дата обращения: 03.09.2022).
3. Порты боятся приближения зимы и РЖД / О. Войцеховская // vgudok.com: Транспортные новости. – Текст : электронный. – URL: <https://vgudok.com/lenta/porty-boyatsya-priblizheniya-zimy-i-rzhd-ambicii-mintransa-probki-na-vostochnom-poligone-i> (дата обращения: 03.09.2022).
4. Товарооборот Хабаровского края с Китаем вырос на четверть в 2022 году // tass.ru: Информационное агентство ТАСС. – Текст : электронный. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/15546405> (дата обращения: 10.09.2022).

5. Официальный сайт группы компаний «Амурское пароходство» // amurship.ru: Погрузочно-разгрузочные работы раздела «Наши услуги». – Текст : электронный. – URL: <https://www.amurship.ru/наши-услуги.html> (дата обращения: 11.09.2022).
6. Чудеснова, М. В. Организация мультимодальных перевозок на основе сообщения Россия – Китай / М. В. Чудеснова, Г. И. Шепелин. – Текст : непосредственный // Символ науки: международный научный журнал. – 2021. – № 6. – С. 40–44.
7. Покровская, О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 1. – С. 80–94.
8. Kholosha M. V., Gotov D., Smirnov S. M. Mission of Russia in creating the Nea integrated transport and logistics network, *Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 34-48.
9. Белова, Л. БАМ по пути / Л. Белова // kommersant.ru: Информационный портал «Коммерсантъ». – Текст : электронный. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5547090> (дата обращения: 11.09.2022).
10. Грузооборот морских портов России за 8 месяцев 2022 г. // morport.com: Ассоциация морских торговых портов. – Текст : электронный. – URL: <https://www.morport.com/rus/news/gruzooborot-morskih-portov-rossii-za-8-mesyacev-2022-g> (дата обращения: 15.09.2022).
11. Псеровская, Е. Д. Анализ развития контейнерных перевозок в Дальневосточном регионе / Е. Д. Псеровская, Я. В. Жукова, Д. Ю. Козеной. – Текст : непосредственный // Высокие технологии и инновации в науке; национальная безопасность России: актуальные аспекты : сборник избранных статей по материалам научных конференций. – Санкт-Петербург : Гуманитарный национальный исследовательский институт «Нацразвитие», 2019. – С. 228–233.
12. Морозова, К. Н. Влияние пандемии на морские контейнерные перевозки по направлению Китай – Россия / К. Н. Морозова. – Текст : непосредственный // Современные концепции и парадигмы образования в условиях мирового эпидемиологического кризиса : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону : Южный ун-т (ИУБиП), 2020. – С. 237–241.
13. Жаворонков, Н. А. Транспортно-технологические мультимодальные системы с участием внутреннего водного транспорта как одного из ключевых интегрирующих элементов / Н. А. Жаворонков, Е. В. Зарецкая, С. Г. Митрошин. – Текст : непосредственный // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2018. – № 55. – С. 124–133.
14. Ким, В. Р. Перспективы развития контейнерных грузовых перевозок между Россией и Китаем / В. Р. Ким. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2021. – № 1 (343). – С. 175–177.
15. Курдюмова, Р. Время возможностей: «Амурское пароходство» вывезет российский уголь в Китай / Р. Курдюмова // dvnovosti.ru: новости Хабаровска. – Текст : электронный. – URL: <https://www.dvnovosti.ru/khab/2022/08/01/144534/> (дата обращения: 15.09.2022).
16. Заостровских, Е. А. Состояние и перспективы развития внутреннего водного транспорта Дальнего Востока России / Е. А. Заостровских. – Текст : непосредственный // Регионалистика. – 2017. – Т. 4. – № 3. – С. 35–47.
17. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022661061, Российская Федерация. Имитационная модель работы смешанного (автомобильно-речного) пункта пропуска при наличии таможенно-транзитных терминалов : № 2022660379 : заявлено 07.06.2022 : опубликовано 14.06.2022 / Король Р. Г. – 1 с.: ил. – Текст : непосредственный.
18. Ткачев, И. Как Россия и Китай собираются нарастить взаимную торговлю до \$200 млрд / И. Ткачев // rbc.ru: РБК. – Текст : электронный. – URL: <https://www.rbc.ru/economics/05/02/2022/61fd2b419a7947752427d700> (дата обращения: 15.09.2022).
19. Pugachev I., Markelov G., Ostapenko A., Kulikov Y. Peculiarities of strategic transport development in the Russian far east and the Arctic, *Transportation Research Procedia: «International Conference of Arctic Transport Accessibility: Networks and Systems»*, 2021, pp. 511-517.

20. Попадюк, А. Ю. Об организации международных цепей доставки грузов / А. Ю. Попадюк, Е. К. Коровяковский. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – № 2. – С. 100–110.

References

Tovarooborot kitajskoj provincii s Rossiej vyros za yanvar'-avgust [The trade turnover of the Chinese province with Russia increased in January-August]. Available at: https://1prime.ru/state_regulation/20220920/838187861.html (accessed 20.09.2022).

Trutnev: deficit moshchnostej Vostochnogo poligona v 2022 g prevyshaet 100 mln t. Nagрузку dolzhen prinyat' Sevmorput' [Trutnev: the capacity deficit of the Eastern landfill in 2022 exceeds 100 million tons. The load must take' Sevmorput']. Available at: <http://www.morvesti.ru/news/1679/96415/> (accessed 03.09.2022).

3. *Porty boyatsya priblizheniya zimy i RZHD* [Ports are afraid of the approach of winter and Russian Railways]. Available at: <https://vgudok.com/lenta/porty-boyatsya-priblizheniya-zimyi-i-rzhd-ambicii-mintransa-probki-na-vostochnom-poligone-i> (accessed 03.09.2022).

4. *Tovarooborot Habarovskogo kraja s Kitaem vyros na chetvert' v 2022 godu* [The trade turnover of the Khabarovsk Territory with China increased by a quarter in 2022]. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/15546405> (accessed 10.09.2022).

5. *Oficial'nyj sayt grupy kompanij «Amurskoe parohodstvo»* [Official website of the Amur Shipping Company Group]. Available at: <https://www.amurship.ru/наши-услуги.html> (accessed 11.09.2022).

6. Chudesnova M. V., Shepelin G. I. [Organization of multimodal transportation based on the Russia-China communication]. *Simvol nauki: mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal* [Symbol of Science: an international scientific journal]. Ufa, 2021, no. 6, pp. 40–44 (In Russian).

7. Pokrovskaya O. D. Russia's logistics transport systems under new sanctions. *Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij – The Bulletin of Scientific Research Results*, 2022, no. 1, pp. 80-94 (In Russian).

8. Kholosha M. V., Gotov D., Smirnov S. M. Mission of Russia in creating the Nea integrated transport and logistics network. *Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 34-48.

9. *BAM po puti* [Baikal-Amur Mainline on the way]. Available at: <https://www.kommer-sant.ru/doc/5547090> (accessed 11.09.2022).

10. *Gruzooborot morskikh portov Rossii za 8 mesyacev 2022 g.* [Cargo turnover of Russian seaports for 8 months of 2022]. Available at: <https://www.morport.com/rus/news/gruzooborot-morskikh-portov-rossii-za-8-mesyacev-2022-g> (accessed 15.09.2022).

11. Pserovskaya E. D., Zhukova Y. V., Kozenoy D. Y. [Analysis of the development of container traffic in the Far East region]. *Vysokie tekhnologii i innovacii v nauke; nacional'naya bezopasnost' Rossii: aktual'nye aspekty* [High technologies and innovations in science; national security of Russia: current aspects]. Saint-Petersburg, 2019, pp. 228-233 (In Russian).

12. Morozova K. N. [The impact of the pandemic on container shipping in the China-Russia direction]. *VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Sovremennye koncepcii i paradigmy obrazovaniya v usloviyah mirovogo epidemiologicheskogo krizisa»* [VI International Scientific and Practical Conference «Modern concepts and paradigms of education in the context of the global epidemiological crisis»]. Rostov-on-Don, 2020, pp. 237-241 (In Russian).

13. Zhavoronkov N. A., Zaretskaya E. V., Mitroshin S. G. Transport and technological multimodal systems with the participation of inland waterway transport as one of the key integrating elements. *Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta – The Bulletin of VSAWT*, 2018, no. 55, pp. 124-133 (In Russian).

14. Kim V. R. Prospects for the development of container cargo transportation between Russia and China. *Molodoj uchenyj – The Journal of Young scientist*, 2021, no. 1(343), pp. 175-177 (In Russian).

15. *Vremya vozmozhnostej: «Amurskoe parohodstvo» vyvezet rossijskij ugol' v Kitaj* [A time of opportunity: Amur Shipping Company to export Russian coal to China]. Available at: <https://www.dvnovosti.ru/khab/2022/08/01/144534/> (accessed 15.09.2022).

16. Zaostrovskikh E. A. The state and prospects of development of inland waterway transport of the Russian Far East. *Regionalistika – The Journal of Regionalistica*, 2017, vol. 4, no. 3, pp. 35-47 (In Russian).

17. Korol R. G. Certificate of registration of the computer program RU 2022661061, 14.06.2022.

18. *Kak Rossiya i Kitaj sobirayutsya narastit' vzaimnuyu trgovlyu do \$200 mlrd* [How Russia and China are going to increase mutual trade to \$200 billion]. Available at: <https://www.rbc.ru/economics/05/02/2022/61fd2b419a7947752427d700> (accessed 15.09.2022).

19. Pugachev I., Markelov G., Ostapenko A., Kulikov Y. Peculiarities of strategic transport development in the Russian far east and the Arctic. *Transportation Research Procedia: «International Conference of Arctic Transport Accessibility: Networks and Systems»*, 2021, pp. 511-517.

20. Popadyuk A. YU., Korovyakovskiy E. K. Problems of international cargo supply chains management. *Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij – The Bulletin of Scientific Research Results*, 2020, no. 2, pp. 100-110 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Король Роман Григорьевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология транспортных процессов и логистика», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

Числов Олег Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Станции и грузовая работа», РГУПС.

Тел.: +7 (863) 272-64-73.

E-mail: sgr@rgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Король, Р. Г. Транспортно-логистическая архитектура мультимодальных перевозок Амурского бассейна / Р. Г. Король, О. Н. Числов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 145 – 155.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korol Roman Grigorievich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor, head of the department «Technology of Transport Processes and Logistics», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

Chislov Oleg Nikolevich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia pl., Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Stations and Cargo Work», RSTU.

Phone: +7 (863) 272-64-73.

E-mail: sgr@rgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Korol R.G., Chislov O.N. Transport and logistics architecture of multimodal transportation of the Amur basin. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 3 (51), pp. 145-155 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- управление процессами перевозок;
- железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- теоретическая и прикладная теплотехника;
- энергетические системы и комплексы;
- электроэнергетика;
- электротехнические комплексы и системы;
- автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционного совета журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления материалов научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию Журнала представляются:

1. Текст статьи на бумаге формата А4.
2. Текст статьи в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc или фамилия.docx.
3. Экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати (по форме, принятой в организации авторов).
4. Отчет о проверке на заимствования в системе «Антиплагиат» (<https://www.antiplagiat.ru/>). Оригинальность должна составлять не менее 80 %.

5. Гарантийное письмо о передаче авторского права с подписями всех соавторов статьи.

В тексте статьи обязательно указывается тематический раздел журнала, в который подается статья и научная специальность, которой она соответствует.

Текст 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 (объем списка литературы – не менее 10 наименований), транслитерацию и перевод списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках. Текст 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.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим основные фактические сведения и выводы описываемой работы; текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен 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 (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (0); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»; в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (-); необходимо использовать французские кавычки («ёлочки»);

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт; межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см; автоматическую нумерацию необходимо полностью исключить; инициалы и фамилии не должны отделяться друг от друга;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде; рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следуют списки 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* (рекомендуется 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100–2018; в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется в соответствии с образцом (прилагается);

при публикации научной статьи на русском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках; публикация статей с полным текстом на иностранном языке не допускается.

Материалы статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число авторов статьи не должно превышать трех человек, в ином случае необходимо отдельное согласование с редакцией. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц без учета аннотаций и списков литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также 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 разных выпусках Журнала.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией окончательного текста. Принятые к публикации материалы статей не возвращаются авторам. Материалы, оформленные с нарушением указанных выше требований, 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»

№ 3 (51) 2022

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), реестровый номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в официальном каталоге «Подписные издания» АО «Почта России» – ПП914.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издание выходит с периодичностью 4 выпуска в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии:

644046, Омская область, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;

тел.: +7 (3812) 31-05-54;

e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 26.09.2022.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 30.09.2022.

