

ИЗВЕСТИЯ

№ 1(45)

2021

Транссиб



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

EDITORIAL BOARD

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Харламов В. В., Попов Д. И., Байсадыков М. Ф., Супоня Д. В. Разработка методики предиктивного анализа ресурса щеток тяговых электродвигателей подвижного состава по условиям эксплуатации.....2
- Лобыцын И. О., Панков И. А., Худонов А. М. Исследование твердости лакового слоя изоляционных пальцев тягового электродвигателя локомотива при конвективном и терморрадиационном способах сушки.....11
- Плаксин А. В. О выборе оптимального значения мощности электровоза по минимуму расхода электрической энергии.....22
- Коропец П. А., Кашуба А. В. Интеллектуальное управление тягой в системе «колесо – рельс».....32
- Амиров С. Ф., Якубов М. С., Исраилов У. Ш. Разработка модели ресурса и управление техническим состоянием асинхронного тягового двигателя электроподвижного состава.....40
- Сидоров О. А., Михайлов М. С., Москалюк Б. М. Совершенствование методики испытаний токоприемников электроподвижного состава с учетом ударных воздействий.....48
- Кривошея Ю. В. Оценка влияния термического сопротивления среды, заполняющей микроконтактные зазоры области контакта, на тепловое состояние элементов дискового тормоза.....57
- Знаенок В. Н., Линьков А. О., Мельниченко О. В. Выпрямительно-инверторный преобразователь электровоза на базе IGBT-транзисторов как способ повышения пропускной способности участков железной дороги.....66
- Майба И. А., Глазунов Д. В. Трибологические испытания антифрикционных материалов для смазывания колес подвижного состава.....75
- Моисеев В. И., Жебанов А. В. Расчет тепловой модели вагона-цистерны для перевозки нефтепродуктов.....85
- Шестакова В. Д., Иванов П. Ю., Иванов В. Н. К вопросу повышения надежности и долговечности тяговых электродвигателей тепловозов.....95

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Романенко В. В., Невзорова А. Б. Оценка технического состояния кривых участков железнодорожного пути для их паспортизации.....104

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

- Верёвкина О. И. Анализ сезонной динамики показателя количества отклонений геометрии рельсовой колеи от норматива второй степени на инфраструктуре ОАО «РЖД», на сетевом и региональном уровнях.....114
- Ли Т. Е., Король Р. Г. Развитие транспортного узла Пусан для организации транскорейских железнодорожных перевозок.....122

Энергетические системы и комплексы

- Финиченко А. Ю., Глухова М. В., Глухов С. В. Использование теплонасосных установок для обеспечения потребителей тепловой энергией.....133

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Митрохин В. Е., Зиновьев Н. В. Использование пассивных ретрансляторов для улучшения качества радиосвязи в сложной электромагнитной обстановке.....142

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения

(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков, Д. В. Супоня

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

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА РЕСУРСА ЩЕТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПО УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. В настоящее время актуальным направлением развития сферы железнодорожного транспорта является снижение эксплуатационных затрат на обслуживание и ремонт коллекторных тяговых электродвигателей (ТЭД). Анализ данных мониторинга работы нового подвижного состава показывает, что одним из элементов, влияющих на надежность работы ТЭД, является коллекторно-щеточный узел (КЩУ). Отказы, связанные с неудовлетворительной работой элементов КЩУ, достигают 30 % от общего числа отказов ТЭД. При работе ТЭД происходит непрерывный процесс механического, электрического и химического взаимодействия электрических щеток с коллектором, ведущий к износу электрических щеток. При проведении исследований авторами предложена математическая модель для определения интенсивности изнашивания электрических щеток. В статье приводятся сведения по разработке подхода, позволяющего использовать данные эксплуатации, фиксируемые бортовой системой мониторинга параметров локомотива, для определения ресурса щеток ТЭД. Для устранения проблем, связанных с обработкой больших массивов значений параметров для расчета, предложено в математической модели интенсивности изнашивания электрических щеток производить разбиение получаемых данных на интервалы с определением средних значений и вероятности попадания по каждому из них, а также приводится методика по реализации предложенного решения. Разработанный подход позволяет исключить необходимость проведения длительных износных испытаний на ТЭД в эксплуатации и снизить не только временные, но и финансовые затраты. Оценка достоверности разработанного способа осуществлялась путем сопоставления значений величины износа разных типов электрических щеток, установленных на ТЭД локомотивов в эксплуатации, и расчетными значениями.

Ключевые слова: тяговый двигатель, электрические щетки, износ щеток, режимы работы, прогнозирование, коллекторно-щеточный узел.

Viktor V. Kharlamov, Denis I. Popov, Marsel F. Baysadykov, Dmitry V. Suponya

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

DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE ANALYSIS METHODOLOGY REGARDING BRUSH LIFE FOR ROLLING STOCK TRACTION MOTORS ACCORDING TO OPERATING CONDITIONS

Abstract. At this time, an urgent area of development in the field of railway transport is the reduction of operating costs for maintenance and repair of collector traction motors. The analysis of data from the monitoring of new rolling stock shows that one of the elements affecting the reliability during the operation of traction motors is the collector-brush unit. Failures associated with unsatisfactory operation of the collector-brush unit elements reach 30% of the total number for traction motors. At work of traction electric motors there is a continuous process of mechanical, electric and chemical interaction of electric brushes with a collector, leading to deterioration of electric brushes. During the research, the authors proposed a mathematical model to determine the intensity of wear of electric brushes. The paper provides information about developing an approach that allows using the operating data recorded by locomotive on-board parameter monitoring system to determine the service life of traction motor brushes. For elimination of the problem connected with processing of big arrays of parameter values for calculation, in mathematical model of intensity of wear of electric brushes it is offered to divide the received data into intervals with definition of average values and probability of approach for each of them, and also the technique on realization of the offered decision is resulted. The developed approach allows us to eliminate the need for long-term wear tests on traction motors in operation and reduce not only time, but also financial costs. The reliability of the developed method was assessed by comparing the wear values of different types of electric brushes installed on locomotive traction motors in operation with the calculated values.

Keywords: traction motor, electric brushes, brush wear, operating modes, prediction, collector-brush assembly.

В настоящее время на сети железных дорог России широко эксплуатируется электроподвижной состав, оснащенный коллекторными тяговыми электродвигателями. Продолжается разработка электровозов и тепловозов новых серий, оснащенных коллекторными ТЭД. Это говорит о том, что отрасль железнодорожных перевозок не планирует в ближайшей перспективе отказываться от тяговых коллекторных двигателей постоянного тока. ТЭД являются одним из ключевых факторов, влияющих на эксплуатационную надежность и работоспособность подвижного состава железных дорог, поскольку их выход из строя является причиной до 30 % отказов электровозов и тепловозов. Расширение локомотивного парка, оснащенного коллекторными ТЭД, во многом ограничивается недостаточной надежностью работы элементов коллекторно-щеточного узла и значительными затратами на его обслуживание в процессе эксплуатации, что часто нивелирует другие их преимущества [2].

Инструментом обеспечения эксплуатационной надежности в настоящее время является относительно затратная система планово-предупредительных ремонтов техники и оборудования железных дорог, которая с учетом необходимости снижения издержек на эксплуатацию подвижного состава в перспективе должна быть замещена сначала системой плановых ремонтов с учетом технического состояния, а затем и системой обслуживания по фактическому техническому состоянию. При этом неизбежно потребуются совершенствование существующих и разработка новых средств технического контроля и диагностики оборудования подвижного состава, в том числе ТЭД.

Анализ неисправностей ТЭД показывает, что в настоящее время наиболее частыми причинами возникновения отказов являются пробой изоляции обмотки якоря, повреждение элементов коллекторно-щеточного узла, нарушение рабочей поверхности коллектора, щеточного аппарата и др. На долю элементов КЩУ приходится более 25 % от общего числа отказов ТЭД. Одним из основных показателей надежности КЩУ является как ресурс его работы в целом, так и составляющих его элементов, в первую очередь таких, как электрические щетки.

В результате анализа работ, посвященных вопросу исследования износа электрических щеток [3 – 6, 11], получена уточненная математическая модель определения интенсивности изнашивания электрических щеток, в которой процесс изнашивания рассматривается как совместное действие трех составляющих: фрикционной, электрокоррозионной, электроэрозионной [7, 9, 10]:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = (n \cdot P_{\text{ср. щ}}) \cdot K_{\text{ф}} + (n^4 \cdot I_a^2 \cdot P_{\text{ср. щ}}^2) \cdot K_{\text{эк}} + (n \cdot W_{\text{и}}) \cdot K_{\text{эр}}, \quad (1)$$

где t – время;

n – частота вращения якоря;

$P_{\text{ср. щ}}$ – средняя величина давления на щетку;

I_a – ток якоря;

$W_{\text{и}}$ – энергия искрения;

$K_{\text{ф}}$ – коэффициент фрикционного износа;

$K_{\text{эк}}$ – коэффициент электрокоррозионного износа;

$K_{\text{эр}}$ – коэффициент электроэрозионного износа.

Коэффициенты составляющих износа $K_{\text{ф}}$, $K_{\text{эк}}$, $K_{\text{эр}}$ могут быть найдены из опытных данных согласно разработанной методике [9], позволяющей определять их без проведения длительных экспериментальных исследований и применения дорогостоящего оборудования. Представленная математическая модель (1) позволяет определять интенсивность изнашивания электрической щетки в зависимости от основных параметров эксплуатации при их установившихся значениях. Однако стоит учесть, что в процессе эксплуатации частота вращения и ток ТЭД не являются постоянной величиной и подвержены постоянному изменению, обусловленному режимами ведения поезда, в связи с чем будет наблюдаться и постоянное изменение значения $\Delta I/\Delta t$. Для учета этого воздействия представленная модель (1) может быть

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

уточнена путем замены средних значений параметров n , I_a на данные эксплуатации, получаемые с бортовой системы локомотива.

Системы мониторинга, установленные на современном подвижном составе, позволяют производить фиксацию большинства параметров движения [12], в том числе тока якоря I_a каждого из ТЭД, скорости движения локомотива V , напряжения на двигателях, мощности ТЭД и др. Выходные данные, получаемые с системы мониторинга, представляют собой массивы значений по изменению параметров каждого из установленных ТЭД, регистрируемых с высокой точностью.

Из представленных данных для расчета воспользуемся следующими:

V – скорость движения локомотива, км/ч;

I_a – ток якоря ТЭД, А.

В связи с тем, что данные, получаемые с системы мониторинга, фиксируются с шагом до одной секунды, прямое их использование в расчете значительно усложняет его. Для удобства предлагается в математической модели (1) выявлять и использовать наиболее характерные режимы работы ТЭД путем разбиения полученных массивов значений на интервалы с определением средних значений и вероятности попадания по каждому из них. На рисунке 1 в качестве примера приведены гистограммы изменения параметров тепловоза марки 2ТЭ116У, полученных по данным эксплуатации.

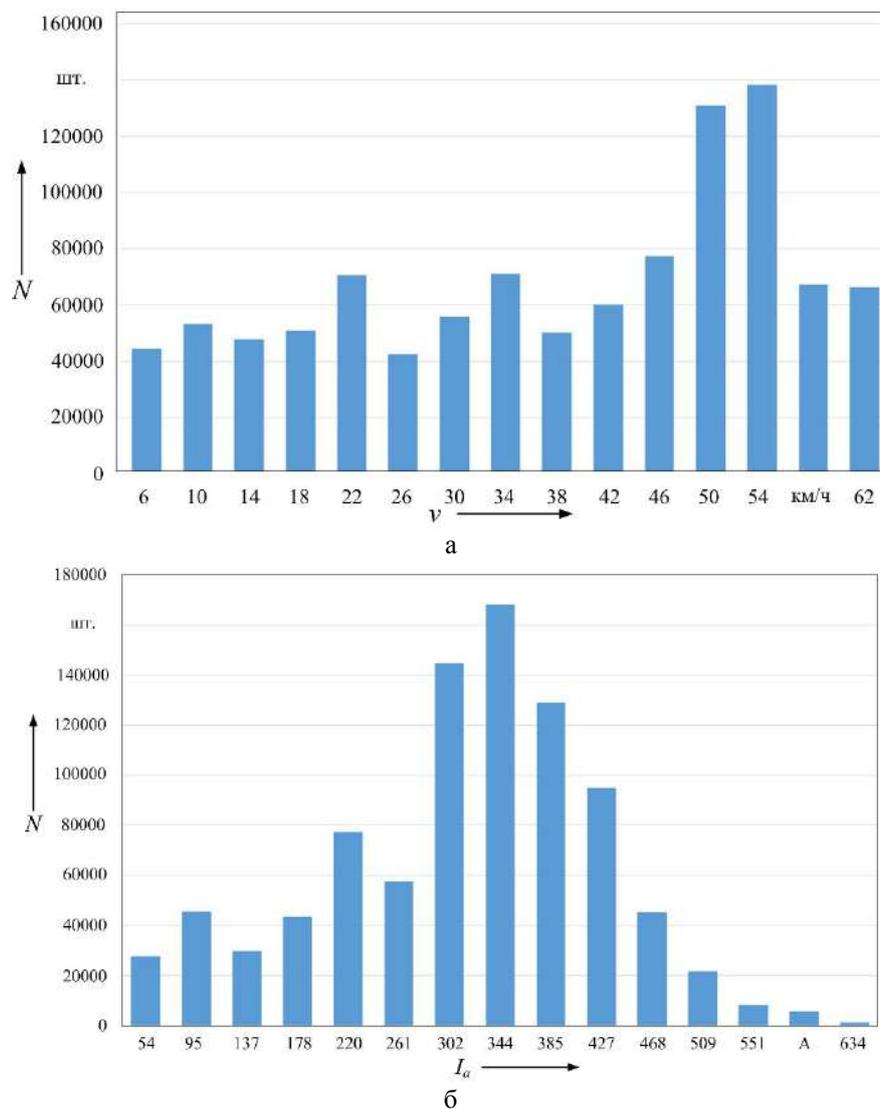


Рисунок 1 – Гистограммы изменения параметров локомотива:
а – скорость движения, б – ток якоря ТЭД

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для определения интенсивности износа электрических щеток по значениям показателей, полученных из системы мониторинга, получим показатели, подставляемые в математическую модель (1) в тех единицах измерения, для которых были рассчитаны коэффициенты составляющих износа.

Определим линейную скорость движения щетки по поверхности коллектора. Для этого используем данные по изменению скорости движения локомотива V :

$$V = \frac{\pi \cdot D_{к.п} \cdot n_{к.п}}{60}, \quad (2)$$

где $D_{к.п}$ – диаметр колесной пары локомотива, м;

$n_{к.п}$ – частота вращения колесной пары локомотива, об/мин.

Из формулы (2) выразим частоту вращения колесной пары локомотива:

$$n_{к.п} = \frac{60 \cdot V}{\pi \cdot D_{к.п} \cdot 3,6}. \quad (3)$$

Дальнейший пересчет частоты вращения ТЭД в линейную скорость перемещения поверхности коллектора относительно щетки производится по формуле:

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{к.п} \cdot \mu}{60}, \quad (4)$$

где D_k – диаметр коллектора ТЭД, м;

μ – передаточное отношение зубчатой передачи.

Определим плотность тока, протекающего по щетке, по значениям тока якоря ТЭД, полученным посредством системы мониторинга. Суммарная площадь контакта электрических щеток, установленных на ТЭД, с коллектором может быть рассчитана по формуле:

$$S_{щ} = \sum_{i=1}^m S_{щi} = \sum_{i=1}^m b_{щi} \cdot \delta_{щi}, \quad (5)$$

где m – количество щеток одной полярности, установленных на ТЭД;

$b_{щi}$ – ширина щетки (размер щетки вдоль направления линейной скорости поверхности коллектора под серединой щетки), см;

$\delta_{щi}$ – глубина щетки (размер щетки вдоль оси вращения якоря), см.

Плотность тока в щетке $j_{щ}$ рассчитаем по формуле:

$$j_{щ} = \frac{I_a}{S_{щ}}. \quad (6)$$

В результате получим массив значений по изменению плотности тока в щетке $j_{щ}$, выраженной в A/cm^2 .

Переведем значение усилия нажатия, зафиксированное в ходе измерений, в удельное по формуле:

$$p_{щ} = \frac{P}{S_{щ1}}, \quad (7)$$

где $p_{щ}$ – удельное нажатие на щетку, $кг/см^2$;

P – нажатие на щетку, кг;

$S_{щ1}$ – площадь одной щетки, $см^2$.

Расчет ресурса работы щеток осуществляется путем определения трех составляющих интенсивности износа.

1) Интенсивность фрикционного износа щеток, мм/ч,

$$\frac{\Delta I_{\phi}}{\Delta t} = 60 \cdot (V_{\text{ср}} \cdot p_{\text{щ}}) \cdot K_{\phi}. \quad (8)$$

Расчет производится по среднему арифметическому значению $V_{\text{к}}$, полученному из массива данных мониторинга.

2) Интенсивность электрокоррозионного износа щеток, мм/ч,

$$\frac{\Delta I_{\text{эк}}}{\Delta t} = 60 \cdot (V_{\text{к}}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}} \cdot p_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}}) \cdot K_{\text{эк}}. \quad (9)$$

Для расчета данной составляющей износа из массивов значений $j_{\text{щ}}$ и $V_{\text{к}}$ необходимо рассчитать массив значений $V_{\text{к}}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}}$. Полученный массив рекомендуется разбить на равные интервалы. Пример гистограммы значений $V_{\text{к}}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}}$ приведен на рисунке 2.

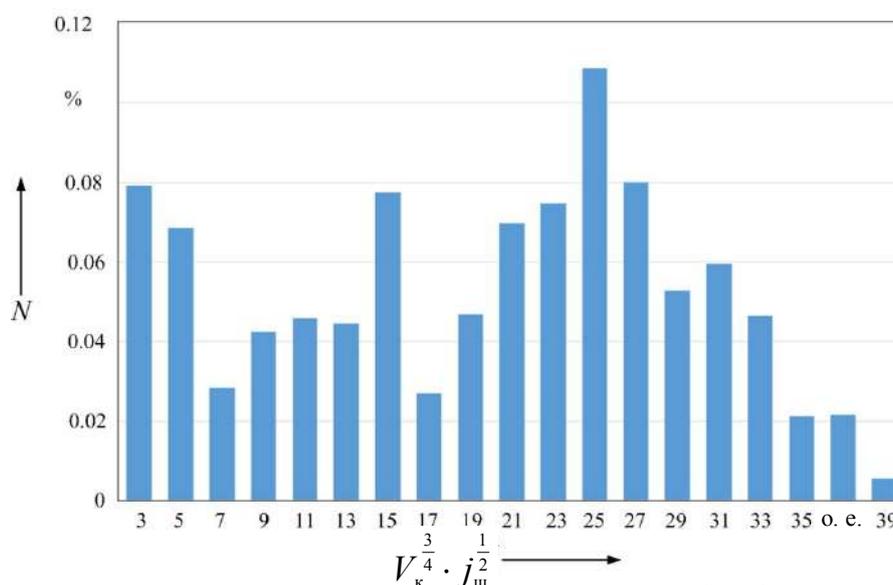


Рисунок 2 – Гистограмма изменения значений $V_{\text{к}}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}}$

Далее расчет интенсивности электрокоррозионного износа производится по выражению, мм/ч:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 60 \cdot K_{\text{эк}} \cdot \sum_j \left(V_{\text{к}j}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{\text{щ}j}^{\frac{1}{2}} \cdot f(V_{\text{к}}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}})_j \right) \cdot P_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

где j – количество интервалов разбиения;

$V_{\text{к}j}$ – среднее значение скорости на j -м интервале;

$j_{\text{щ}j}$ – среднее значение плотности тока в щетке на j -м интервале;

$f(V_{\text{к}}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}})_j$ – вероятность попадания значения $(V_{\text{к}}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}})_j$ в j -й интервал:

$$f(V_{\text{к}}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}})_j = \frac{N(V_{\text{к}}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}})_j}{N_{\text{общ}}}, \quad (11)$$

где $N(V_{\text{к}}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}})_j$ – количество точек, попадающих в j -й интервал;

$N_{\text{общ}}$ – общее число точек в массиве.

3) Интенсивность электроэрозионного износа щеток, мм/ч:

$$\frac{\Delta I_{\text{эп}}}{\Delta t} = 60 \cdot K_{\text{эп}} \cdot (V_{\text{ксп}} \cdot W_{\text{и}}) \quad (12)$$

При расчете данной составляющей интенсивности износа для каждого из значений тока якоря, содержащегося в массиве, полученном системой мониторинга, необходимо задать значение энергии искрения в зоне контакта «щетка – коллектор». При расчете предлагается степень искрения под щетками (по ГОСТ 183–74) определять косвенно по значению тока якоря ТЭД, по зависимости, которая была определена экспериментальным путем на испытательной станции в сервисном локомотивном депо.

Для объективной оценки энергии искрения при определении значения ΔI предлагается использовать прибор контроля коммутации ПКК-5. Шкала показаний данного прибора имеет относительные единицы, которые соответствуют определенной энергии искрения $W_{\text{и}}$. Для расчетов шкала показаний прибора ПКК-5 была приведена в соответствие степеням искрения по ГОСТ 183–74 следующим образом: $W_{\text{и}} = 0$ о. е. – 1 балл, $W_{\text{и}} = 15$ о. е. – 1/4 балла, $W_{\text{и}} = 25$ о. е. – 1/2 балла. Заданные значения энергии искрения для каждого измерения системы мониторинга образуют собой массив значений $W_{\text{и}k}$.

Далее интенсивность электроэрозионного износа щеток определяется в соответствии с массивом значений $W_{\text{и}k}$ по выражению, мм/ч:

$$\frac{\Delta I_{\text{эп}}}{\Delta t} = 60 \cdot K_{\text{эп}} \cdot \sum_k (V_{\text{кк}} \cdot W_{\text{и}k}), \quad (13)$$

где k – номер значения в массивах скорости $V_{\text{к}}$ и энергии искрения $W_{\text{и}}$.

Интенсивность износа щетки за один час, обусловленную тремя составляющими, необходимо вычислять по формуле, мм/ч:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 60 \cdot K_{\text{ф}} \cdot V_{\text{ксп}} \cdot P_{\text{щ}} + 60 \cdot K_{\text{эк}} \cdot \sum_j \left(V_{\text{к}j}^4 \cdot j_{\text{щ}j}^2 \cdot f(V_{\text{к}j}^4 \cdot j_{\text{щ}j}^2) \right) \cdot P_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}} + 60 \cdot K_{\text{эп}} \cdot \sum_k (V_{\text{кк}} \cdot W_{\text{и}k}). \quad (14)$$

Износ на 10000 км можно найти по выражению, мм:

$$\Delta I_{10000} = \frac{10000}{V_{\text{тсп}}} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (15)$$

где $V_{\text{тсп}}$ – средняя скорость движения тепловоза в соответствии с полным массивом данных.

Остаточный ресурс щетки вычисляется по формуле, мм:

$$T_{\text{ост}} = h_{\text{нач}} - \Delta I_{10000} \cdot \frac{L_{\text{тек}}}{10000}, \quad (16)$$

где $h_{\text{нач}}$ – начальная высота щетки, мм;

$L_{\text{тек}}$ – текущий пробег тепловоза от момента замены щеток, км.

В рамках исследований произведено сопоставление значений величины износа разных типов электрических щеток, установленных на ТЭД ЭД133, полученных при их эксплуатации в составе тепловозов серии 2ТЭ116У, со значениями, полученными с применением разработанного способа определения ресурса электрических щеток ТЭД.

Оценка достоверности математической модели осуществлялась путем сопоставления значений величины износа разных типов электрических щеток, установленных на ТЭД локомотивов в эксплуатации, с расчетными значениями [1]. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Приведенные результаты подтверждают достаточно высокую достоверность разработанной математической модели определения интенсивности изнашивания электрических щеток. Расхождение в результатах расчетов связано с тем, что при расчете износа электрических щеток не учитывались настройка магнитодвижущей силы добавочных полюсов ТЭД и состояние профиля коллектора ТЭД.

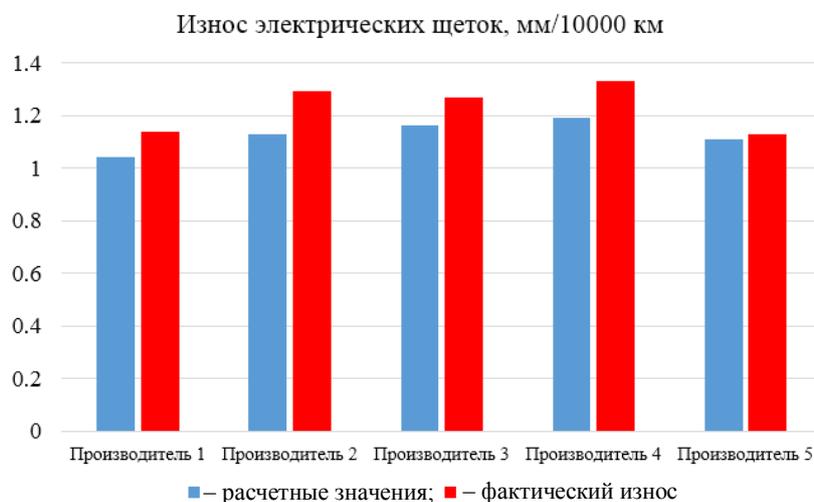


Рисунок 3 – Износ электрических щеток за 10 тыс. км пробега

Полученные в результате расчета величины износа электрощеток, установленных на ТЭД тепловозов 2ТЭ116У, с учетом данных эксплуатации позволили определить соотношение различных составляющих износа, приведенное на рисунке 4.

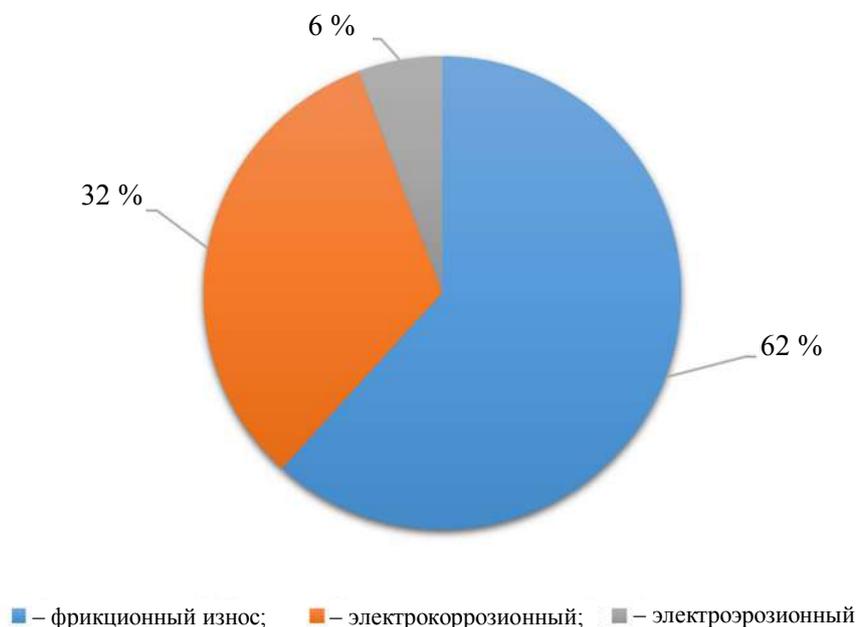


Рисунок 4 – Соотношение составляющих износа в условиях эксплуатации

Предложенная математическая модель позволяет с достаточной точностью оценивать ресурс работы электрических щеток с учетом режимов работы ТЭД локомотивов без необходимости проведения длительных износных испытаний, что ведет к снижению как финансовых, так и временных затрат на проведение исследований. Применение приведенного подхода к расчету износа щеток позволяет с применением данных бортовой системы мониторинга параметров обеспечить минимальную интенсивность изнашивания щеток за счет учета режимов работы локомотива.

Список литературы

1. Байсадыков, М. Ф. Оценка и прогнозирование износа электрических щеток тяговых двигателей с применением теории подобия / М. Ф. Байсадыков, Д. В. Супоня, П. К. Шкодун. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы V всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2019. – С. 222 – 229.
2. Ермолин, Н. П. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. Л. Жирихин. – Ленинград : Энергия, 1976. – 248 с. – Текст : непосредственный.
3. Забоин, В. Н. Научно-методологические основы расчета и проектирования систем токоъема электрических машин : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Забоин Валерий Николаевич ; Санкт-Петербургский технический университет. – Санкт-Петербург, 2004. – 32 с. – Текст : непосредственный.
4. Качин, О. С. Увеличение ресурса скользящего контакта электрических машин : монография / О. С. Качин, С. И. Качин. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 165 с. – Текст : непосредственный.
5. Крагельский, И. В. Основы расчета на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – Москва : Машиностроение, 1977. – 526 с. – Текст : непосредственный.
6. Мышкин, Н. К. Электрические контакты / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный : Интеллект, 2008. – 560 с. – Текст : непосредственный.
7. Патент № 2677243 Российская Федерация, МПК H01R 39/58. Способ определения ресурса щеток тяговых коллекторных электродвигателей : № 2017125902 : заявлено 18.07.2017 : опубликовано 16.01.2019 / Харламов В. В., Попов Д. И., Байсадыков М. Ф. ; патентообладатель Омский государственный университет путей сообщения. – 11 с. – Текст : непосредственный.
8. Совершенствование технологии диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых двигателей электровозов : монография / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова, Д. А. Ахунов. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2015. – 198 с. – Текст : непосредственный.
9. Харламов, В. В. Методика определения параметров математической модели износа электрических щеток / В. В. Харламов, М. Ф. Байсадыков, Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 109 – 116.
10. Харламов, В. В. Определение интенсивности изнашивания электрических щеток коллекторных машин постоянного тока с учетом воздействия профиля коллектора / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков. – Текст : непосредственный // Проблемы машиноведения : материалы международной научно-технической конференции. – Омск : Омский государственный технический университет, 2019. – С. 302 – 309.
11. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1961. – 464 с. – Текст : непосредственный.
12. Электровоз 2ЭС6 «Синара» / под ред. В. В. Брексона. – Верхняя Пышма : ООО «Уральские локомотивы», 2015. – 328 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Baysadykov M. F., Shkodun P. K., Suponya D. V. Evaluation and prediction of traction motor electrical brushes wear using similarity theory [Oценка i prognozirovanie iznosa elektricheskikh shchetok tyagovykh dvigatelej s primeneniem teorii podobiya]. *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava : materialy V*

vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (Technological support of repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock : materials of V All-Russian scientific and technical conference with international participation). – Omsk, 2019, pp. 222 – 229.

2. Ermolin N. P., Zhirikhin I. L. *Nadezhnost' elektricheskikh mashin* [Reliability of electric motors]. Leningrad: Energy Publ., 1976, 248 p.

3. Zaboyn V. N. *Nauchno-metodologicheskie osnovy rascheta i proektirovaniya sistem tokos'ema elektricheskikh mashin* [Scientific and methodological basis for the calculation and design of current collector systems for electrical machines]. Doctor of engineering sciences thesis, Saint-Petersburg, SPBSTU, 2003, 314 p.

4. Kragelskiy S. V. *Osnovy rascheta na trenie i iznos* [Basics of calculation for friction and wear]. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 1977, 526 p.

5. Kachin O. S., Kachin S. I. *Uvelichenie resursa skolzyashchego kontakta elektricheskikh mashin : monografiya* [Increasing the Service Life of Sliding Contact of Electrical Machines : Monography]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 165 p.

6. Myshkin N. K., Konchic V. V., Braunovich M. *Elektricheskie kontakty* [Electric contacts]. Dolgoprudny: Intellect Publ., 2008, 560 p.

7. Harlamov V. V., Popov D. I., Baysadykov M. F. *Patent RU 2677243 C2*, 16.01.2019.

8. Harlamov V. V., Shkodun P. K., Dolgova A. V., Ahunov D. A. Improving the technology for diagnosing the technical condition of the collector-brush unit of electric locomotive traction motors: monography [*Sovershenstvovanie tekhnologii diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh dvigatelej elektrovozov: monografiya*]. Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2015, 198 p.

9. Kharlamov V. V., Popov D. I., Baysadykov M. F. Method for determining the parameters of the mathematical model of wear of electric brushes [Metodika opredeleniia parametrov matematicheskoi modeli iznosa elektricheskikh shchetok]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: Materialy nauchnoi konferentsii* (Innovative projects and technologies in education, industry and transport: Materials of the scientific conference). – Omsk, 2017, pp. 109 – 116.

10. Kharlamov V. V., Popov D. I., Baysadykov M. F. Determination wear intensity of electrical brushes in DC machines considering impact of collector's [Opredelenie intensivnosti iznashivaniya elektricheskikh shchetok kollektornykh mashin postoyannogo toka s uchetom vozdeystviya profilya kollektora]. *Problemy mashinovedeniya : materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii* (Problems of Mechanical Engineering: Materials of the III International Scientific and Technical Conference). – Omsk, 2019, pp. 302 – 309.

11. Holm R. *Elektricheskie kontakty* [Electric contacts]. Moscow: Publishing house of foreign literature, 1961, 464 p.

12. Brexon V. V. *Elektrovoz 2ES6 «Sinara»* (Electric locomotive 2ES6 «Sinara»). Verknaya Pyshma: «Ural Locomotives» Publ., 2015, 328 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: HarlamovVV@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Viktor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Electric machines and electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: HarlamovVV@omgups.ru

Попов Денис Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: PopovDI@omgups.ru

Popov Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Electric machines and electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: PopovDI@omgups.ru

Байсадыков Марсель Фаритович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Заведующий лабораториями кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: baysadykov.marsel@yandex.ru

Baysadykov Marsel Faritovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Head of laboratory of the department «Electric machines and electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: baysadykov.marsel@yandex.ru

Супоня Дмитрий Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: SuponyaDV@omgups.ru

Suponya Dmitry Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Graduate student of the department «Electric machines and electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: SuponyaDV@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харламов, В. В. Разработка методики предиктивного анализа ресурса щеток тяговых электродвигателей подвижного состава по условиям эксплуатации / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков, Д. В. Супоня. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 2 – 11.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Harlamov V. V., Popov D. I., Baysadykov M. F., Suponya D. V. Development of a predictive analysis methodology regarding brush life for rolling stock traction motors according to operating conditions. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 1 (45), pp. 2 – 11 (In Russian).

УДК 621.33

И. О. Лобыцин¹, И. А. Панков², А. М. Худоногов¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация;

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСТИ ЛАКОВОГО СЛОЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПАЛЬЦЕВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЛОКОМОТИВА ПРИ КОНВЕКТИВНОМ И ТЕРМОРАДИАЦИОННОМ СПОСОБАХ СУШКИ

Аннотация. В статье описано исследование механической характеристики полимерной изоляции, в частности, твердости электроизоляционного лакового слоя при различных способах ее сушки. Проанализировано влияние твердости и эластичности высушенного пропиточного материала на надежность изоляционных конструкций при эксплуатации электрического оборудования тягового подвижного состава. Создано и представлено устройство, позволяющее осуществить незатруднительное измерение твердости лаковой пленки на заранее выбранном объекте исследования, которым стал изоляционный палец кронштейна щеткодержателя

тягового двигателя электровоза. Представлен процесс замера твердости и результаты для трех групп изоляционных пальцев: изоляционные пальцы без покрытия пропиточным составом (пресс-материал); пропиточный материал, запекаемый конвективным способом; пропиточный материал, запекаемый терморадикационным способом. На основании полученных практических результатов объясняется влияние энергоподвода на процесс затвердевания при выполнении сушки конвективным и терморадикационными способами. Представлены также снимки электроизоляционного лакового слоя с электронного микроскопа, позволяющие произвести оценку микроструктуры на наличие газовых включений, негативно влияющих как на механические, так и на электрические показатели полимерной изоляции. Было выполнено исследование зависимости между параметрами электрической и механической прочности. На основании экспериментальных данных была построена зависимость величины пробивного напряжения от величины твердости электроизоляционного лакового слоя.

Ключевые слова: тяговый двигатель, электроизоляционный материал, твердость полимеров, механическая прочность, терморадикационная сушка, электрическая прочность, изоляционные пальцы, тяговый подвижной состав.

Igor O. Lobytsin¹, Igor A. Pankov², Anatoliy M. Khudonogov¹

¹Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, the Russian Federation;

²Joint Stock Company «Railway Research Institute» (JSC «VNIIZHT»), Moscow, the Russian Federation

RESEARCH OF THE HARDNESS OF THE VARNISH LAYER OF THE INSULATION FINGERS OF THE LOCOMOTIVE TRACTION ELECTRIC MOTOR WITH THE CONVECTIVE AND THERMO-RADIATION DRYING METHODS

Abstract. The article describes the study of the mechanical characteristics of polymer insulation, in particular the hardness of the insulating lacquer layer with a different methods of drying it. The influence of the hardness and elasticity of the dried impregnating material on the reliability of the insulating structures during the operation of electrical equipment of the traction rolling stock is analyzed. A device has been created and presented that allows for a simple measurement of the hardness of the varnish film on a pre-selected object of study, which was the insulating finger of the bracket of the brush holder of an electric locomotive traction motor. The process of measuring hardness and results for three groups of insulating fingers are presented: insulating fingers without coating by an impregnating compound (press material); impregnating material, sealed by convective method; impregnating material baked by thermoradiation method. On the basis of the obtained practical results, the effect of the energy supply on the curing process when performing drying by the convective and thermoradiation methods is explained. Also presented are photographs of an electrically insulating lacquer layer from an electron microscope, which allow the microstructure to be evaluated for the presence of gas inclusions, which have a negative effect on both mechanical and electrical indicators of polymeric insulation. A study was made of the relationship between the parameter of electrical and mechanical strength. On the basis of experimental data, the dependence of the breakdown voltage on the hardness of the insulating lacquer layer was constructed.

Keywords: traction motor, electrical insulation material, polymer hardness, mechanical strength, thermal radiation drying, electrical strength, insulating fingers, traction rolling stock.

На протяжении нескольких предшествующих десятилетий тяговое электромашиностроение развивалось в направлении повышения использования машин, увеличения нагрузок активных материалов и снижения массы на единицу мощности. Однако запас прочности и устойчивости к перегрузкам постепенно снижались, в результате чего наметилась тенденция общего снижения надежности электрических машин тягового подвижного состава.

Оценить техническое состояние локомотивов и определить надежность их работы представляется возможным только после проведения углубленного анализа статистики внеплановых ремонтов тягового подвижного состава за последние несколько лет. Учет внеплановых ремонтов электровозов выполняет общество с ограниченной ответственностью «ЛокоТех-Сервис», являющееся передовой организацией по сервисному обслуживанию и ремонту тягового подвижного состава страны. По данным ООО «ЛокоТех-Сервис» за период 2016 – 2019 гг. наблюдалось следующее распределение отказов для локомотивов, эксплуатация которых осуществляется в границах Восточно-Сибирской железной дороги: на тяговые электродвигатели приходится порядка 28 %; по электрическому оборудованию – 30 %; по механическому оборудованию – 25 %; по тормозному и пневматическому оборудованию – 7 %; прочие отказы, относящиеся к малым группам, – 10 %.

Анализ силового оборудования электровоза показывает, что одними из наиболее повреждаемых узлов являются тяговые электрические машины, интенсивная эксплуатация которых приводит к старению электрической изоляции, при этом механические, электрические и химические свойства в значительной степени ухудшаются. Если не принять соответствующих мер поддержания и восстановления изоляции, то процесс будет носить необратимый характер и завершится электрическим пробоем [1]. Для предотвращения данного явления необходимо акцентировать пристальное внимание на диэлектрических свойствах полимерного изоляционного материала после его запекания, которые зависят от механических характеристик кристаллизуемого пропиточного изоляционного состава.

Механические свойства полимерных материалов напрямую зависят от их структурной модификации, а также от фазового состояния при изготовлении объекта и его последующей эксплуатации. В связи с этим должное внимание необходимо уделить исследованию зависимости между фазовым состоянием полимерного материала и его механическими свойствами. Определение данной связи позволит достичь оптимальных условий применения полимеров на тяговом подвижном составе с последующим синтезом новых технологий изготовления для улучшения имеющихся свойств изоляции. Основными механическими свойствами изоляционных полимерных материалов являются следующие характеристики: твердость, эластичность, пределы прочности при растяжении и сжатии, при статическом и динамическом изгибе [2]. Для определения числовых значений этих характеристик применяется достаточно большое количество методов, реализуемых исключительно на высокочувствительном и дорогостоящем оборудовании.

В процессе изготовления и восстановления изоляционных конструкций тягового подвижного состава отдельное внимание уделяется электрической прочности электроизоляционного материала. Высокая стойкость к электрическому пробоему при разрушении диэлектрика может сохраняться в процессе эксплуатации лишь при наличии многих других взаимосвязанных параметров, одним из таких параметров является механическая прочность изоляции, наибольшая эффективность данного параметра часто достигается путем получения оптимальных величин твердости и эластичности в процессе сушки изоляции [3, 4]. Достижение наилучшего соотношения значений твердости и эластичности позволяет предотвратить образование остаточной деформации электроизоляционного материала, трещин и расслоений поверхности лакового слоя под воздействием механических усилий, которые возникают в процессе работы щеточного аппарата, а также при интенсивных вибрационных процессах от вращения коллектора якоря тягового электродвигателя.

Определить те или иные механические характеристики изоляционных материалов электрооборудования тягового подвижного состава затруднительно. Причиной тому в первую очередь служит малая толщина отвержденного полимера на поверхности изоляционных конструкций после сушки, не позволяющая измерить всех необходимых параметров без применения высокоточных лабораторных комплексов. Во-вторых, проблема определения механических параметров часто связана с неоднородностью материалов изолируемых объектов, что приводит к неизбежным высоким погрешностям при замере менее чувствительными устройствами [5, 6].

В рамках исследовательской работы по определению механических свойств изоляции необходимо подобрать наиболее подходящей объект, благодаря которому нахождение хотя бы одного из параметров стало возможным без использования высокотехнологичной аппаратуры. Поэтому объектом исследования был выбран изоляционный палец кронштейна щеткодержателя тягового двигателя локомотива, рабочая поверхность которого позволяет осуществить измерение твердости электроизоляционной лаковой пленки в лабораторных условиях.

В разрезе вид изоляционного пальца тягового электродвигателя постоянного тока типа НБ 514 изображен на рисунке 1. Изоляционный палец состоит из стального стержня 1 с нанесенным на него пресс-материалом 2, покрытым электроизоляционным лаком 3. Для

получения установленной геометрической формы изоляционного пальца в заводских условиях производится опрессовка стальных шпилек терморезистивным стеклонаполненным пресс-материалом марки АГ-4В, при этом весь процесс выполняется согласно утвержденной технологии изготовления, благодаря этому твердость сформированного пресс-материала остается максимально одинаковой не только у одного, но и у всех выпущенных объектов. Заключительный этап изготовления изоляционных пальцев ТЭД состоит в нанесении изоляционного пропиточного лака марки ФЛ-98 на поверхность пресс-материала и в последующем отверждении путем теплового воздействия. Стоит отметить, что нанесение и сушка электроизоляционного лака выполняются как при изготовлении объекта, так и при восстановлении его в заводских и деповских условиях [7, 8].

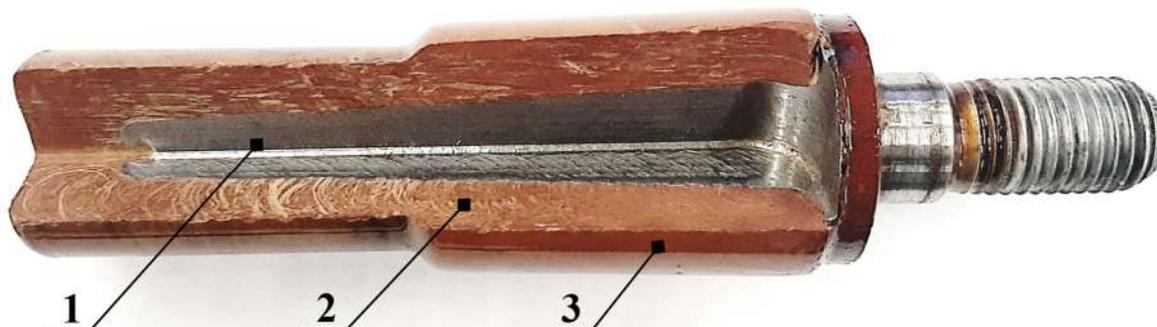


Рисунок 1 – Изоляционный палец тягового электродвигателя постоянного тока типа НБ 514 в разрезе:
1 – стальной стержень (шпилька); 2 – пресс-материал; 3 – электроизоляционный лак

В зависимости от выбора технологии восстановления изоляционных пальцев, в частности способа теплового воздействия на пропиточный изоляционный материал (терморезистивный или конвективный), процесс кристаллизации лака будет различаться, что в итоге отражается на микроструктуре отвержденного лакового слоя. В связи с этим отличаются не только диэлектрические, но и механические свойства полимерного электроизоляционного материала, выраженные показателями эластичности и твердости.

Учитывая фактор неизменяющейся твердости внутреннего слоя, которым является пресс-материал, а также выбор способа энергоподвода и режимов сушки пропиточного состава, влияющих на твердость наружного изоляционного слоя, становится возможным выполнение научно-исследовательской работы по исследованию твердости лакового слоя изоляционных пальцев тягового электродвигателя локомотива.

Исследование твердости лакового слоя изоляционных пальцев ТЭД выполнялось на образцах, полученных в сервисном локомотивном депо по обслуживанию и ремонту тягового подвижного состава. Данные образцы прошли проверку на электрическую прочность на деповских установках высокого напряжения, о чем свидетельствует отметка в протоколе испытаний. В лабораторных условиях образцы подверглись очищению от имеющегося лакового изоляционного слоя, повторной пропитке и сушке при различных режимах, отличающихся не только способами энергоподвода, но и температурой нагрева и временем выдержки.

Полученные изоляционные пальцы с отвержденным лаковым слоем разделяются на три равные группы:

- 1-я группа – без покрытия пропиточным составом (только пресс-материал);
- 2-я группа – пропиточный материал, запекаемый конвективным способом;
- 3-я группа – пропиточный материал, запекаемый терморезистивным способом.

Определение твердости осуществлялось с помощью портативного динамического твердомера ТЭМП-3, принцип работы которого основывается на фиксации параметров импульса при отскоке шарика от изучаемой поверхности. Для получения наиболее точных показателей твердости лакового слоя необходимо выполнить замеры по всей поверхности изоляционного пальца, а именно по торцевой, цилиндрической и конической, при этом расположение датчика твердомера должно сохранять строго вертикальное пространственное положение и

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

перпендикулярное по отношению к измеряемой поверхности. На рисунке 2 представлены схемы положения датчика динамического твердомера относительно изоляционного пальца ТЭД в процессе определения твердости лакового слоя по различным поверхностям.

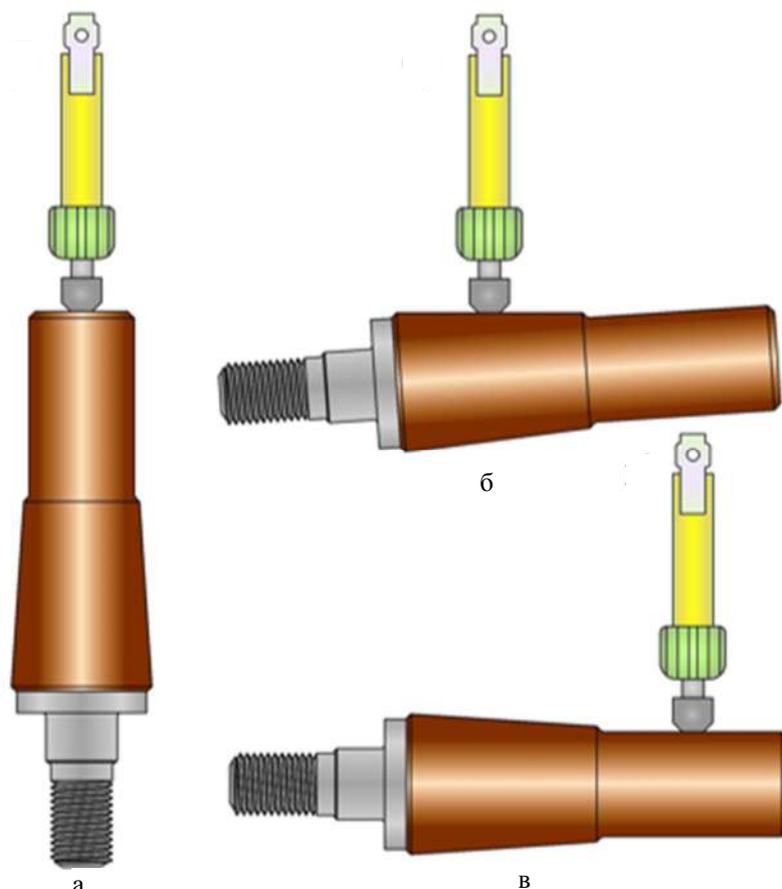


Рисунок 2 – Схемы положения датчика динамического твердомера ТЭМП-3 относительно изоляционного пальца ТЭД в процессе определения твердости лакового слоя на торцевой (а), конической (б) и цилиндрической (в) поверхностях

Высококочувствительный датчик фиксирует параметры скорости шара при отскоке его от исследуемой поверхности, после чего передает их на блок обработки данных, где происходят обработка сигнала и последующий вывод показания на цифровой дисплей в условных единицах HLD (по шкале Либя), которые можно перевести в единицы НВ (по шкале Бринелля) либо НР (по шкале Роквелла) при помощи специальных переводных таблиц. Для более точного определения твердости необходимо провести не менее пяти измерений на одной поверхности, результаты которых затем усредняются. Результаты определения твердости пресс-материала, электроизоляционного лакового слоя при терморadiационном и конвективном способах сушки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определения твердости полимерной изоляции динамическим твердомером

Номер опыта	Твердость определяется в единицах измерения шкалы Либя (HLD)		
	пресс-материал	терморadiационный способ сушки	конвективный способ сушки
1	810	600,8	635,5
2	809,3	514,5	681,4
3	811	554,0	681,5
4	808	560,1	625,8
5	813	554,8	619,4
6	810	541,3	660,4
7	812,4	573,5	670,5
8	810	526,1	677,8
9	809,5	556,3	674,3
10	807,9	574,7	626,0

Изоляционные пальцы при конвективном способе сушки являются достаточно твердыми и более хрупкими. В хрупком материале при вдавливании в него предмета возникают местные пластические деформации, сопровождающиеся при дальнейшем увеличении сил местным разрушением, – нарушается целостность, что в конечном счете приводит к пробоя изоляции. В свою очередь при терморadiационном способе сушки твердость пальца ниже, следовательно, изоляция обладает большей пластичностью и способностью выдерживать большие остаточные деформации, не разрушаясь, что повышает устойчивость пальца к пробоям [9].

Значительные изменения показателя твердости объясняются способом энергоподвода в процессе нагрева пропиточного материала. При конвективном энергоподводе происходит образование твердой лаковой корки, которая не позволяет осуществить выход паров растворителя из пропиточного материала, тем самым образуя воздушные полости, создающие благоприятные условия для электрического пробоя. При механическом воздействии на такую изоляцию происходят отколы лакового слоя, снижая ее электрическую прочность.

В свою очередь при инфракрасном энергоподводе в процессе терморadiационной сушки образование лаковой корки начинается на границе пропиточного материала и пресс-материала, позволяя обеспечить выход паров растворителя из изоляционного полимерного слоя. Этот фактор позволяет получить качественный изоляционный материал с меньшим количеством газовых включений, что дает положительную оценку механической прочности при ударных или вибрационных воздействиях на изоляцию, которая имеет возможность сминаться без нарушения ее целостности [10].

Во время сушки лакокрасочное покрытие переходит из жидкого состояния в твердое за счет удаления из него растворителя. Известно, что эти два состояния отличаются друг от друга тем, что молекулы жидкости легко перемещаются друг относительно друга, в то время как в твердом веществе молекулы лишь слегка колеблются относительно своего постоянного положения. Снимки, полученные с электронного микроскопа (рисунок 3), позволяют произвести оценку влияния высушенного изоляционного лакового слоя на качество удаления растворителя из внутренних изоляционных слоев.

Снимок микроструктуры изоляционного пальца показывает, как воздушные включения преобладают почти на всей поверхности и даже в малом количестве могут оказывать существенное влияние на разрушение изоляционного слоя при различного рода механических воздействиях. В свою очередь микроструктура пальца после терморadiационной сушки значительно отличается по количеству воздушных включений, наблюдается связанная структура, позволяющая судить о повышенной сопротивляемости возникновению разрывов изоляционной лаковой пленки [11, 12].

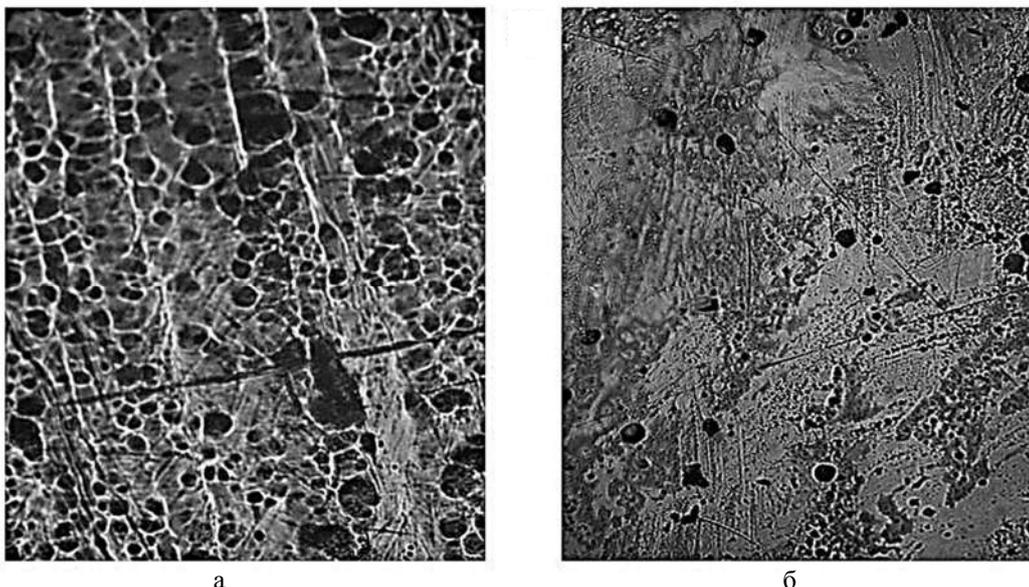


Рисунок 3 – Микроструктура изоляции после сушки конвективным (а) и терморadiационным (б) способами

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Величина электрической прочности изоляции пальца уменьшается с увеличением содержания воздушных включений во внутренних слоях диэлектрического материала, количество которых зависят от технологии нагрева объекта, что оказывает влияние на твердость. В связи с этим возникает вопрос о взаимосвязи показателя электрической прочности с показателями твердости электроизоляционного лакового слоя [13].

Для определения электрической прочности изоляционных пальцев использовалась испытательная высоковольтная установка WPT-4.4/100-GPT6/120, которая позволяет получить до 100 кВ действующего переменного напряжения и до 120 кВ выпрямленного напряжения со скоростью подъема 2 % в секунду. Данная установка оснащена устройством автоматического отключения при пробоях и перекрытиях изоляции, поэтому при достижении величины пробивного напряжения или напряжения перекрытия изоляции происходят отключение сетевого контактора и фиксация значений напряжения на измерительных приборах, что позволяет максимально точно оценить электрическую прочность изоляционного пальца ТЭД.

Размещение зажимов подвода напряжения на изоляционном пальце выполняется в месте нахождения резьбового соединения с одной стороны и месте установки щеткодержателя тягового электродвигателя с другой, как показано на рисунке 4.



Рисунок 4 – Размещение зажимов подвода напряжения на изоляционном пальце тягового электродвигателя локомотива в процессе исследования электрической прочности изоляции

Технология выполнения лабораторных исследований на пробой изоляции заключается в плавном повышении подводимого напряжения и последующей тридцатисекундной выдержки на каждые 10 кВ нарастающим итогом. Испытание считается завершенным после достижения электрического пробоя изоляционного пальца и регистрации величины пробивного напряжения. Результаты проведенных экспериментов по определению электрической прочности пальцев ТЭД без изоляционного покрытия, а также с нанесением пропиточного состава с последующей конвективной и терморadiационной сушкой представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения пробивного напряжения изоляционных пальцев ТЭД

Наименование характеризующего показателя	Способ сушки			
	№ опыта	конвективный	терморadiационный	пресс-материал
Пробивное напряжение $U_{пр.и}$, кВ	1	20	27,2	3,5
	2	14,3	5	4
	3	16	41	3,5
	4	23,4	36,4	6,5
	5	26	39,5	6,5
	6	21	49	6,0
	7	20,8	32,1	5,5
	8	18,4	55,4	6,5
	9	16,7	38	4
	10	19,6	29	4,5
Среднее арифметическое значение пробивного напряжения $\bar{U}_{пр.и}$, кВ		19,6	40,4	5,05
Среднеквадратическое отклонение σ , кВ		3,49	10,21	1,21
Коэффициент вариации v , %		17,80	25,27	23,96

Выбор в качестве объекта исследования полноценного конструктивного элемента тягового электродвигателя, которым является изоляционный палец, позволяет получить результаты экспериментальных значений контролируемых параметров состояния электрической изоляции с максимальной приближенностью к результатам, достигаемым в реальных условиях эксплуатации. В связи с этим возникает вопрос практического применения результатов проведенного исследования, которые будут полезны при выполнении восстановления изоляционного лакового слоя при заводском и деповском ремонте. Поэтому предлагается выявить характеристику, определяющую надежность работы изоляционных пальцев. Такой характеристикой может служить зависимость величины пробивного напряжения от параметра твердости поверхности изоляционного пальца, представленная на рисунке 5, которая позволяет связать параметры механической и электрической прочности.

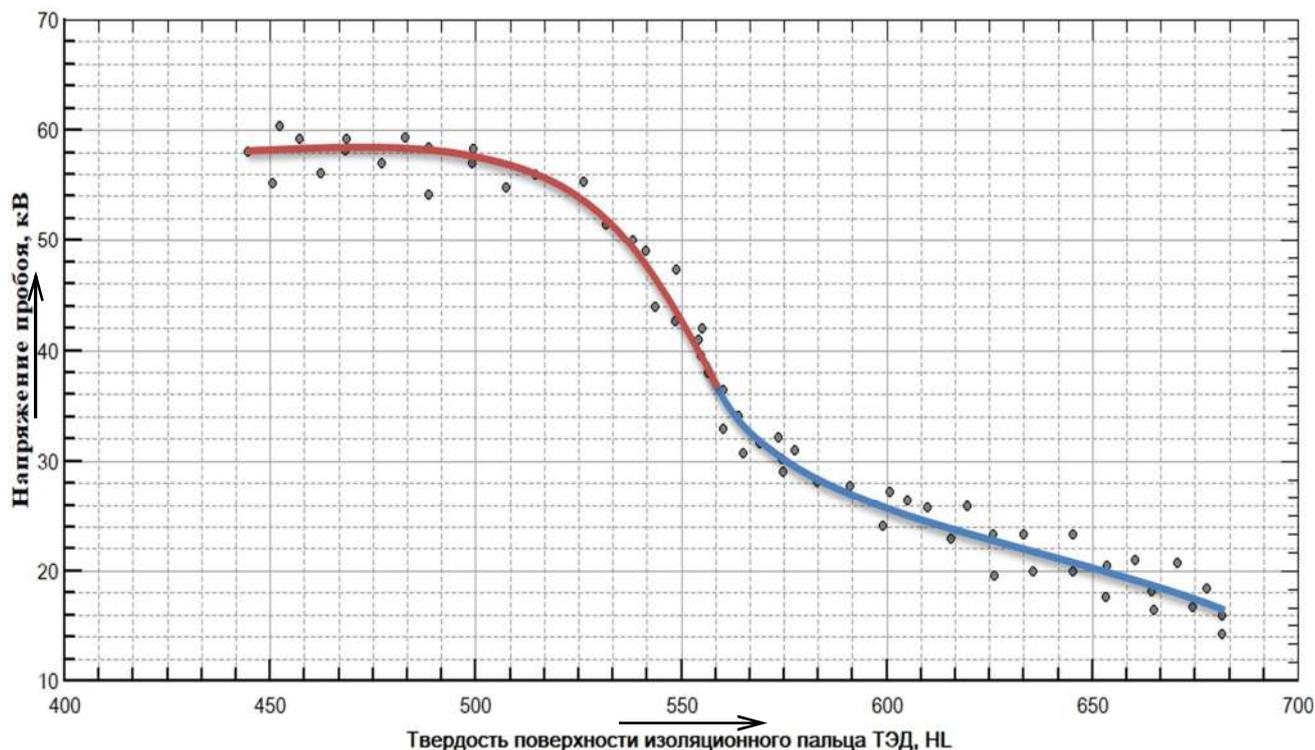


Рисунок 5 – Эмпирическая зависимость напряжения пробоя от твердости поверхности изоляционного пальца

Описать характер изменения контролируемых параметров пробивного напряжения и твердости можно путем аппроксимации экспериментальных данных. С применением программного обеспечения QtiPlot, позволяющего произвести углубленный анализ и визуализацию данных, выполнялась полиномиальная аппроксимация массива данных. Для повышения степени достоверности аппроксимации было принято решение о представлении эмпирической зависимости напряжения пробоя от твердости поверхности изоляционного пальца в виде кусочно-непрерывной функции:

$$U_{\text{пр}}^{\text{ип}}(\text{HL}) = \begin{cases} -5,076 \cdot 10^{-5} \cdot \text{HL}^3 + 0,0741 \cdot \text{HL}^2 - 36,07 \cdot \text{HL} + 5912,16, & 450 \leq \text{HL} \leq 560; \\ -2,248 \cdot 10^{-5} \cdot \text{HL}^3 + 0,0426 \cdot \text{HL}^2 - 26,979 \cdot \text{HL} + 5733,18, & 560 < \text{HL} \leq 680, \end{cases}$$

где $U_{\text{пр}}^{\text{ип}}$ – пробивное напряжение изоляционного пальца ТЭД, кВ;

HL – твердость поверхности изоляционного пальца ТЭД, определяемая динамическим твердомером, HLD.

Полученная кусочно-непрерывная функция может найти свое применение при создании математической модели по определению оптимального режима сушки диэлектрического лакового слоя изоляционных пальцев ТЭД. Подобного рода эмпирические зависимости можно определить и для других изоляционных конструкций тягового подвижного состава, что

позволит пересмотреть существующие технологии ремонта данных элементов и осуществить оптимизацию технологических процессов.

Проведенные исследования твердости электроизоляционного материала при различных способах сушки показали, насколько отличается качество изоляционного слоя в зависимости от энергоподвода при выполнении нагрева. При этом существующая технология ремонта с использованием конвективного нагрева представляет невысокие показатели электрической прочности. Повышенная твердость кристаллизующего пропиточного состава дает отрицательные результаты по показаниям электрической прочности по причине появления необратимых структурных изменений в виде трещин, разрывов, расслоений при эксплуатации объекта [14]. Поэтому необходимо искать решение проблемы снижения величины твердости при восстановлении лакового слоя современными способами сушки, одним из которых является терморadiационное воздействие инфракрасным излучением.

Список литературы

1. Сутягин, В. М. Основные свойства полимеров : учебное пособие / В. М. Сутягин, О. С. Кукурина, В. Г. Бондалетов. – Томск : Томский политехнический университет, 2010. – 96 с. – Текст : непосредственный.
2. Основной критерий эксплуатационной надежности полимерной изоляции электрических машин тягового подвижного состава / А. М. Худоногов, Е. М. Лыткина, А. А. Васильев, Е. Ю. Дульский. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск : Иркутский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – Т. 2. – С. 524 – 528.
3. Барэмбо, К. Н. Сушка, пропитка и компаундирование обмоток электрических машин / К. Н. Барэмбо, Л. М. Бернштейн. – Москва : Государственное энергетическое издательство, 1961. – 368 с. – Текст : непосредственный.
4. Лобыцин, И. О. Управление микрошероховатостью в технологии восстановления изоляционных пальцев коллекторных тяговых электродвигателей / И. О. Лобыцин, И. А. Худоногов, А. М. Худоногов. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 4 (60). – С. 15 – 23.
5. Лобыцин, И. О. Повышение надежности изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей электрических машин тягового подвижного состава / И. О. Лобыцин, Е. Ю. Дульский, А. А. Васильев. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 4 (56). – С. 218 – 224.
6. Алексеев, А. Е. Конструкция электрических машин / А. Е. Алексеев. – Москва : Государственное энергетическое издательство, 1958. – 425 с. – Текст : непосредственный.
7. Анализ конструктивных особенностей элементов электромагнитной системы тяговых электродвигателей локомотивов / А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский, В. Н. Иванов, И. О. Лобыцин. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т. 2. – С. 351 – 355.
8. Борхерт, Р. Техника инфракрасного нагрева : пер. с нем.; под ред. И. Б. Левитина / Р. Борхерт, В. Юбиц. – Москва : Государственное энергетическое издательство, 1963. – 278 с. – Текст : непосредственный.
9. Исмаилов, Ш. К. Тепловое состояние тяговых и вспомогательных электрических машин электровозов постоянного и переменного тока / Ш. К. Исмаилов. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2001. – 76 с. – Текст : непосредственный.
10. Филиппов, И. Ф. Теплообмен в электрических машинах : учебное пособие / И. Ф. Филиппов. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 256 с. – Текст : непосредственный.
11. Ваксер, Н. М. Изоляция электрических машин : учебное пособие / Н. М. Ваксер. – Ленинград : Ленинградский политехнический институт, 1985. – 83 с. – Текст : непосредственный.

12. Юренков, М. Г. Анализ влияния условий эксплуатации на надежность тяговых электродвигателей / М. Г. Юренков. – Текст : непосредственный // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава : науч. тр. – Омск : Омский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1974. – С. 57 – 60.

13. Дульский, Е. Ю. Влияние химических свойств полимеров и режимов инфракрасного энергоподвода на прочность и пластичность изоляции в локальных технологиях продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава / Е. Ю. Дульский, А. М. Худоногов, Е. М. Лыткина. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 1 (21). – С. 6 – 11.

14. Лобыцин, И. О. Совершенствование процесса восстановления изоляционных пальцев тяговых электродвигателей / Е. Ю. Дульский, А. М. Худоногов. – Текст : непосредственный // Политранспортные системы : материалы международной научно-технической конференции. – Новосибирск : Сибирский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 312 – 317.

References

1. Sutyagin V. M. *Osnovnyye svoystva polimerov* (Basic properties of polymers). Tomsk : Tomsk Polytechnic University Publ., 2010, 96 p.

2. Khudonogov A. M. The main criterion for the operational reliability of polymer insulation of electric machines for traction rolling stock [Osnovnoy kriteriy ekspluatatsionnoy nadozhnosti polimernoy izolyatsii elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: Materialy Tret'yey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* (Transport infrastructure of the Siberian region: Materials of the Third All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation). – Irkutsk, 2012, pp. 524 – 528.

3. Barembo K. N. *Sushka, propitka i kompaundirovaniye obmotok elektricheskikh mashin* (Drying, impregnation and compounding windings of electrical machines). Moscow: State Energy Publishing House, 1961, 368 p.

4. Lobytin I. O., Khudonogov I. A., Hudonogov A. M. Management of microroughness in the technology of restoration of insulating fingers of collector traction motors [Upravleniye mikrosherokhovatost'yu v tekhnologii vosstanovleniya izolyatsionnykh pal'tsev kollektornykh tyagovykh elektrodvigateley]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, no. 4 (60), pp. 15 – 23.

5. Lobytin I. O., Dulsky E. Yu., Vasiliev A. A. Improving the reliability of the insulating fingers of the brackets of the brush holders of electric machines of the traction rolling stock [Povysheniye nadozhnosti izolyatsionnykh pal'tsev kronshteynov shchotkoderzhateley elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2017, no. 4 (56), pp. 218 – 224.

6. Alekseev A. E. *Konstruktsiya elektricheskikh mashin* (The design of electric cars). Moscow: State Energy Publishing House, 1958, 425 p.

7. Khudonogov A. M. Analysis of the design features of the elements of the electromagnetic system of locomotive traction motors [Analiz konstruktivnykh osobennostey elementov elektromagnitnoy sistemy tyagovykh elektrodvigateley lokomotivov]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: Materialy devyatoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* (Transport Infrastructure of the Siberian Region: Proceedings of the Ninth International Scientific and Practical Conference). – Irkutsk, 2018, pp. 351 – 355.

8. Borchert R. *Tekhnika infrakrasnogo nagreva* (Technique of infrared heating). Moscow: State Energy Publishing House, 1963, 278 p.

9. Ismailov Sh. K. *Teplovoye sostoyaniye tyagovykh i vspomogatel'nykh elektricheskikh mashin elektrovozov postoyannogo i peremennogo toka* (Thermal condition of traction and auxiliary electric machines of direct and alternating current electric locomotives). Omsk: Omsk State Transport University Publ., 2001, 76 p.

10. Filipov I. F. *Teploobmen v elektricheskikh mashinakh* (Heat transfer in electric machines). Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986, 256 p.
11. Vakser N. M. *Izolyatsiya elektricheskikh mashin* (Insulation of electrical machines). Leningrad: LPI Publ., 1985, 83 p.
12. Yurenkov M. G. Analysis of the influence of operating conditions on the reliability of traction motors [Analiz vliyaniya usloviy ekspluatatsii na nadezhnost' tyagovykh elektrodvi-gateley]. *Issledovanie raboty elektrooborudovaniia i voprosy prochnosti elektropodvizhnogo sostava: nauchnye trudy* (Research of work of electrical equipment and questions of strength of electric rolling stock: scientific works). – Omsk: Omsk Institute of Railway Transport Engineers Publ., 1974, pp. 57 – 60.
13. Dul'skiy E. Yu., Khudonogov A. M. The influence of the chemical properties of polymers and infrared energy supply modes on the strength and ductility of insulation in local technologies for extending the life of electric vehicles of traction rolling stock [Vliyaniye khimicheskikh svoystv polimerov i rezhimov infrakrasnogo energopodvoda na prochnost' i plastichnost' izolyatsii v loka-l'nykh tekhnologiyakh prodleniya resursa elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 4 (21), pp. 6 – 11.
14. Lobytsin I. O., Dul'skiy E. Yu., Khudonogov A. M. Improving the recovery process of insulating fingers of traction electric motors [Sovershenstvovaniye protsessa vosstanovleniya izolyatsionnykh pal'tsev tyagovykh elektrodvigateley]. *Politransportnyye sistemy: materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (Political Transport Systems: Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference). – Novosibirsk: Siberian Transport University Publ., 2019, pp. 312 – 317.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лобыцин Игорь Олегович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: +7 (950) 066-11-87.

E-mail: Lobycin@mail.ru

Панков Игорь Александрович

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

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

Заместитель директора научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», начальник отдела управления проектами и технологиями, АО «ВНИИЖТ».

Тел.: +7 (914) 497-64-83.

E-mail: pankov.igor@vniizht.ru

Худоногов Анатолий Михайлович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: +7 (914) 881-46-75.

E-mail: a.hudonogov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lobytsin Igor Olegovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. student department of «Electric rolling stock», ISTU.

Phone: +7 (950) 066-11-87.

E-mail: Lobycin@mail.ru

Pankov Igor Aleksandrovich

Joint Stock Company «Railway Research Institute» (JSC «VNIIZHT»).

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

Deputy Director of the Scientific Center «Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies», Head of Project and Technology Management Department, JSC «VNIIZHT».

Phone: +7 (914) 497-64-83.

E-mail: pankov.igor@vniizht.ru

Khudonogov Anatoly Mikhailovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, professor of the department «Electric rolling stock», ISTU.

Phone: +7 (914) 881-46-75.

E-mail: a.hudonogov@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лобыцин, И. О. Исследование твердости лакового слоя изоляционных пальцев тягового электродвигателя локомотива при конвективном и терморрадиационном способах сушки / И. О. Лобыцин, И. А. Панков, А. М. Худоногов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 11 – 22.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lobytsin I. O., Pankov I. A., Khudonogov A. M. Study of the hardness of the varnish layer of the insulating fingers of the traction electric motor of a locomotive with a convective and thermo-radiation drying methods. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 1 (45), pp. 11 – 22 (In Russian).

УДК 621.423.1

А. В. Плаксин

Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», г. Новосибирск, Российская Федерация

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА ПО МИНИМУМУ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация. Анализ эксплуатации электровозов на отдельных участках железных дорог показывает, что их мощность используется нерационально и электровозы эксплуатируются с заниженными энергетическими показателями, в особенности на равнинных перегонах большой протяженности, что указывает на имеющиеся резервы снижения расхода электрической энергии.

Цель работы – определить оптимальное значение номинальной мощности электровозов по минимуму расхода электроэнергии на участке и оценить потери электрической энергии от неоптимального использования мощности электровозов.

Для достижения указанной цели было составлено уравнение зависимости расхода электроэнергии на тягу электровоза от величины его номинальной мощности. Для нахождения оптимального значения данное уравнение было продифференцировано по величине номинальной мощности электровоза и решено с использованием метода Кардано. Найденное выражение позволило определить оптимальное по минимуму расхода электрической энергии значение номинальной мощности электровоза в зависимости от требуемой для заданных условий движения и оценить значения изменения расхода электроэнергии от неоптимального использования его конструкционной мощности.

Полученные уравнения позволили решить задачи по выбору оптимального значения номинальной мощности электровозов и оценке нерационального расхода электрической энергии от неоптимального использования их мощности и могут быть использованы при определении оптимальных параметров электровозов.

Сделан вывод о важности выбора оптимальных значений мощности электровозов с целью получения наивысших технико-экономических показателей при их эксплуатации.

Ключевые слова: оптимальное значение мощности, расход электроэнергии, энергетическая эффективность, коэффициент полезного действия, электровоз.

Alexey V. Plaksin

The West Siberian railway – branch of JSC «Russian Railways», Novosibirsk, the Russian Federation

ON CHOOSING THE OPTIMAL POWER VALUE OF AN ELECTRIC LOCOMOTIVE TO MINIMIZE THE CONSUMPTION OF ELECTRIC ENERGY

Abstract. An analysis of the operation of electric locomotives on certain sections of railways shows that their power is used irrationally and electric locomotives are operated with low energy indicators, especially on long-distance flat stretches, which indicates that there are reserves for reducing the consumption of electric energy.

The purpose of the work is to determine the optimal value of the rated power of electric locomotives by minimizing the electricity consumption on the site and to estimate the loss of electric energy from the non-optimal use of electric locomotives' power.

To achieve this goal, an equation was drawn up for the dependence of the electric power consumption on the traction of an electric locomotive on the value of its rated power. To find the optimal value, this equation was differentiated by the value of the rated power of the electric locomotive and solved using the Cardano method. The expression allowed us to determine the minimum consumption of electric power is the rated power of the electric locomotive, depending on the required for a given traffic conditions and to evaluate the variation of energy consumption from non-optimal use of its structural capacity.

The obtained equations allowed us to solve the problems of choosing the optimal value of the rated power of electric locomotives and evaluating the irrational consumption of electric energy from the non-optimal use of their power and can be used to determine the optimal parameters of electric locomotives.

The conclusion is made about the importance of choosing the optimal power values of electric locomotives in order to obtain the highest technical and economic indicators during their operation.

Keywords: *optimal power value, power consumption, energy efficiency, efficiency coefficient, electric locomotive.*

Одним из центральных вопросов, связанных с реализацией тягово-энергетических характеристик электровозов, является использование их мощности, которое существенно влияет на энергетические показатели электровозов, о чем упоминается во многих публикациях [1, 2]. Анализ эксплуатации электровозов на отдельных участках железных дорог показывает, что их мощность используется нерационально и они эксплуатируются с заниженными энергетическими показателями, в особенности на равнинных перегонах большой протяженности, что указывает на имеющиеся резервы снижения расхода электроэнергии [3, 4].

При эксплуатации электровозов с недоиспользованием мощности с целью снижения расхода электроэнергии разрабатывают и применяют способы повышения их энергетической эффективности, такие как регулирование мощности тяговых двигателей (ТД) [5] и вспомогательных машин. Однако значительно большие резервы повышения энергетических показателей электровозов, на наш взгляд, видятся в выборе оптимальных по мощности электровозов для эксплуатации на соответствующем полигоне, которая закладывается при их проектировании.

При разработке технических требований к электровозам исходят из необходимой мощности электровозов, определяемой массами поездов, скоростями движения, профилем пути, особенностями движения [6]. Стоит отметить, что в процессе эксплуатации значение мощности электровозов изменяется в очень широких пределах в связи с разными условиями их работы (различные значения масс и скоростей движения поездов, профиля пути), что затрудняет определение значения необходимой мощности.

Расчет требуемой мощности электровозов производится, как правило, для предельно возможных режимов работы (по максимальным массе поезда и скорости движения, наибольшей величине расчетного подъема), которые соответствуют режимам перегрузки, а для перехода от расчетной к номинальной мощности используют коэффициент эксплуатационной перегрузки, полученный при обобщении опыта эксплуатации на различных по профилю участках пути на всей сети железных дорог.

При таком подходе величина номинальной мощности электровозов имеет завышенное значение, что подтверждается при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках пути, которые значительно недоиспользуют конструкционную мощность и работают в режимах с заниженными энергетическими показателями [3, 4, 7].

Попробуем определить оптимальную номинальную мощность электровоза по минимуму расхода электроэнергии на участке и оценить нерациональный расход электроэнергии от недоиспользования его конструкционной мощности.

Расход электроэнергии на тягу электровоза можно определить по выражению [8]:

$$W_T = \int_{t_n}^{t_k} P_3(t) dt = \int_{t_n}^{t_k} (P_k + \Delta P)(t) dt, \quad (1)$$

где P_3 , P_k – значения мощностей, потребляемой из сети и на ободу колес электровоза;

ΔP – значение потерь мощности в узлах электровоза;

t – время движения электровоза;

t_n , t_k – начальный и конечный моменты времени движения электровоза на участке.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Потери мощности в узлах электровоза имеют различную величину в зависимости от использования им мощности. Их удобно представить через КПД электровоза [8]. Тогда выражение (1) путем преобразований можно привести к виду:

$$W_T = P_3 \cdot T = (P_k + \Delta P) \cdot T = \frac{P_k \cdot T}{\eta_{э.т}}, \quad (2)$$

где $\eta_{э.т}$ – КПД электровоза на тягу;

T – время движения электровоза.

В свою очередь КПД электровоза на тягу можно представить с помощью универсальной процентной характеристики, которая удобна для решения типовых практических задач, таких как выбор мощности ТД и электровозов [8]. На рисунке 1 представлена зависимость степени использования КПД электровоза постоянного тока на тягу C_η от соотношения реализуемой P_k и номинальной P_n мощностей, полученная по данным универсальной процентной характеристики [7, 8].

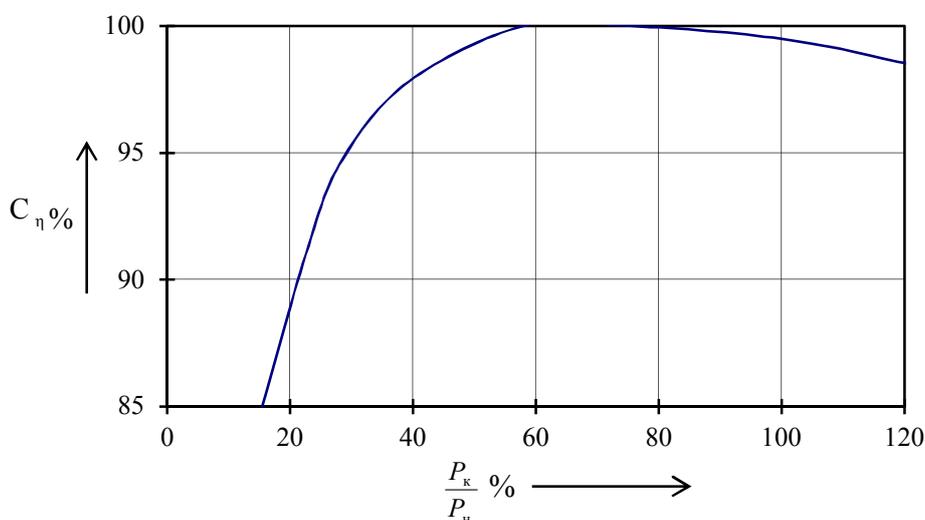


Рисунок 1 – Зависимость степени использования КПД электровоза постоянного тока на тягу от соотношения реализуемой и номинальной мощностей

Как видно из приведенной на рисунке 1 зависимости, значение КПД электровоза на тягу увеличивается с ростом использования его мощности, достигая максимальной величины при реализации им мощности, близкой к длительной номинальной. При дальнейшем же увеличении его мощности значение КПД снижается.

Значение КПД электровоза на тягу можно рассчитать с помощью степени использования КПД по формуле [7]:

$$\eta_{э.т} = \eta_{т.н} \cdot C_\eta, \quad (3)$$

где $\eta_{т.н}$ – номинальное значение КПД электровоза в режиме тяги,

а степень использования КПД электровоза путем аппроксимации можно привести к виду:

$$C_\eta = a \cdot \left(\frac{P_k}{P_n}\right)^4 + b \cdot \left(\frac{P_k}{P_n}\right)^3 + c \cdot \left(\frac{P_k}{P_n}\right)^2 + d \cdot \frac{P_k}{P_n} + e, \quad (4)$$

где коэффициенты $a = -0,6535$, $b = 2,2605$, $c = -2,908$, $d = 1,6271$, $e = 0,667$ при достоверности аппроксимации $R = 0,9969$.

Тогда с учетом формул (3), (4) уравнение (2) можно представить так:

$$W_T = \frac{P_K \cdot T}{\eta_{т.н} \cdot C_\eta} = \frac{P_K \cdot T}{\left[a \cdot \left(\frac{P_K}{P_H} \right)^4 + b \cdot \left(\frac{P_K}{P_H} \right)^3 + c \cdot \left(\frac{P_K}{P_H} \right)^2 + d \cdot \frac{P_K}{P_H} + e \right] \cdot \eta_{т.н}}, \quad (5)$$

а преобразовав его, привести к виду:

$$W_T = \frac{P_K \cdot P_H^4 \cdot T}{(a \cdot P_K^4 + b \cdot P_K^3 \cdot P_H + c \cdot P_K^2 \cdot P_H^2 + d \cdot P_K \cdot P_H^3 + e \cdot P_H^4) \cdot \eta_{т.н}}. \quad (6)$$

Согласно анализу формул (5), (6) расход электроэнергии на тягу зависит от КПД электровоза и наименьшее значение он будет иметь при определенном соотношении реализуемой и номинальной мощностей. Отсюда можно сделать вывод о том, что расход электроэнергии на тягу электровоза при постоянном значении реализуемой им мощности зависит от величины его номинальной мощности и согласно формуле (6) будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

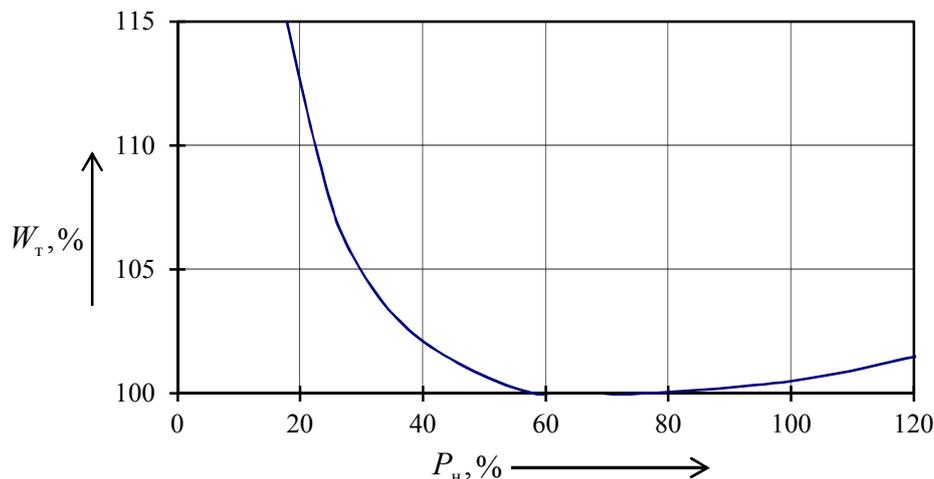


Рисунок 2 – Зависимость расхода электроэнергии на тягу от номинальной мощности электровоза постоянного тока на тягу при реализации постоянной мощности на ободах колес

Как видно из рисунка 2, при значительном недоиспользовании мощности электровозом расход электроэнергии на тягу имеет завышенное значение, существенно отличающееся от минимально возможного.

Оптимальное значение номинальной мощности электровоза можно найти, взяв производную от расхода электроэнергии электровоза на тягу по величине номинальной мощности, приравняв ее к нулю [9].

Продифференцировав выражение (6), получили уравнение:

$$\frac{\partial W_T}{\partial P_H} = \frac{(4a \cdot P_K^5 \cdot P_H^3 + 3b \cdot P_K^4 \cdot P_H^4 + 2c \cdot P_K^3 \cdot P_H^5 + d \cdot P_K^2 \cdot P_H^6) \cdot \eta_{т.н} \cdot T}{\left[(a \cdot P_K^4 + b \cdot P_K^3 \cdot P_H + c \cdot P_K^2 \cdot P_H^2 + d \cdot P_K \cdot P_H^3 + e \cdot P_H^4) \cdot \eta_{т.н} \right]^2}, \quad (7)$$

которое было приравнено к нулю:

$$\frac{(4a \cdot P_{\kappa}^5 \cdot P_{\text{H}}^3 + 3b \cdot P_{\kappa}^4 \cdot P_{\text{H}}^4 + 2c \cdot P_{\kappa}^3 \cdot P_{\text{H}}^5 + d \cdot P_{\kappa}^2 \cdot P_{\text{H}}^6) \cdot \eta_{\text{т.н}} \cdot T}{[(a \cdot P_{\kappa}^4 + b \cdot P_{\kappa}^3 \cdot P_{\text{H}} + c \cdot P_{\kappa}^2 \cdot P_{\text{H}}^2 + d \cdot P_{\kappa} \cdot P_{\text{H}}^3 + e \cdot P_{\text{H}}^4) \cdot \eta_{\text{т.н}}]^2} = 0. \quad (8)$$

Поскольку знаменатель выражения не может быть равным нулю, формула (8) была приведена к виду:

$$(4a \cdot P_{\kappa}^5 \cdot P_{\text{H}}^3 + 3b \cdot P_{\kappa}^4 \cdot P_{\text{H}}^4 + 2c \cdot P_{\kappa}^3 \cdot P_{\text{H}}^5 + d \cdot P_{\kappa}^2 \cdot P_{\text{H}}^6) \cdot \eta_{\text{т.н}} \cdot T = 0, \quad (9)$$

а путем преобразований с учетом того, что значения P_{κ} , P_{H} , $\eta_{\text{т.н}}$ и T не могут быть равны нулю, представлена так:

$$4a \cdot P_{\kappa}^3 + 3b \cdot P_{\kappa}^2 \cdot P_{\text{H}} + 2c \cdot P_{\kappa} \cdot P_{\text{H}}^2 + d \cdot P_{\text{H}}^3 = 0. \quad (10)$$

Для решения полученного кубического уравнения (10) был использован метод Кардано [9]. С целью избавления от компоненты P_{κ} была произведена замена $P_{\kappa} = k \cdot P_{\text{H}}$ и получено уравнение

$$(4a \cdot k^3 + 3b \cdot k^2 + 2c \cdot k + d) \cdot P_{\text{H}}^3 = 0. \quad (11)$$

В связи с тем, что значение P_{H}^3 не может быть равно нулю, уравнение было приведено к виду

$$4a \cdot k^3 + 3b \cdot k^2 + 2c \cdot k + d = 0, \quad (12)$$

а путем преобразований представлено так:

$$k^3 + \frac{3b}{4a} \cdot k^2 + \frac{2c}{4a} \cdot k + \frac{d}{4a} = 0. \quad (13)$$

С целью приведения уравнения (13) к трехчленному была произведена замена (подстановка) $k = y - \frac{b}{4a}$ и получено кубическое уравнение в «неполной» форме

$$y^3 + p \cdot y + q = 0, \quad (14)$$

в котором $p = \frac{c}{2a} - \frac{3b^2}{16a^2}$, $q = \frac{2b^3}{64a^3} - \frac{cb}{8a^2} + \frac{d}{4a}$.

В связи с тем, что дискриминант кубического уравнения, который был подсчитан с учетом указанных выше коэффициентов, больше нуля –

$$D = \frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27} = 1,623 \cdot 10^{-5} > 0, \quad (15)$$

«неполное» кубическое уравнение имеет один вещественный корень и два комплексно сопряженных [9].

На основе формулы Кардано был найден вещественный корень приведенного кубического уравнения:

$$y = \sqrt[3]{-\frac{2b^3}{64a^3} - \frac{cb}{8a^2} + \frac{d}{4a}} + \sqrt{\frac{\left(\frac{2b^3}{64a^3} - \frac{cb}{8a^2} + \frac{d}{4a}\right)^2}{4} + \frac{\left(\frac{c}{2a} - \frac{3b^2}{16a^2}\right)^3}{27}} +$$

$$+ \sqrt[3]{-\frac{2b^3}{64a^3} - \frac{cb}{8a^2} + \frac{d}{4a}} - \sqrt{\frac{\left(\frac{2b^3}{64a^3} - \frac{cb}{8a^2} + \frac{d}{4a}\right)^2}{4} + \frac{\left(\frac{c}{2a} - \frac{3b^2}{16a^2}\right)^3}{27}},$$
(16)

с помощью которого путем проведения обратной замены ($y - \frac{b}{4a} = k$) было вычислено значение оптимальной величины номинальной мощности электровоза

$$P_{н. опт} = \frac{P_k}{k} = \frac{P_k}{y - \frac{b}{4a}} = \frac{4a \cdot P_k}{4a \cdot y - b} \approx \frac{P_k}{0,63284} \approx 1,58 \cdot P_k. \quad (17)$$

Для определения значения изменения расхода электроэнергии от неоптимального использования конструкционной мощности электровозом была проведена сравнительная оценка на примере возможной эксплуатации следующих электровозов.

1. С неоптимальным значением реализуемой электровозом мощности $P_{к1}$, когда она не соответствует значению оптимальной номинальной мощности согласно формуле (17)

$$P_{н. опт1} \neq \frac{P_{к1}}{k}.$$

2. С оптимальным значением мощности при условии, что для заданных параметров движения электровоз имеет оптимальную номинальную мощность согласно формуле (17)

$$P_{н. опт2} = \frac{P_{к2}}{k}.$$

С учетом того, что помимо расхода электроэнергии на тягу на электровозе имеют место затраты электроэнергии на собственные нужды, которые зависят от его номинальной мощности, расход электроэнергии на работу электровоза на участке можно определить по выражению [7]:

$$W = \int_{t_n}^{t_k} \left(\frac{P_k(t)}{\eta_{э.т}} + P_{сн}(t) \right) dt = \int_{t_n}^{t_k} \left(\frac{P_k(t)}{\eta_{э.т}} + \kappa_{сн} \cdot P_n(t) \right) dt, \quad (18)$$

где $P_{сн}$ – значение мощности, расходуемой на собственные нужды электровоза;

$\kappa_{сн}$ – коэффициент собственных нужд электровоза.

Путем преобразований уравнение (18) можно привести к виду [7]:

$$W = \frac{P_k \cdot T}{\eta_{э.т}} + \kappa_{сн} \cdot P_n \cdot T = P_k \cdot T \cdot \eta_{э.т}^{-1} + \kappa_{сн} \cdot P_{сн} \cdot T, \quad (19)$$

а изменение расходов электроэнергии сравниваемых электровозов рассчитать по формуле:

$$\Delta W(\%) = \frac{W_1 - W_2}{A_1} = \left(1 - \frac{P_{к2} \cdot T_2 \cdot \eta_{э.т2}^{-1} + \kappa_{сн} \cdot P_{н2} \cdot T_2}{P_{к1} \cdot T_1 \cdot \eta_{э.т1}^{-1} + \kappa_{сн} \cdot P_{н1} \cdot T_1} \right) \cdot 100 \%, \quad (20)$$

где W_1, W_2 – расход электроэнергии сравниваемых электровозов;

$\eta_{э.т1}, \eta_{э.т2}$ – КПД электровозов на тягу;

$P_{к1}, P_{к2}, P_{н1}, P_{н2}$ – значения реализуемых и номинальных мощностей электровозов;

T_1, T_2 – время работы электровозов.

Поскольку подразумевается, что сравниваемые электровозы при возможной эксплуатации на рассматриваемом участке пути за одинаковый промежуток времени движения реализовывали бы одинаковые значения мощности, то для данных электровозов значения реализуемых мощностей и времени движения будут одинаковыми ($P_{к1} = P_{к2} = P_k, T_1 = T_2 = T$), а оптимальная номинальная мощность согласно формуле (17) имеет вид: $P_{н.опт2} = \frac{P_{к2}}{k} = \frac{P_k}{k}$, тогда значения КПД электровозов с учетом формул (3), (4) можно представить следующими уравнениями:

$$\eta_{э.т1} = \eta_{т.н1} \cdot \left[a \cdot \left(\frac{P_k}{P_{н1}} \right)^4 + b \cdot \left(\frac{P_k}{P_{н1}} \right)^3 + c \cdot \left(\frac{P_k}{P_{н1}} \right)^2 + d \cdot \frac{P_k}{P_{н1}} + e \right]; \quad (21)$$

$$\eta_{э.т2} = \eta_{т.н2} \cdot (a \cdot k^4 + b \cdot k^3 + c \cdot k^2 + d \cdot k + e). \quad (22)$$

В свою очередь номинальный КПД электровоза постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями (ТД) можно выразить формулой [8]:

$$\eta_{т.н} = \eta_{тд.н} \cdot \eta_{зп.н}, \quad (23)$$

где $\eta_{зп.н}$ – КПД зубчатой передачи электровоза при номинальном режиме работы (согласно данным, приведенным в учебнике [8] $\eta_{зп.н} = 0,97$);

$\eta_{тд.н}$ – значения КПД ТД при номинальном режиме работы, которое путем аппроксимации графика его зависимости от номинальной мощности, приведенного в работе [10], можно вычислить так:

$$\eta_{тд.н} = (\alpha \cdot P_n^4 + \beta \cdot P_n^3 + \chi \cdot P_n^2 + \delta \cdot P_n + \varepsilon), \quad (24)$$

где коэффициенты $\alpha = -4 \cdot 10^{-13}$, $\beta = 1 \cdot 10^{-9}$, $\chi = -9 \cdot 10^{-7}$, $\delta = 4 \cdot 10^{-4}$, $\varepsilon = 0,8674$ при достоверности аппроксимации $R = 0,9996$.

Тогда значения КПД сравниваемых электровозов согласно формулам (21) – (24) можно вычислить так:

$$\eta_{э.т1} = \eta_{зп.н} \cdot (\alpha \cdot P_{н1}^4 + \beta \cdot P_{н1}^3 + \chi \cdot P_{н1}^2 + \delta \cdot P_{н1} + \varepsilon) \cdot \left[a \cdot \left(\frac{P_k}{P_{н1}} \right)^4 + b \cdot \left(\frac{P_k}{P_{н1}} \right)^3 + c \cdot \left(\frac{P_k}{P_{н1}} \right)^2 + d \cdot \frac{P_k}{P_{н1}} + e \right]; \quad (25)$$

$$\eta_{э.т2} = \eta_{зп.н} \cdot \left[\alpha \cdot \left(\frac{P_k}{k} \right)^4 + \beta \cdot \left(\frac{P_k}{k} \right)^3 + \chi \cdot \left(\frac{P_k}{k} \right)^2 + \delta \cdot \frac{P_k}{k} + \varepsilon \right] \cdot (a \cdot k^4 + b \cdot k^3 + c \cdot k^2 + d \cdot k + e), \quad (26)$$

а уравнение (20) с учетом формул (25) и (26) привести к зависимости от двух мощностей – требуемой P_k и номинальной одного из сравниваемых электровозов $P_{н1}$:

$$\Delta W(\%) = \left(1 - \frac{P_k \cdot \left[0,97 \cdot (\alpha \cdot \left(\frac{P_k}{k} \right)^4 + \beta \cdot \left(\frac{P_k}{k} \right)^3 + \chi \cdot \left(\frac{P_k}{k} \right)^2 + \delta \cdot \frac{P_k}{k} + \varepsilon) \cdot (a \cdot k^4 + b \cdot k^3 + c \cdot k^2 + d \cdot k + e) \right]^{-1} + \frac{K_{сч} \cdot P_k}{k}}{P_k \cdot \left[0,97 \cdot (\alpha \cdot P_{н1}^4 + \beta \cdot P_{н1}^3 + \chi \cdot P_{н1}^2 + \delta \cdot P_{н1} + \varepsilon) \cdot \left(a \cdot \left(\frac{P_k}{P_{н1}} \right)^4 + b \cdot \left(\frac{P_k}{P_{н1}} \right)^3 + c \cdot \left(\frac{P_k}{P_{н1}} \right)^2 + d \cdot \frac{P_k}{P_{н1}} + e \right) \right]^{-1} + K_{сч} \cdot P_{н1}} \right) \cdot 100 \%. \quad (27)$$

По формуле (27) было рассчитано изменение расхода электроэнергии при возможной эксплуатации электровозов с оптимальным и неоптимальным значением мощности, которое

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

было проведено на примере пассажирских электровозов с мощностью 4800 кВт (соответствует мощности электровозов ЭП2К) для средних технических скоростей движения (81,4 км/ч) и масс поездов (748 т) на одном из участков железной дороги согласно рекомендациям статьи [4] в зависимости от величины эквивалентного подъема. Коэффициент собственных нужд электровоза при расчетах был принят согласно данным, приведенным в статье [7] ($\kappa_{сн} = 0,017$), а значения требуемых мощностей были вычислены по формуле [8]:

$$P_k = \alpha \cdot V \cdot [m_{л}(w'_0 + i_3) + m_{в}(w''_0 + w_{пр} + i_3)], \quad (28)$$

где α – переводной коэффициент;

V – скорость движения;

$m_{л}$ и $m_{в}$ – массы электровоза и вагонов;

w'_0 , w''_0 и $w_{пр}$ – основные и дополнительное удельные сопротивления движению электровоза, вагонов и от подвагонных генераторов, рассчитываемые согласно Правилам тяговых расчетов [11];

i_3 – величина эквивалентного подъема.

Результаты расчетов представлены в таблице.

Изменение расхода электроэнергии от неоптимального использования мощности на примере
пассажирского электровоза номинальной мощностью 4800 кВт

Эквивалентный подъем i_3 , %	Реализуемая мощность P_k , кВт	Соотношение мощностей P_k/P_n	Доля нерационального расхода электроэнергии ΔW , %
При скорости движения 81,4 км/ч и массе вагонов 748 т			
0	846,55	0,18	15,19
2	1238,27	0,26	9,10
4	1630,00	0,34	5,10
6	2021,72	0,42	2,54
8	2413,45	0,50	1,02
9	2609,31	0,54	0,55
10	2805,17	0,58	0,23

Из данных таблицы видно, что при неоптимальном использовании мощности электровозом нерациональный расход электроэнергии имеет существенную величину и на равнинном профиле может достигать до 15 %, это подтверждает то, что мощность рассмотренных электровозов (4800 кВт) является избыточной для равнинных участков пути, так как согласно источнику [12] электровозы с близким значением мощности (4700 кВт) способны водить поезда массой 1440 т по подъему 9 ‰ со скоростью 80 км/ч.

Полученные зависимости, выраженные формулами (17) и (27), позволяют решать задачи выбора оптимального значения номинальной мощности электровоза (по наименьшему расходу электроэнергии) и оценки нерационального расхода электроэнергии от неоптимального использования его мощности.

Необходимо отметить, что формулы (17) и (27) приведены для электровозов постоянного тока с коллекторными ТД и для других типов электрических локомотивов (переменного тока и с асинхронным тяговым приводом) значение КПД может отличаться на величину потерь в дополнительном силовом оборудовании.

Проведенный сравнительный анализ еще раз подтверждает тот факт, что выбор оптимальных значений мощности и параметров электровозов является очень важной задачей, так как от их величин помимо эксплуатационных расходов и капитальных вложений в железнодорожный транспорт зависят еще и расходы электроэнергии, которые имеют существенную величину.

В связи с нерациональным использованием мощности электровозов на ряде участков железных дорог, на наш взгляд, требуется более глубокий подход к вопросу заказа и выпуска новых электровозов. Возможно, следует обратиться к опыту работы зарубежных железнодорожных компаний, которые с целью получения наивысших технико-экономических показателей в эксплуатации заказывают небольшие партии электровозов (из 20 – 40 единиц) для эксплуатации на конкретном участке одной железной дороги.

Список литературы

1. Лисунов, В. Н. Тягово-энергетическая эффективность электровозов / В. Н. Лисунов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 1986. – № 4. – С. 71 – 73.
2. Бабич, В. М. Повышение энергетической эффективности электровозов : учебное пособие / В. М. Бабич. – Омск : Омская гос. акад. путей сообщения, 1995. – 112 с. – Текст : непосредственный.
3. Учет энергопотребления пассажирских электровозов в локомотивных эксплуатационных депо / Е. В. Аулов, В. А. Кучумов, Е. Е. Коссов, Н. Н. Широченко. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 5 (77). – С. 280 – 287.
4. Плаксин, А. В. Пути снижения расхода электрической энергии при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках пути / А. В. Плаксин, С. В. Швецов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 35 – 47.
5. Патент № 2691904 Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В61С 15/00. Способ управления энергетической эффективностью локомотива : № 2018126438 : заявлено 17.07.2018 : опубликовано 18.06.2019 / Крыгин А. Н., Плаксин А. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 6 с. – Текст : непосредственный.
6. Режимы работы магистральных электровозов / под ред. О. А. Некрасова. – Москва : Транспорт, 1983. – 231 с. – Текст : непосредственный.
7. Плаксин, А. В. Пути повышения энергетической эффективности эксплуатируемых пассажирских электровозов / А. В. Плаксин, С. В. Швецов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 4 (36). – С. 31 – 40.
8. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги : учебник / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – Москва : Транспорт, 1983. – 328 с. – Текст : непосредственный.
9. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы / Г. Корн. – Москва : Книга по требованию, 2014. – 832 с. – Текст : непосредственный.
10. Андросов, Н. Н. Тяговые электрические машины и преобразователи : методическое руководство к курсовому проектированию / Н. Н. Андросов, М. Г. Дурандин. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2004. – 116 с. – Текст : непосредственный.
11. Правила тяговых расчетов для поездной работы : утв. распоряж. ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р. – Москва, 2016. – 515 с. – Текст : непосредственный.
12. ЭП1 : <https://ru.wikipedia.org/> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ЭП1> (дата обращения: 25.11.2020).

References

1. Lisunov V. N. Traction and energy efficiency of electric locomotives [Tyagovo-energeticheskaya effektivnost' elektrovozov]. *Zheleznodorozhnyj transport – The journal of Railway transport*, 1986, no. 4, pp. 71 – 73.
2. Babich V. M. *Povyshenie jenergeticheskoy jeffektivnosti jelektrovozov: Uchebnoe posobie* (Improving the energy efficiency of locomotives: textbook). Omsk: OMGAPS Publ., 1995, 112 p.
3. Aulov E. V., Kuchumov V. A., Kossov E. E., Shirochenko N. N. Accounting of energy consumption of passenger electric locomotives in locomotive operational depots [Uchet energopotre-

bleniya passazhirskih elektrovozov v lokomotivnyh ekspluatacionnyh depo]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of the Railway Research Institute*, 2018, no. 5 (77), pp. 280 – 287.

4. Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Ways to reduce electric power consumption in the operation of locomotives on flat sections of Railways [Puti snizheniya raskhoda elektricheskoy energii pri ekspluatatsii passazhirskih elektrovozov na ravninnyh uchastkah puti]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 1 (29), pp. 35 – 47.

5. Krygin A. N., Plaksin A. V. *Patent RU 2691904 C1*, 18.06.2019.

6. Nekrasov O. A., Lisitsyn A. L., Muginstein L. A., Rachmaninov V. I. *Rezhimy raboty magistral'nyh elektrovozov* (Operating modes of mainline electric locomotives). Moscow: Transport Publ., 1983, 231 p.

7. Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Ways to improve the energy efficiency of electric locomotives operated passenger. [Puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti ekspluatiruemykh passazhirskih elektrovozov]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 4 (36), pp. 31 – 40.

8. Rosenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* (Theory of electric traction). Moscow: Transport Publ., 1983, 328 p.

9. Korn G. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov: Opredeleniya, teoremy, formuly* (Handbook of mathematics for scientists and engineers: Definitions, theorems, formulas). Moscow: Book on demand Publ., 2014, 832 p.

10. Androsov N. N., Durandin M. G. *Tyagovye elektricheskie mashiny i preobrazovateli: Metodicheskoe rukovodstvo k kursovomu proektirovaniyu* (Traction electric machines and converters: A methodological guide to course design). Ekaterinburg: Ural State University of Railway Transport Publ., 2004, 116 p.

11. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* (Rules of traction calculations for train operation), approved by the order of JSC «RZD» from 12.05.2016 № 867r. Moscow, 2016, 515 p.

12. *EP1* (EP1), Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ЭП1> (accessed 25 November 2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Плаксин Алексей Владимирович

Западно-Сибирская железная дорога – филиал
ОАО «РЖД».

Вокзальная магистраль, д. 12, г. Новосибирск,
630004, Российская Федерация.

Ведущий инженер дорожного топливно-
энергетического центра.

Тел.: +7 (913) 746-38-71.

E-mail: Plaksin.av@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Плаксин, А. В. О выборе оптимального значения мощности электровоза по минимуму расхода электрической энергии / А. В. Плаксин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 22 – 31.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Plaksin Alexey Vladimirovich

The West Siberian railway – branch of JSC «RZD».

12, Vokzalnaya Magistral, Novosibirsk, 630004, the
Russian Federation.

Leading engineer of road fuel and energy centre.

Phone: +7-913-746-38-71.

E-mail: Plaksin.av@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Plaksin A. V. On choosing the optimal power value of an electric locomotive to minimize consumption of electric energy. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 1 (45), pp. 22 – 31 (In Russian).

П. А. Коропец, А. В. Кашуба

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЯГОЙ В СИСТЕМЕ «КОЛЕСО – РЕЛЬС»

Аннотация. В статье выдвигается предположение о том, что причиной повышенного износа бандажей электровозов с асинхронным тяговым приводом является повышенная скорость скольжения в контакте колес с рельсами. Показано, что в режимах тяги с высокими скоростями скольжения в приводе могут развиваться фрикционные автоколебания. Построены зоны устойчивости привода в пространстве его параметров. Обоснована модель асинхронного привода с «защемленным ротором» для исследования режимов боксования. Рекомендовано для снижения износа колес и рельсов установить на электровозе систему контроля сцепления (СКС). Интеллектуальные датчики СКС создают дополнительный канал обратной связи для системы оптимального управления тягой – реализации максимальных сил тяги при минимальных потерях на трение. Представленные в статье методики и рекомендации применимы для различных конструкций тяговых приводов.

Ключевые слова: математическая модель, устойчивость, фрикционные автоколебания, собственные частоты, управление, скорость скольжения.

Peter A. Koropets, Alexander V. Kashuba

Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, the Russian Federation

INTELLIGENT TRACTION CONTROL IN THE «WHEEL – RAIL» SYSTEM

Abstract. The article suggests that the reason for the increased wear of the tires of electric locomotives with an asynchronous traction drive is the increased sliding speed in the contact of the wheels with the rails. It is shown that in thrust modes with high sliding speeds, frictional self-oscillations can develop in the drive. The stability zones of the drive are constructed in the space of its parameters. The model of an asynchronous drive with a «jammed rotor» for the study of skidding modes has been substantiated. It is recommended to install a clutch control system (CCS) on the electric locomotive to reduce wear on wheels and rails. CCS intelligent sensors create an additional feedback channel for the system of optimal traction control - the implementation of maximum traction forces with minimal friction losses. The methods and recommendations presented in the article are applicable to various designs of traction drives.

Keywords: mathematical model, stability, frictional self-oscillations, natural frequencies, control, sliding speed.

За последние два – три года на современных российских электровозах и тепловозах с асинхронным тяговым приводом участились случаи повышенного износа (а иногда – и разрушения) бандажей колесных пар. Причина этого явления остается до конца не выясненной. Пока только известно, что это – не технологический брак при производстве бандажей.

С начала широкого применения в тяговых приводах подвижного состава асинхронных электродвигателей (АД) возникло мнение, что при реализации максимальной силы тяги боксование колесных пар невозможно в принципе. Жесткая тяговая характеристика АД практически исключает развитие вращения колес относительно рельсов с большими скоростями скольжения. На самом деле жесткость тяговой характеристики АД имеет свой рациональный предел.

Причиной повышенного износа бандажей могут быть особенности динамических процессов в системе «тяговый привод – путь» в режимах максимальной тяги.

Рассмотрим упрощенную модель тягового привода III класса электровоза ЭП20 – рисунок 1, а, динамические процессы в котором при боксовании достаточно подробно рассмотрены в работе [1]. Характеристики тяговых моментов и момента сцепления колесной пары с рельсами показаны на рисунке 1, в.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

При построении математической модели приняты следующие допущения:
движение локомотива происходит с постоянной скоростью;

так как режимы реализации максимальной тяги происходят при малых скоростях движения, то динамическими составляющими вертикальных нагрузок в контакте колес с рельсами можно пренебречь и принять вертикальные нагрузки в контакте колес с рельсами постоянными и равными между собой для каждого колеса колесной пары;

не рассматривается влияние расхождения характеристик тяговых двигателей и диаметров бандажей колесных пар на износ бандажей, так как нет достоверных данных о системе поосного управления мощностью;

крутильные противофазные колебания колесной пары не рассматриваются, т. е. колесная пара принимается как абсолютно твердое тело.

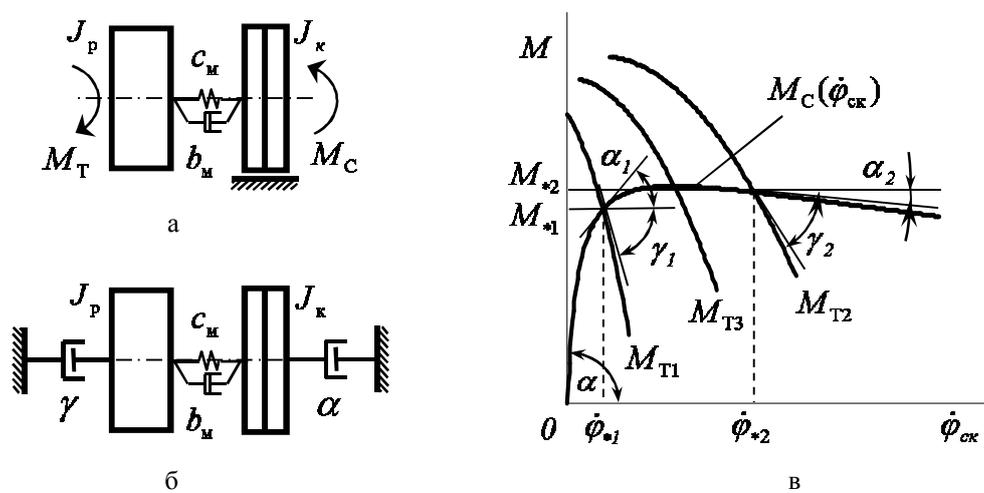


Рисунок 1 – Модель крутильной системы привода (а, б); совмещенные характеристики приведенного тягового момента и момента сцепления (в)

Последнее допущение принято для упрощения анализа динамических процессов. В данном случае такое упрощение не является принципиальным при рассмотрении интересующих явлений. При необходимости не представляет сложности рассмотреть и угловые противофазные колебания колесной пары [2].

Движение модели привода описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} J_p \ddot{\varphi}_p + b_m (\dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_k) + c_m (\varphi_p - \varphi_k) = M_T(\dot{\varphi}_p); \\ J_k \ddot{\varphi}_k + b_m (\dot{\varphi}_k - \dot{\varphi}_p) + c_m (\varphi_k - \varphi_p) = -M_C(\dot{\varphi}_{ck}), \end{cases} \quad (1)$$

где φ_p и φ_k – угловые координаты приведенного к оси колесной пары ротора тягового электродвигателя (ТЭД) и колесной пары соответственно;

J_p и J_k – приведенный к оси колесной пары момент инерции ротора ТЭД и момент инерции колесной пары относительно оси вращения;

c_m и b_m – торсионная жесткость и коэффициент торсионного демпфирования связи ротора ТЭД с колесной парой;

$M_T(\dot{\varphi}_p)$ и $M_C(\dot{\varphi}_{ck})$ – приведенная к оси колесной пары тяговая характеристика и характеристика сцепления колес с рельсами.

Перейдем к динамическим координатам, исключая постоянные составляющие угловых скоростей и моментов. Для этого разложим зависимости $M_T(\dot{\varphi}_p)$ и $M_C(\dot{\varphi}_{ck})$ в ряд Тейлора в окрестности равновесных тяговых режимов $[M_*, \dot{\varphi}_*]$ с удержанием только членов разложения первого порядка малости. Тогда система (1) в вариациях примет вид:

$$\begin{cases} J_p \dot{\varphi}_p + b_m (\dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_{ck}) + c_m (\varphi_p - \varphi_{ck}) = -\gamma \dot{\varphi}_p; \\ J_k \dot{\varphi}_{ck} + b_m (\dot{\varphi}_{ck} - \dot{\varphi}_p) + c_m (\varphi_{ck} - \varphi_p) = -\alpha \dot{\varphi}_{ck}, \end{cases} \quad (2)$$

где γ и α – соответственно жесткость тяговой характеристики ТЭД и угловой коэффициент касательной к характеристике сцепления в точке, соответствующей режиму $[M_*, \dot{\varphi}_*]$.

Динамическая модель, соответствующая системе (2), показана на рисунке 1, б. Характеристическое уравнение системы (2) имеет вид:

$$J_p J_k p^3 + (\gamma J_k + b_m J_k + J_p b_m + J_p \alpha) p^2 + (\gamma b_m + \gamma \alpha + b_m \alpha + c_m J_k + c_m J_p) p + c_m (\gamma + \alpha) = 0. \quad (3)$$

В соответствии с критерием Рауса – Гурвица система будет находиться на границе устойчивости, если будет выполняться равенство

$$(\gamma J_k + b_m J_k + J_p b_m + J_p \alpha)(\gamma b_m + \gamma \alpha + b_m \alpha + c_m J_k + c_m J_p) - J_p J_k c_m (\gamma + \alpha) = 0. \quad (4)$$

Решая уравнение (4) относительно γ при заданных параметрах модели и варьируя параметром α , получаем зависимость, $\gamma(\alpha)$ – рисунок 2, которая является границей устойчивости системы.

В расчете принято: $J_p = 0,67 \text{ тм}^2$, $J_k = 0,43 \text{ тм}^2$, $c_m = 1800 \text{ кНм}$, что соответствует параметрам электровоза ЭП20 [1].

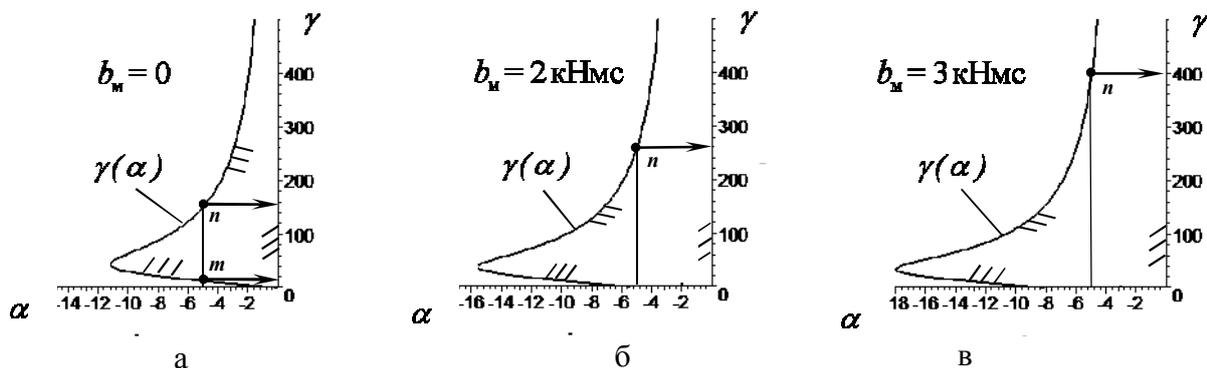


Рисунок 2 – Области устойчивости системы в пространстве ее параметров при различных значениях коэффициента демпфирования b

На рисунке 2 штриховка от границы устойчивости $\gamma(\alpha)$ направлена в область параметров, при которых система устойчива.

Как следует из рисунка 2, кривая $\gamma(\alpha)$ имеет два характерных участка: 1-й участок начинается на оси абсцисс графика и проходит влево вверх до точки перегиба, от которой начинается 2-й участок, идущий вправо вверх в область достаточно больших значений γ . На графике значения γ ограничены реальными величинами этого параметра.

Отметим, что рассматриваются только отрицательные значения α , так при положительных значениях α данная система всегда устойчива по отношению к фрикционным автоколебаниям.

В соответствии с рисунком 1 положительным значениям α соответствует равновесный режим $[M_{*1}, \dot{\varphi}_{*1}]$ с тяговым моментом M_{T1} . Отрицательным значениям α соответствует равновесный режим $[M_{*2}, \dot{\varphi}_{*2}]$ с тяговым моментом M_{T2} . Для режима с тяговым моментом M_{T3} момент сцепления M_C достигает максимума, при котором $\alpha = 0$. Таким образом, исследованию на устойчивость подлежит режим $[M_{*2}, \dot{\varphi}_{*2}]$.

Пусть демпфирование в связи ротора ТЭД с колесной парой отсутствует: $b_m = 0$ – рисунок 2, а. Тогда, например, при $\alpha = -5 \text{ кНмс}$ возможны два критических значения γ , соответствующие точкам m и n на рисунке 2, а ($\gamma_m = 12,52 \text{ кНмс}$, $\gamma_n = 150,0 \text{ кНмс}$). Система устойчива, если выполняется условие

$$\gamma_m < \gamma < \gamma_n. \quad (5)$$

Если $\gamma < \gamma_m$, то в системе развиваются автоколебания с частотой ω_m , определяемой по выражению

$$\omega_m = \sqrt{c_m \left(\frac{1}{J_p} + \frac{1}{J_k} \right)} = \sqrt{1800 \left(\frac{1}{0,67} + \frac{1}{0,43} \right)} = 82,9 \text{ с}^{-1} = 13,19 \text{ Гц}. \quad (6)$$

Такая частота соответствует собственным колебаниям двухмассовой крутильной системы. Из-за присутствия в системе диссипации [3, 4] фактическая частота $\bar{\omega}_m$ отличается от ω_m и равна $81,71 \text{ с}^{-1}$.

Как это ни парадоксально выглядит, но с увеличением жесткости характеристики ТЭД (что равноценно увеличению демпфирования) до величины $\gamma > \gamma_n$ динамическая система теряет устойчивость и в ней развиваются автоколебания с частотой ω_n , которая определяется по выражению

$$\omega_n = \sqrt{\frac{c_m}{J_k}} = \sqrt{\frac{1800}{0,43}} = 64,7 \text{ с}^{-1} = 10,3 \text{ Гц}, \quad (7)$$

что соответствует свободным колебаниям одномассовой крутильной системы с «зашемленным ротором» – ротор ТЭД в колебаниях не участвует. Фактическая частота, полученная при численном интегрировании, $\bar{\omega}_n = 65,31 \text{ с}^{-1}$. Вычисленная по формуле (7) частота мало отличается от низкой частоты, полученной в работе [1], – $\omega_1 = 63,48 \text{ с}^{-1} = 10,1 \text{ Гц}$. Различие обусловлено тем, что в работе [1] колесная пара представлена двухмассовой системой, состоящей из двух колес, связанных упругой осью [5].

Амплитуда скорости скольжения колес при обеих рассмотренных формах колебаний с погрешностью не более 5 % равна равновесной скорости скольжения [2]: $\dot{\varphi}_{кА} = \dot{\varphi}_*$.

Варианты, когда демпфирование $b_m = 2 \text{ кНмс}$ и $b_m = 3 \text{ кНмс}$, а $\alpha = -5 \text{ кНмс}$, показаны на рисунках 2, б и 2, в.

Как следует из рисунка 2, демпфирование расширяет зону устойчивости системы. Однако при больших значениях γ (например, $\gamma > 400 \text{ кНмс}$) и $|\alpha| > b_m$ фрикционные автоколебания в системе «колесо – рельс» неизбежны.

Необходимо уточнить формулировку «большие значения γ ».

Такие параметры системы, как J_p, J_k, c_m, b_m и другие конструкционные параметры, можно условно назвать внутренними, значения которых достоверно известны. А такой параметр, как α , может быть определен приблизительно, так как он является для колесной пары внешним фактором и зависит от свойств контакта колес с рельсами, которые не стабильны и могут изменяться в широких пределах. Достоверно лишь то, что при переходе через максимум характеристики сцепления этот параметр меняет знак с положительного на отрицательный.

По данным работ [6 – 8] для восходящего участка характеристики сцепления $\alpha^{\max} = 1000 \div 1500 \text{ кНмс}$, а для нисходящего участка $|\alpha|^{\max} = 10 \div 15 \text{ кНмс}$.

Что касается параметра γ , то для характеристики асинхронного ТЭД типа ДТА-1200А его можно в первом приближении определить для номинального режима [9]:

$M_{\text{ЭН}} = 8,66 \text{ кНм}$, $\omega_{\text{Н}} = 410 \text{ с}^{-1}$. При скольжении 1 % и перепаде момента от 0 до $M^{\text{max}} = 1,5M_{\text{ЭН}}$ получим: $\gamma_{\text{ЭН}} = 1,5 \cdot 8,66 / 4,1 = 3,17 \text{ кНмс}$. А с учетом передаточного отношения тягового редуктора электровоза ЭП20 $u = 5.17$ приведенная к колесной паре величина γ^* составит: $\gamma^* = \gamma_{\text{ЭН}} u^2 = 3,17 \cdot 26,73 = 84,73 \text{ кНмс}$, что соизмеримо с величинами γ , показанными на рисунке 2, при которых система может терять устойчивость.

Однако фактическая величина γ определяется не только характеристикой ТЭД, а и системой управления тягой, которая способна поддерживать постоянную угловую скорость ротора ТЭД при изменяющемся в широких пределах моменте. И если жесткость тяговой характеристики определяется соотношением $\bar{\gamma} = \Delta M / \Delta \omega$, то при $\Delta \omega \rightarrow 0$ (высокое качество регулирования) фактическое значение параметра γ может оказаться в десятки раз больше γ^* , рассчитанного по характеристике ТЭД, вследствие чего возникает эффект «заземленного ротора», и даже при малых превышениях $|\alpha|$ над b_m в системе возможно развитие фрикционных автоколебаний.

Как следует из полученных результатов, снизить вероятность появления автоколебаний может увеличение демпфирования в муфтах полого вала b_m , что потребует дополнительных конструкционных доработок, подбора материала упругих элементов и пр., но полностью не решает задачу снижения износа колес и рельсов.

Причиной повышенного износа бандажей и рельсов могут являться не только фрикционные автоколебания, но и просто высокие скорости скольжения при реализации тяговых моментов, близких к максимальным по условиям сцепления моментам.

Из сравнения режимов $[M_{*1}, \dot{\phi}_{*1}]$ и $[M_{*2}, \dot{\phi}_{*2}]$ на рисунке 1, в следует, что при различии тягового момента на единицы процентов мощность, потерянная на трение, в режиме $[M_{*2}, \dot{\phi}_{*2}]$ в разы больше, чем в режиме $[M_{*1}, \dot{\phi}_{*1}]$, за счет кратного различия в скоростях скольжения. Поэтому с точки зрения износа бандажей и рельсов режим $[M_{*2}, \dot{\phi}_{*2}]$ себя не оправдывает.

Для решения проблемы снижения износа при реализации максимальной тяги необходимо перейти к тяговым характеристикам, расположенным между кривыми M_{T1} и M_{T3} на рисунке 1, что в принципе очевидно – минимальные скорости скольжения при максимальных касательных силах в контакте колеса с рельсом.

Но как реализовать такие режимы, если нет информации об истинной скорости скольжения? Ее невозможно получить в принципе, так как не известна скорость качения колес, не нагруженных тяговым моментом, – у электровоза таких свободных осей нет. Задача точного измерения скорости скольжения дополнительно усложняется тем, что все параметры контакта колеса с рельсом имеют динамические составляющие, которые в основном носят случайный характер.

Следовательно, необходимо изменить постановку задачи для системы автоматического управления тягой – ориентироваться не только на абсолютную скорость вращения ротора ТЭД для задания частоты питающего напряжения (с учетом скольжения электромагнитного поля), а и на результат взаимодействия колес с рельсами.

Если при увеличении частоты или напряжения (а они у асинхронного ТЭД взаимосвязаны) в крутильной системе привода развиваются фрикционные автоколебания, то необходимо частоту или напряжение уменьшить до того уровня, при котором автоколебания не возникают.

Такой принцип формирования обратной связи, построенной на анализе динамических процессов в системе «тяговый привод – путь», предложен в работе [10]. Там же приведены результаты натурных испытаний. В работе [10] анализ динамических процессов рекомендован как средство для прогнозирования боксования. Однако система контроля сцепления (СКС) колес с рельсами может иметь гораздо более широкий диапазон применения.

Работа СКС основана на методах вибродиагностики динамических систем, цель которой – распознавание состояния системы по характерным шумам и вибрациям.

В состав СКС входят интеллектуальные датчики [11, 12], установленные на буксах колесных пар. Букса – корпус подшипника, в котором вращается ось колесной пары. Именно на буксу передаются тяговые усилия от оси и вибрации и шумы, возникающие в контакте колеса с рельсом [10].

Интеллектуальный датчик – это в данном случае двухосевой акселерометр и микроконтроллер, обрабатывающий сигналы акселерометров. Акселерометры регистрируют продольные и вертикальные ускорения буксы. С выхода контроллера в систему управления тягой поступает дискретный многоуровневый сигнал, отражающий состояние в контакте колес с рельсами, соответствующий положению равновесного режима на характеристике сцепления в условиях возмущенного движения. Косвенно акселерометры способны регистрировать шумы и вибрации, характерные для повышенных скоростей скольжения и фрикционных автоколебаний. Таким образом, отпадает необходимость в точном измерении скорости скольжения, а управление тягой происходит с учетом фактического состояния фрикционного контакта.

Благодаря дополнительному каналу интеллектуальной обратной связи появляется возможность оптимального управления тягой – устойчиво и с минимальными потерями на трение реализовать силу тяги, максимальную по условиям сцепления в данный момент.

Важным преимуществом СКС является то, что редуцирование информационного потока происходит на уровне интеллектуальных датчиков (повышаются надежность и помехозащищенность информационных каналов) и появляется возможность усовершенствования и адаптации алгоритма распознавания и кластеризации сигналов о состоянии фрикционного контакта в процессе эксплуатации.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. В работе выдвигается предположение о том, что причиной повышенного износа и разрушения бандажей колес являются высокие скорости скольжения в системе «колесо – рельс» и фрикционные автоколебания, возникающие в режимах тяги.

2. Построены области устойчивости тягового привода электровоза ЭП20 в пространстве его параметров по отношению к фрикционным автоколебаниям.

3. Обоснована структура математической модели асинхронного тягового привода с «заземленным ротором» для исследования фрикционных автоколебаний.

4. Устойчивость динамической системы, а также форма и частота развивающихся автоколебаний зависят от свойств контакта колес с рельсами, конструктивных параметров тягового привода, в частности – от фактической жесткости тяговой характеристики ТЭД, которая в свою очередь определяется системой автоматического управления тягой.

5. Предложено решение для снижения износа бандажей и оптимального управления тягой за счет установки на электровозе СКС, обеспечивающей дополнительный канал обратной связи для системы поосного управления мощностью.

6. Представленные в статье методики и рекомендации применимы для любых конструкций локомотивных тяговых приводов.

Список литературы

1. Коропец, П. А. Динамические процессы в тяговом приводе электровоза ЭП20 в режиме боксования / П. А. Коропец, С. А. Хачкина, А. В. Кашуба. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 1 (33). – С. 38 – 48.

2. Коропец, П. А. О влиянии электромагнитных процессов на устойчивость тягового привода локомотива в режиме боксования / П. А. Коропец. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2012. – № 4 (34). – С. 12 – 19.

3. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний / Я. Г. Пановко. – Москва : Наука, 1980. – 272 с. – Текст : непосредственный.

4. Магнус, К. Колебания / К. Магнус. – Москва : Мир, 1982. – 304 с. – Текст : непосредственный.
5. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. / под ред. В. В. Болотина. – Москва : Машиностроение, 1978. – 352 с. – Текст : непосредственный.
6. Голубенко, А. Л. Сцепление колеса с рельсом / А. Л. Голубенко. – Киев : ВИПОЛ, 1993. – 448 с. – Текст : непосредственный.
7. Ляпушкин, Н. Н. Теоретические основы взаимодействия колеса локомотива с рельсом в нано диапазоне : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация», 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Ляпушкин Николай Николаевич ; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2008. – 46 с. – Текст : непосредственный.
8. Павленко, А. П. Прогнозирование динамических качеств и оптимизация параметров системы «экипаж – тяговый электропривод – путь» перспективных локомотивов : специальность 05.05.01 «Локомотивы (электровозы, тепловозы, газотурбовозы) и вагоны» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Павленко Альберт Прокофьевич ; Ворошиловградский машиностроительный институт. – Ворошиловград, 1980. – 384 с. – Текст : непосредственный.
9. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Бахвалов, А. А. Зарифьян, В. Н. Кашников, П. Г. Колпахчян [и др.]; под ред. Е. М. Плохова. – Москва : Транспорт, 2001. – 286 с. – Текст : непосредственный.
10. Коропец, П. А. Прогнозирование боксования колесных пар подвижного состава : монография / П. А. Коропец. – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – 166 с. – Текст : непосредственный.
11. Интеллектуальный датчик вибрации. – Текст : электронный. – URL: <https://www.roscosmo-s.ru/26734/> (дата обращения: 28.02.2021).
12. Синютин, С. А. Цифровая обработка сигналов в интеллектуальных датчиках вибрации / С. А. Синютин. – Текст : электронный. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-obrabotka-signalov-v-intellektualnyh-datchikah-vibratsii> (дата обращения: 28.02.2021).

References

1. Koropets P.A., Khachkinayan S.A., Kashuba A.V. Dynamic processes in the traction drive of the EP20 electric locomotive in skipping mode [Dinamicheskiye protsessy v tyagovom privode elektrovoza EP20 v rezhime boksovaniya]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 1 (33), pp. 38 – 48.
2. Koropets P. A. On the influence of electromagnetic processes on the stability of the traction drive of a locomotive in skid mode [O vliyaniy elektromagnitnykh protsessov na ustoychivost' tyagovogo privoda lokomotiva v rezhime boksovaniya]. *Vestnik transporta Povolzh'ya – Bulletin of Transport of the Volga Region*, 2012, no. 4 (34), pp. 12 – 19.
3. Panovko Ya. G. *Vvedeniye v teoriyu mekhanicheskikh kolebaniy* (Introduction to the theory of mechanical vibrations). Moscow: Nauka Publ., 1980, 272 p.
4. Magnus K. *Kolebaniya* (Oscillations). Moscow: Mir Publ., 1982, 304 p.
5. Chelomei V. N. *Vibratsii v tekhnike. Kolebaniia lineinykh sistem* (Vibration in engineering). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978, 352 p.
6. Golubenko A. L. *Stsepleniye koleasa s rel'som* (Wheel-to-rail coupling). Kiev: VIPOL Publ., 1993. 448 p.
7. Lyapushkin N. N. *Teoreticheskiye osnovy vzaimodeystviya koleasa lokomotiva s rel'som v nano diapazone* (Theoretical foundations of the interaction of a locomotive wheel with a rail in the nano range). Doctor of sciences in engineering thesis abstract, Moscow, МИИТ, 2008, 46 p.
8. Pavlenko A. P. *Prognozirovaniye dinamicheskikh kachestv i optimizatsiia parametrov sistemy*

«*ekipazh – tiagovyi elektroprivod – put'*» *perspektivnykh lokomotivov* (Prediction of dynamic qualities and optimization of parameters of the system «crew – traction electric drive – path» of promising locomotives). Doctor's of sciences in engineering thesis, Voroshilovgrad, 1980, 384 p.

9. Bakhvalov Yu. A., Zarifyan A. A., Kashnikov V. N., Kolpakhch'yan P. G. *Modelirovaniye elektromekhanicheskoy sistemy elektrovoza s asinkhronnym tyagovym privodom* (Modeling of an electromechanical system of an electric locomotive with an asynchronous traction drive) Moscow: Transport Publ, 2001, 286 p.

10. Koropets P. A. *Prognozirovaniye boksovaniya kolesnykh par podvizhnogo sostava* (Prediction of skidding of wheel pairs of a rolling stock). Rostov-on-Don, Rostov State Transport University Publ., 2012, 166 p.

11. *Intellektual'nyy datchik vibratsii* (Intelligent vibration sensor), Available at: <https://www.ros-cosmos.ru/26734/> (accessed 28 February 2021).

12. Sinyutin S. A. Digital signal processing in intelligent vibration sensors [Tsifrovaya obrabotka signalov v intellektual'nykh datchikakh vibratsii]. Available at: <https://cyberleninka.ru/artic-le/n/tsifrovaya-obrabotka-signalov-v-intellektualnyh-datchikah-vibratsii> (accessed 28 February 2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коропец Петр Алексеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Теоретическая механика».

Тел.: +7-951-831-68-24.

E-mail: pkoropets@gmail.com

Кашуба Александр Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Инженер кафедры «Безопасность жизнедеятельности».

Тел.: +7-952-605-60-66.

E-mail: kashuba-av@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Коропец, П. А. Интеллектуальное управление тягой в системе «колесо – рельс» / П. А. Коропец, А. В. Кашуба. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 32 – 39.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Koropets Peter Alexeyevich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Senior researcher of the department «Theoretical Mechanics».

Phone: +7-951-831-68-24.

E-mail: pkoropets@gmail.com

Kashuba Alexander Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Engineer of the department «Life Safety».

Phone: +7-952-605-60-66.

E-mail: kashuba-av@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Koropets P. A., Kashuba A. V. Intelligent traction control in the «wheel – rail» system. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 1 (45), pp. 32 – 39 (In Russian).

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РЕСУРСА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Проведен анализ влияния эксплуатационных режимов работы и развитие остаточного ресурса, выраженных через тепловой износ изоляции тягового асинхронного двигателя. Предметом исследования является получение новых закономерностей изменения остаточного ресурса изоляции обмотки статора, позволяющих определять удельный ресурс обмотки по каждому режиму тягового асинхронного двигателя. Целью работы является создание системы определения и оценки остаточного ресурса путем разработки методов и технических средств контроля и комплексной диагностики, а также теоретического обоснования с применением метода определения дополнительных тепловых износов изоляции обмотки статора с учетом совмещенного воздействия пускового переходного процесса, длительно допустимого графика нагрузки и предельно допустимого значения температуры. Для определения и оценки возможного остаточного ресурса использованы метод последовательного влияния пусковых переходных процессов, предельно допустимых графиков нагрузки, а также длительных перегрузок по максимальной допустимой температуре, имеющих место при различных режимных факторах при движении электроподвижного состава.

Показана целесообразность определения функции неравномерной отработки ресурса, имеющего монотонный характер, и аппроксимируемых линейной двойной показательной и экспоненциальной функций. Экспериментально определены удельные коэффициенты пропорциональности, характеризующие снижение электрической прочности изоляции при последовательном чередовании предельно и длительно допустимых нагрузок и предельно допустимых значений температуры с последующим получением аналитической зависимости, предопределяющей ресурс изоляции. Показано, что определение и оценка остаточного ресурса при характерных режимах практически позволяют уточнить сроки проведения профилактических мероприятий, прогнозировать ожидаемую длительность безаварийной работы и предупредить преждевременный выход асинхронного тягового двигателя из строя.

Ключевые слова: математическая модель, ресурс, асинхронный тяговый двигатель, предельно допустимая температура, тепловой износ, продление срока эксплуатации.

Sulton F. Amirov, Mirjalil S. Yakubov, Ulugbek S. Israilov

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Uzbekistan

DEVELOPMENT THE MODEL OF A RESOURCE AND MANAGEMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF AN ASYNCHRONOUS TRACTION MOTOR OF AN ELECTRIC ROLLING STOCK

Abstract. The analysis of the influence of operating modes and the development of the residual life, expressed through thermal wear of the insulation of the asynchronous traction motor. The research subject is to obtain new patterns of change in the residual life of the stator winding insulation, which make it possible to determine the specific life of the winding for each mode of the asynchronous traction motor. The research aim is to create a system for determining and assessing the residual life by developing methods and technical means of monitoring and comprehensive diagnostics, as well as theoretical justification using the method for determining additional thermal wear of the stator winding insulation, taking into account the combined effect of the starting transient process, the long-term allowable load schedule and the maximum allowable temperature values. To determine and assess the possible residual life, the method of sequential influence of starting transients, maximum permissible load curves, as well as long-term overloads at the maximum permissible temperature, taking place under various operating factors during the movement of electric rolling stock, was used.

The expediency of determining the function of uneven resource development, which has a monotonic character and is approximated by a linear double exponential and exponential functions, is shown. Specific proportionality coefficients are experimentally determined, which characterize the decrease in the dielectric strength of the insulation with sequential alternation of maximum and long-term permissible loads and maximum permissible temperature values, followed by obtaining an analytical relationship that predetermines the insulation resource. It is shown that the determination and assessment of the residual resource under typical modes practically makes it possible to clarify the timing of

preventive measures and predict the expected duration of accident-free operation and forestall the premature failure of the asynchronous traction motor.

Keywords: mathematical model, resource, asynchronous traction motor, maximum permissible temperature, thermal wear, extension of service life.

Эффективность научно-технического прогресса зависит от того, насколько разрешена проблема рационального использования электрооборудования. Разработка и широкое внедрение методов и средств технического контроля и диагностики объектов являются одними из важнейших факторов повышения эффективности использования оборудования и сокращения расходов на их эксплуатацию.

Асинхронный тяговый двигатель (АТД) является одним из самых ответственных элементов электроподвижного состава (ЭПС). Анализ отказов оборудования ЭПС по данным компании Siemens показывает, что из 463 отказов и предотказных состояний ЭПС 47 относятся к АТД. По данным АО «Uzbekiston temir yullari» в 49 электровозах применяются 294 АТД, из которых 20 – 25 % преждевременно выходят из строя. Представляет интерес исследование влияния пусковых переходных процессов и предельно допустимых графиков нагрузки, а также длительных перегрузок по максимальной допустимой температуры на тепловой износ изоляции АТД, предварительно прогретого до номинального превышения температуры [1 – 3]. Характерной особенностью АТД является то, что при их предотказном состоянии на предельной электрической прочности могут сказываться вероятности работы по условиям отсутствия безотказной работы $P_1(L)$, а также износных отказов изоляции в переходных $P_2(L)$ и стационарных режимах работы $P_3(L)$.

Модель оценки вероятности исправной работы АТД должна учитывать различные режимы эксплуатации с учетом текущей величины сработанного ресурса, представляемого в виде [4]:

$$r_{ij}(t, \varepsilon_{ij}) = -\ln P(t, \varepsilon_{ij}), \quad (1)$$

где ε_{ij} – тепловой износ изоляции i -го элемента; j – вид повреждения.

С условием того, что АТД обычно рассматривается состоящим из трех элементов (обмотка статора, магнитная система, обмотка ротора), соединенных последовательно в смысле надежности, вероятность безотказной работы определяется согласно выражению [5]:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t), \quad (2)$$

где $P_1(t) = \exp(-\lambda_\delta t)$ – вероятность безотказной работы по условию отсутствия внезапных отказов; $P_2(t)$ – вероятность износных отказов; $P_3(t)$ – вероятность отказов при нестационарных режимах работы.

Статически-аналитическая обработка по вероятностям информации и сопоставление ее результатов за определенный промежуток времени эксплуатации позволяют с высокой достоверностью оценить тенденцию к изменению показателей, характеризующих техническое состояние АТД в целом и ее отдельных элементов, а также прогнозировать время достижения предельных значений оставшегося ресурса и принимать своевременные решения по приведению их к нормам.

Внешние факторы, режимы работы и конструктивные параметры АТД по-разному влияют на неравномерную отработку ресурса, поэтому график скорости наработки целесообразно определять с учетом его монотонного характера и аппроксимировать линейной $r_{ij} = a - bt$, двойной показательной $r_c = cae^{-at - ce^{-at}}$ и экспоненциальной $r_c = \lambda e^{-\lambda t}$ функциями (рисунок 1) [6].

Актуальной задачей является разработка математической модели остаточного ресурса АТД с учетом влияния его режимов работы и основных воздействующих факторов. Модель остаточного ресурса позволит повысить точность определения сроков предупредительных ремонтов, оценить показатели надежности и эффективность условий длительного использования АТД, что способствует снижению эксплуатационных расходов, максимальному продлению сроков службы и рациональному использованию заложенного текущего ресурса.

Размерность ресурса принимается в таких же единицах измерения, в каких выражена наработка.

К главным факторам, ускоряющим износ изоляции АТД, относятся термические и электродинамические воздействия, которые преимущественно проявляются при пусках и длительных перегрузках [4 – 6].

Ресурс изоляции обмоток АТД наиболее полно определяется относительными величинами тепловых износов, обусловленными длительными перегрузками, влиянием пусковых переходных процессов и предельно допустимыми значениями температуры за время T [10]:

$$R(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} e^{\left(\frac{\alpha\tau_{п. д}(t)}{\tau_{п. д. баз}} + \frac{\beta\tau_{д. д}(t)}{\tau_{д. д. баз}} + \frac{\gamma\tau_{\theta}(t)}{\tau_{\theta баз}}\right)} dt, \quad (3)$$

где α , β , γ – соответственно удельные коэффициенты пропорциональности, характеризующие снижение электрической прочности изоляции при чередовании предельно и длительно допустимых нагрузок $\tau_{п. д}(t)$, $\tau_{д. д}(t)$ и предельно допустимых значений температуры, соответствующих базовым значениям $\tau_{\theta}(t)$, $\tau_{п. д}(t)$, $\tau_{д. д}(t)$ и $\tau_{\theta}(t)$.

Коэффициенты пропорциональности α , β , γ определены нами анализом экспериментальных данных на основе математических моделей с использованием MatLab: $\alpha = 4,5 \dots 6$; $\beta = 2 \dots 3$; $\gamma = 1 \dots 3,5$. При этом АТД одного и того же типа были разбиты на три партии. На первой из них были проведены опыты только при предельно допустимых уровнях нагрузки, во второй партии опыты проводились только в длительно допустимых режимах, а в третьей партии исследовались пусковые переходные процессы. Через определенное время $\Delta t \approx T/20$ был проведен второй этап экспериментов. Виды воздействий и нагрузки были изменены. На первой партии были проведены эксперименты по длительно допустимым нагрузкам, на второй партии проводили опыты при предельно допустимых уровнях нагрузки, на третьей партии проведены опыты по пусковым переходным процессам.

Оценка трех указанных действий на ресурс АТД имеет большое научное и практическое значение. С учетом этого нами проведены ускоренные испытания АТД для определения оценки электрической прочности. Задача заключалась в оценке скорости изменения активации термодинамических процессов, протекающих в изоляции, нарушающих диэлектрическую прочность.

По известному закону Вант-Гоффа – Аррениуса энергоактивацию процесса снижения прочности электрической изоляции под воздействием тепловых процессов можно представить также в виде трех составляющих, указанных в работах [5, 6], и получить аналитическую зависимость, предопределяющую ресурс изоляции АТД в виде [8]:

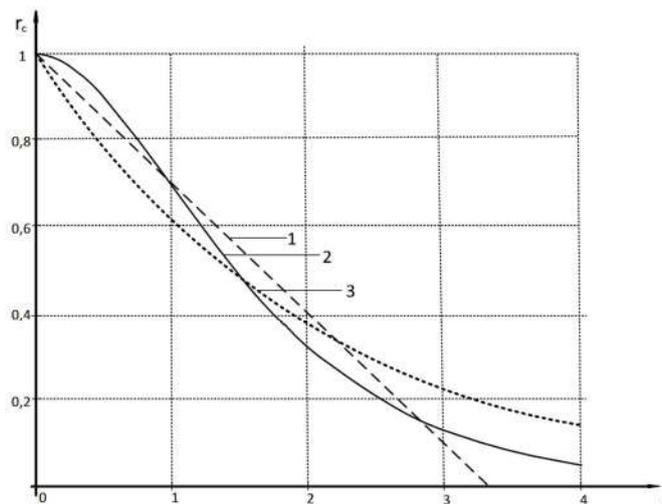


Рисунок 1 – График скорости наработки ресурса АТД, аппроксимирующийся линейной (1), двойной показательной (2) и экспоненциальной (3) функциями

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0} \cdot \left(1 - \sqrt{kT e^{(\alpha\tau_{\text{н.д}}(t) + \beta\tau_{\text{д.д}}(t) + \gamma\tau_{\theta}(t))}} \right), \quad (4)$$

где $U_{\text{пр}0}$ – величина пробивного напряжения в момент начала эксплуатации; k – константа.

Выражение пускового переходного процесса превышения температуры обмотки $\tau_{\text{н}}(t)$ АД можно записать так [4]:

$$\tau_{\theta}(t) = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{\text{н}} \right) e^{\left(\frac{3\alpha c r_0}{c} (t_{\text{п}1} I_{\text{п}1}^2 + t_{\text{п}2} I_{\text{п}2}^2 + t_{\text{п}3} I_{\text{п}3}^2) \right)} - \frac{1}{\alpha}, \quad (5)$$

где $\tau_{\text{н}}$ – превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды при номинальной нагрузке, °C; α_c – температурный коэффициент сопротивления материала проводников обмотки, 1/°C; r_0 – сопротивления обмотки одной фазы при температуре окружающей среды; $I_{\text{п}1}$, $I_{\text{п}2}$ и $I_{\text{п}3}$ – средние значения пускового тока на первом, втором и третьем участках пуска, соответствующие времени $t_{\text{п}1}$, $t_{\text{п}2}$ и $t_{\text{п}3}$.

Влияние графика нагрузки на процесс теплового износа изоляции определяется по температуре в конце i -го участка графика с заменой его среднеквадратичным значением нагрузки [4]:

$$\tau(t) = \tau_{1y} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_{i-1} e^{-\frac{t_i}{T}}, \quad (6)$$

где $\tau_{1y} = \frac{\tau_{1\text{н}} + \tau_{1\text{к}}(k^2 - 1)}{1 - \alpha_c \tau_{1\text{к}}(k^2 - 1)}$ – установившееся превышение температуры обмотки АД в функции кратности тока нагрузки по отношению к номинальному с учетом влияния α_c – температурного коэффициента сопротивления материала проводника (для меди $\alpha_c = 0,003$ 1/°C); $\tau_{1\text{к}}$ – установившееся превышение температуры обмотки АД в опыте короткого замыкания; $\tau_{1\text{н}}$ – номинальная температура; T – теплоемкость i -го тела АД, Дж/°C, определяемого как $T = \sum_1^n C_i \tau_{i\text{н}} / \Delta P_{\text{н}}$ по рисунку 2, где C_j – теплоемкости каждого тела; $\Delta P_{\text{н}}$ – потери мощности обмоток.

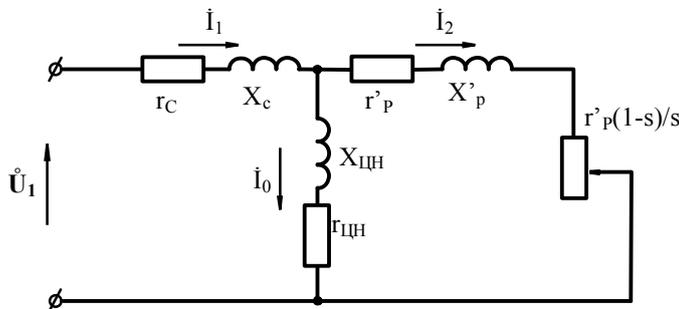


Рисунок 2 – Т-образная схема замещения асинхронного электродвигателя

Найдем превышение температуры при предельно допустимых значениях перегрузок, т. е. в пределах $(1,2 \div 1,8) I_{\text{н}}$ номинального тока АД типа 1ТВ2KF2624-3ЕА00 при номинальном напряжении на его зажимах, предварительно прогретого до номинального превышения температуры [4]:

$$\tau_m = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T}} \right) + \tau_{\text{н}} e^{-\frac{t_n}{T}}, \quad (7)$$

где $T = \frac{\sum_1^n C_i \tau_{i\text{н}}}{\Delta P_{\text{н}}}$ – рассчитанная эквивалентная постоянная времени АД, для двигателя типа 1ТВ2KF2624-3ЕА00 он равен 1378 °C; C_1 , C_2 , C_3 – теплоемкости обмотки статора, стали статора и обмотки ротора, Дж/°C; $\tau_{i\text{н}}$ – соответствующие превышения температуры указанных тел; $\Delta P_{\text{н}} = 53,6$ кВт – общие потери АД; τ_y – установившаяся температура $\tau_y = \frac{\Delta P_{\text{с.н}} + k_{\text{п}}^2 \Delta P_{\text{м.н}}}{A} = 133,87$ °C, $\Delta P_{\text{сн}} = 8,1$ кВт – расчетная постоянная потеря мощности в

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

стали в номинальном режиме; $k_n = 1,1$ – кратность превышения тока при учете работы АД с четырехквadrантным преобразователем 4QS; A – теплоотдача АД, $A = \frac{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{м.н}}{\tau_n} = 491,83 \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{°C}}$; $\tau_n = 98 \text{ °C}$ – номинальная температура АД при номинальных параметрах.

На основе паспортных данных и схемы замещения асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2KF2624-3ЕА00 (см. рисунок 2) в таблице приведены паспортные и рассчитанные теплотехнические данные по формулам (5) – (7) [9, 10].

Паспортные [8] и рассчитанные теплотехнические данные тягового электродвигателя типа 1ТВ2KF2624-3ЕА00

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальная мощность на валу $P_{2н}$, кВт	1020
Коэффициент полезного действия	0,86
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,95
Класс изоляции, °С	200
Номинальное фазное напряжение $U_{ф.н}$, В	1148
Номинальное скольжение S_n	0,0167
Номинальная частота вращения ротора n , об/мин	1475
Синхронная частота вращения, об/мин	1500
Кратность пускового тока при прямом пуске	7,5
Кратность пускового момента m_n	2,5
Кратность критического момента m_n	2,5
Критическое скольжение	0,28
Критическая частота тока ротора ω_k	2,937
Масса меди, кг	100,64
Масса стали, кг	1286
Общие потери мощности $\Sigma \Delta P$, кВт	53,6
Механические потери $\Delta P_{мех}$, кВт	2,7
Магнитные потери $\Delta P_{маг}$, кВт	8,1
Потери холостого хода $\Delta P_{х.х}$, кВт	10,8
Потери короткого замыкания $\Delta P_{к.з}$, кВт	48,2
Коэффициент рассеяния обмотки статора K	0,696
Постоянная константа соответствующей категории изоляции, В	10200
Теплоотдача электрического двигателя A , Дж/с °С	491,83
Эквивалентная постоянная времени T , с	1378
Активное сопротивление обмотки статора r_1 , Ом	0,0717
Индуктивность обмотки статора L_1 , Гн	0,0031
Приведенное активное сопротивление обмотки ротора r'_2 , Ом	0,0261
Приведенная индуктивность обмотки ротора L'_2 , Гн	0,00634
Индуктивность ветви намагничивания L_m , Гн	0,0235
Число пар полюсов p	2
Номинальный момент, кН·м	6,604

Расчет кривых значений дополнительных тепловых износов изоляции обмотки статора АД с учетом в результате совмещенного воздействия пускового переходного процесса $\tau_n(t)$, длительно допустимого графика нагрузки $\tau_y(t)$ и предельно допустимого значения температуры $\tau_m(t)$, выполненных с использованием MatLab, осуществлен по уравнению (рисунок 3):

$$\begin{aligned}
 E_{\text{доп}} = & \int_0^{t_{\text{п}}} e^{\left(B \left(\frac{1}{\theta_{\text{H}}} - \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{\text{H}} \right) e^{\left(\frac{3\alpha c r_0}{C} (t_{\text{п1}} I_{\text{п1}}^2 + t_{\text{п2}} I_{\text{п2}}^2 + t_{\text{п3}} I_{\text{п3}}^2) \right)} - \frac{1}{\alpha_{\text{H}}} + \vartheta_{\text{ср}} + 273 \right)} \right)} dt + \\
 & + \int_{t_{\text{п}}}^{t_{\text{п}} + 0,3T} e^{\left(B \left(\frac{1}{\theta_{\text{H}}} - \frac{1}{\tau_{\text{п}} \left(1 - e^{-\frac{1}{T}} \right) + \tau_{\text{п}} e^{-\frac{1}{T}} + \vartheta_{\text{ср}} + 273} \right)} \right)} dt + \\
 & + \int_{t_{\text{п}} + 0,3T}^{t_{\text{п}} + T} e^{\left(B \left(\frac{1}{\theta_{\text{H}}} - \frac{1}{\tau_{\text{y}} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{п}}}{T}} \right) + \tau_{\text{п}} e^{-\frac{t_{\text{п}}}{T}} + \vartheta_{\text{ср}} + 273} \right)} \right)} dt - (t_{\text{п}} + 5t) \cdot e^{\left(B \left(\frac{1}{\theta_{\text{H}}} - \frac{1}{\tau_{\text{H}} + \vartheta_{\text{ср}} + 273} \right)} \right)},
 \end{aligned} \tag{8}$$

где $\tau_{\text{y}} = \tau_{\text{H}} \frac{a + \kappa_{\text{п}}^2}{a + 1 - a\tau_{\text{H}}(\kappa_{\text{п}}^2 - 1)}$; $a = \frac{\Delta P_{\text{с.н}}}{\Delta P_{\text{м.н}}}$; $a = 0,004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $\kappa_{\text{п}} = 1,1$ – кратность превышения тока при учете работы АТД с четырехквadrантным преобразователем 4QS.

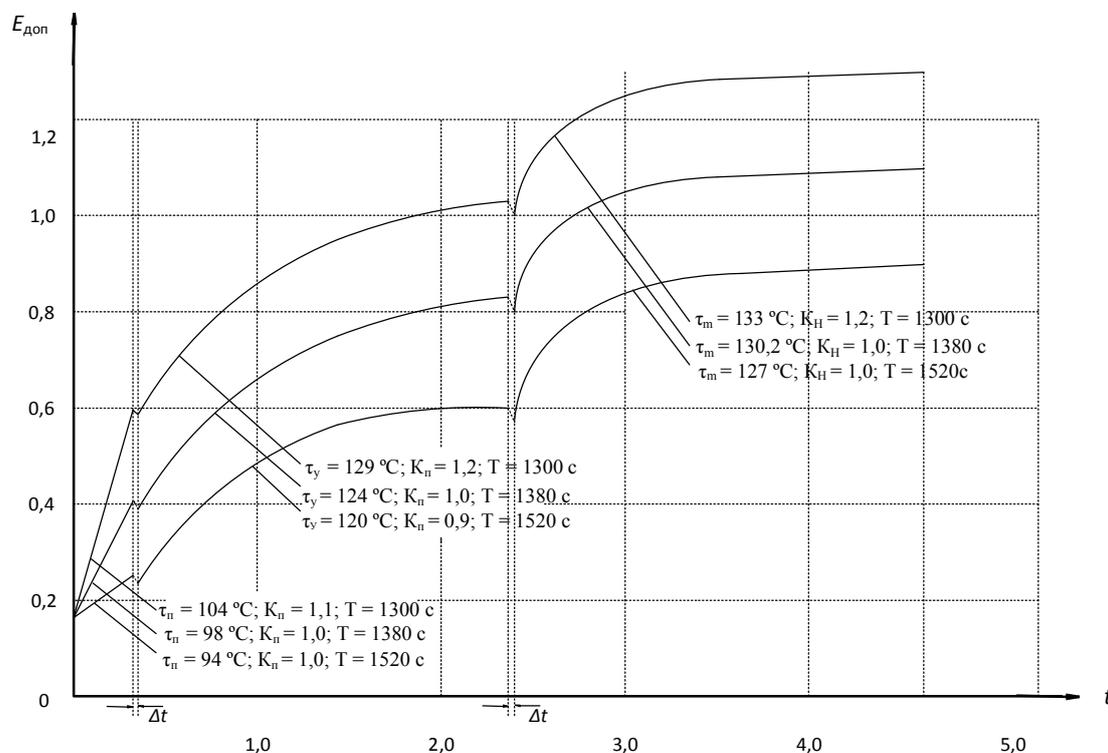


Рисунок 3 – Изменения дополнительного теплового износа изоляции обмоток АТД $E_{\text{доп}} = f(t_{\text{п}}, \tau_{\text{y}}, \tau_{\text{м}}, \kappa_{\text{н}})$ при различных значениях постоянного времени и температуры внешней среды

Анализ результатов исследования кривых теплового износа обмоток статора АТД с применением компьютерных расчетов программы Mathcad по данным, приближенным к реальным условиям эксплуатации отработки ресурса изоляции АТД дал возможность определить модель теплового износа изоляции при пусковых переходных процессах, совмещенных с длительно допустимыми графиками нагрузок и предельно допустимыми значениями температуры.

Процесс изменения дополнительного теплового износа изоляции обмоток АТД показывает, что он зависит от конструктивных параметров, т. е. с увеличением эквивалентной постоянной времени нагрева дополнительный тепловой износ изоляции уменьшается.

Получены графические зависимости износа обмоток АТД и величины, характеризующие ресурс обмоток в процессе эксплуатации АТД в различных режимах. Определение остаточ-

ного ресурса по характерным режимам позволит уточнить сроки проведения профилактических мероприятий, прогнозировать ожидаемую длительность безаварийной работы и предупредить преждевременный выход АТД из строя.

Список литературы

1. Петушков, М. Ю. Оценка ресурсосбережения электрооборудования / М. Ю. Петушков, А. С. Сарваров, О. В. Федоров. – Текст : непосредственный // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 3. – С. 24 – 28.
2. Похолков, Ю. П. Разработка методов исследования, расчета и обеспечения показателей надежности и долговечности изоляции обмоток асинхронных двигателей : специальность 05.09.02 «Электроизоляционная и кабельная техника» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Похолков Юрий Петрович ; Томский политехнический институт. – Томск, 1977. – 482 с. – Текст : непосредственный.
3. Гутов, И. А. Прогнозирование состояния электродвигателей на основе использования многофакторных моделей старения изоляции : специальность 05.20.02 «Электрификация сельскохозяйственного производства» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гутов Игорь Алексеевич ; Алтайский гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 1998. – 259 с. – Текст : непосредственный.
4. Овчаров, В. В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве : монография. – Киев : Украинская сельскохозяйственная академия, 1990. – 168 с. – Текст : непосредственный.
5. Галкин, В. Г. Надежность тягового подвижного состава / В. Г. Галкин, В. П. Парамзик, В. А. Четвергов. – Москва : Транспорт, 1981. – 184 с. – Текст : непосредственный.
6. Исаев, Н. П. Ускоренные испытания и прогнозирование надежности электрооборудования локомотивов / Н. П. Исаев, А. П. Матвеевич, Л. Г. Козлов. – Москва : Транспорт, 1994. – 248 с. – Текст : непосредственный.
7. Жарков, В. В. Метод диагностирования асинхронных электродвигателей и устройства его реализации / В. В. Жарков, В. И. Смирнов. – Текст : непосредственный // Вестник УрГТУ. – 2004. – № 3. – С. 39 – 44.
8. Турсунов, Х. М. Управление эксплуатационной надежностью электровозов серии «O`ZBEKISTON» : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Турсунов Хуршид Махмуджанович ; Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург, 2012. – 138 с. – Текст : непосредственный.
9. ГОСТ 17509-72. Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Методы определения точечных оценок показателей надежности по результатам наблюдений. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 53 с. – Текст : непосредственный.
10. ГОСТ 33943-2016. Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 15 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Petushkov M. Y., Sarvarov A. S., Fedorov O. V. Evaluation of resource saving electrical equipment [Osenka resursosberejeniya elektrooborudovaniya]. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont – Electrical equipment: operation and repair*, 2015, no. 3, pp. 24 – 28.
2. Poxolkov Y. P. *Razrabotka metodov issledovaniya, rascheta i obespecheniya pokazateley nadejnosti i dolgovechnosti izolyatsii obmotok asinhronnyh dvigateley* (Development of research methods, calculation and provision of indicators of reliability and durability of insulation of windings of induction motors). Doctor's of sciences in engineering thesis, Tomsk, 1977, 482 p.
3. Gutov I. A. *Prognozirovanie sostoyaniya elektrodvigateley na osnove ispolzovaniya mnogofaktornykh modeley stareniya izolyatsii* (Prediction of the state of electric motors based on the use of multifactor models of insulation aging). Ph. D. thesis, Barnaul, 1998, 259 p.

4. Ovcharov V. V. Eksploatatsionnie rejimy raboti i neprerivnaya diagnostika elektricheskikh mashin v selskoxozyaystvennom proizvodstve : monografiia (Operating modes and continuous diagnostics of electrical machines in agricultural production : monograph). Kiev: Ukrainian Agricultural Academy Publ., 1990, 168 p.

5. Galkin V. G. Paramzik V. P., Chetvergov V. A. *Nadejnost tyagovogo podvijnogo sostava* (Reliability of traction rolling stock). Moscow: Transport Publ., 1981, 184 p.

6. Isaev N. P., Matveyevich A. P., Kozlov L. G. *Uskorennye ispitaniya i prognozirovaniye nadejnosti elektrooborudovaniya lokomotivov* (Accelerated tests and predicting the reliability of electrical equipment for locomotives). Moscow: Transport Publ., 1994, 248 p.

7. Zharkov V. V., Smirnov V. I. Method of diagnostics of asynchronous electric motors and devices for its implementation [Metod diawnostirovaniya asinhronnyh elektrodvigatelye i ustroystva yego realizatsii]. *Vestnik UrGTU – Bulletin USTU*, 2004, no. 3, pp. 39 – 44.

8. Tursunov Kh. M. *Upravlenie eksploatatsionnoy nadyojnostyu elektrovozov serii «O`ZBEKISTON»* (Management of operational reliability of electric locomotives of the «O`ZBEKISTON» series). Ph. D. thesis, Saint-Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2012, 153 p.

9. *Nadejnost izdeliy mashinostroeniya. Sistema sbora i obrabotki informatsii. metody opredele-niya tochechnykh otsenok pokazatelye nadejnosti po rezultatam nablyudeniy GOST 17509-72* (Reliability of engineering products. System of collecting and selection the information. Methods definition of point estimations for reliability indices by observation results, GOST 17509-72), Moscow, Standardinform, 2015, 53 p.

10. *Nadejnost jeleznodorojnogo tyagovogo podvijnogo sostava GOST 33943-2016* (Reliability of railway traction rolling stock, GOST 33943-2016), Moscow, Standardinform, 2016, 15 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Амиров Султон Файзуллаевич

Ташкентский государственный университет транспорта (ТГТрУ).

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

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение», ТГТрУ.

Тел.: +99(871)-299-07-84.

E-mail: ulugbektashiit@gmail.com

Якубов Миржалил Сагатович

Ташкентский государственный университет транспорта (ТГТрУ).

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

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение», ТГТрУ.

Тел.: +99(871)-299-04-44.

E-mail: ulugbektashiit@gmail.com

Исраилов Улугбек Шавкатович

Ташкентский государственный университет транспорта (ТГТрУ).

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

Старший преподаватель кафедры «Электротехника», ТГТрУ.

Тел.: +99(871)-299-05-97.

E-mail: ulugbektashiit@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Amirov Sulton Fayzullayevich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryulchilar, Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, head of the department «Electro supply», TSTU.

Phone: +99(871)-299-07-84.

E-mail: ulugbektashiit@gmail.com

Yakubov Mirjalil Sagatovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryulchilar, Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, Professor, of the department «Electro supply», TSTU.

Phone: +99(871)-299-04-44.

E-mail: ulugbektashiit@gmail.com

Israilov Ulugbek Shavkatovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryulchilar, Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Senior lecturer of the department «Electrical engineering», TSTU.

Phone: +99(871)-299-05-97.

E-mail: ulugbektashiit@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Амиров, С. Ф. Разработка модели ресурса и управление техническим состоянием асинхронного тягового двигателя электроподвижного состава / С. Ф. Амиров, М. С. Якубов, У. Ш. Исраилов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 40 – 48.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Amirov S. F., Yakubov M. S., Israilov U. Sh. Development the model of a resource and management of the technical condition of an asynchronous traction motor of an electric rolling stock. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 1 (45), pp. 40 – 48 (In Russian).

УДК 621.336

О. А. Сидоров, М. С. Михайлов, Б. М. Москалюк

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С УЧЕТОМ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Аннотация. Статья посвящена совершенствованию методики испытаний токоприемников электроподвижного состава с учетом ударных воздействий со стороны контактной подвески. В статье рассмотрены особенности ударных воздействий на токоприемники электроподвижного состава при высоких скоростях движения. Выполнен анализ существующих методов испытания ударных воздействий на токоприемники на лабораторных установках и в линейных условиях. Выполнен анализ и выявлены недостатки ударной маятниковой установки для испытания токоприемников, описанной в ГОСТ 32204–2013, и произведен расчет ее характеристик. Предложена конструкция ударного стенда с меньшими габаритами и расширенными функциональными возможностями и выполнен расчет его параметров и характеристик. При расчете характеристик испытательного стенда было применено математическое и компьютерное моделирование с использованием среды MATLAB Simulink. Предложена методика стендовых ударных испытаний с использованием акселерометров и высокоскоростной видеокамеры. Установлено, что предлагаемый испытательный стенд сохраняет полный функционал регламентированной ГОСТом испытательной установки, имея при этом меньшие габариты и более широкие функциональные возможности.

Ключевые слова: высокоскоростной железнодорожный транспорт, ударные воздействия, испытания токоприемников, маятниковый стенд, ударный импульс, компьютерное моделирование.

Oleg A. Sidorov, Mikhail S. Mikhailov, Boris M. Moskalyuk

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

IMPROVEMENT OF THE TESTING METHOD OF CURRENT COLLECTORS OF ELECTRIC ROLLING STOCK CONSIDERING COLLISION IMPACTS

Abstract. The article is devoted to the improvement of the testing method of current collectors of electric rolling stock considering collision efforts from the overhead catenary. The article discusses the features of collision effects on pantographs of electric rolling stock at high speeds. An analysis of the existing methods for testing collision effects on pantographs in laboratory installations and in linear conditions has been carried out. The analysis is carried out and the drawbacks of the percussion pendulum installation for testing current collectors, described in GOST 32204-2013, are identified, and its characteristics are calculated. The design of a shock stand with smaller dimensions and expanded functionality is proposed, and its parameters and characteristics are calculated. When calculating the characteristics of the test bench, mathematical and computer modeling was applied using the MATLAB Simulink environment. The method of bench collision testing using accelerometers and high-speed video camera. It was established that the proposed test bench retains the full functionality of the test facility regulated by GOST, while having smaller dimensions and wider functionality.

Keywords: high speed rail transport, collision impacts, testing of pantographs, pendulum stand, collision impulse, computer simulation.

В настоящее время в России и за рубежом стремительно развивается высокоскоростной железнодорожный транспорт. Высокоскоростные магистрали сооружены и функционируют

в Германии, Японии, Франции, Китае и в других развитых странах. В России высокоскоростное движение представлено линией Москва – Санкт-Петербург, на которой эксплуатируются электропоезда «Сапсан» при скорости движения до 250 км/ч. Развитие высокоскоростного транспорта зафиксировано в «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р [1].

Особую опасность при работе токоъемных устройств представляют возможные удары токоприемника электроподвижного состава об элементы контактной сети: струны, зажимы, секционные изоляторы, фиксаторы. Такие удары могут привести к значительным повреждениям как токоприемника, так и самой контактной сети. Поскольку величина ударного импульса в значительной степени зависит от скорости, вместе с увеличением скоростей растет и опасность, исходящая от таких ударов. Для предотвращения и снижения ущерба от возможных повреждений элементов конструкции токоприемников и контактной сети разрабатываются различные предохранительные устройства [2].

Наиболее достоверные данные о работе указанных устройств можно получить при проведении линейных испытаний. Данные испытания проводятся в реальных условиях на действующем электроподвижном составе на специализированных полигонах или на действующих участках.

При проведении испытаний на контактной подвеске закрепляется препятствие (зажим, струна и др.), после чего производится серия ударов при различных скоростях, высоте подъема токоприемника и других параметрах. По завершении испытаний делается вывод о работоспособности предохранительных устройств.

Недостатками таких испытаний являются необходимость занятия действующих участков железных дорог и возможные повреждения инфраструктуры. Поэтому наиболее целесообразно проводить испытания на специализированных стендах.

Для испытания токоприемников в случае наездов на препятствия применяются различные испытательные установки [3 – 5]. К основным типам таких устройств можно отнести статические и динамические стенды. К наиболее часто применяемым динамическим испытательным стендам относятся следующие:

- 1) линейные ударные стенды;
- 2) вращательные ударные стенды;
- 3) маятниковые ударные стенды.

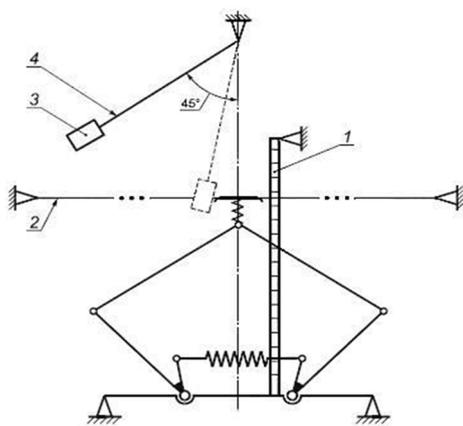


Рисунок 1 – Кинематическая схема испытательной установки, применяемой в настоящее время (ГОСТ 32204–2013)

При испытании токоприемник подвергается серии ударов, при этом фиксируются смещения и повреждения элементов токоприемника, надежность срабатывания предохранительных устройств.

В настоящее время в России действует ГОСТ 32204–2013 «Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия» [6], который представляет методику испытания токоприемников подвижного состава. Для исследования ударных воздействий применяется физический маятник (рисунок 1), представля-

ющий собой груз 3 цилиндрической формы, изготовленный из стали массой $10 \pm 0,1$ кг, закрепленный на стальном тросике 4 диаметром от 5 до 8 мм и длиной 4 м, отклоненный от вертикали на угол 45° вдоль направления движения ЭПС поочередно с обеих сторон. Испы-

тание проводится на наибольшей рабочей высоте токоприемника и на 25 % от его наибольшей рабочей высоты.

Методика испытаний, представленная в указанном ГОСТе, имеет ряд значительных недостатков:

при испытаниях учитывается только сам факт удара для последующего срабатывания системы аварийного опускания токоприемника;

не учитываются продольные смещения полоза токоприемника и возможность его повреждения в результате удара;

не предусматривается возможность вариации значений импульса;

длина троса маятника составляет 4 м, что затрудняет практическое применение установки;

использование гибкого троса вызывает технические сложности при выполнении ударных воздействий (неточность позиционирования бойка, паразитные колебания маятника).

Для оценки ударного импульса, реализуемого испытательным стендом, представленным в ГОСТе, выполним анализ его динамических параметров.

При колебаниях любого физического и математического маятника без учета потерь выполняется закон сохранения энергии [7]. Поскольку в начальный момент кинетическая энергия равна нулю, а при прохождении нижней точки потенциальная энергия маятника в случае отсутствия потерь полностью перейдет в кинетическую, то

$$mgh = \frac{\omega^2 J}{2}, \quad (1)$$

где m – масса физического маятника, кг;

g – ускорение свободного падения, $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$;

h – высота подъема центра масс маятника, м;

J – момент инерции физического маятника относительно оси вращения, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;

ω – угловая скорость, рад/с.

Высота подъема центра масс физического маятника может быть получена из функциональной зависимости

$$h = a(1 - \cos \varphi), \quad (2)$$

где φ – угол отклонения физического маятника, рад;

a – расстояние от оси вращения до центра масс маятника, м.

Поскольку у рассматриваемого физического маятника центры масс каждого элемента лежат на одной прямой, то расстояние от оси вращения до центра масс физического маятника может быть определено с использованием формулы

$$a = \frac{\sum_i m_i a_i}{\sum_i m_i}, \quad (3)$$

где m_i – масса i -го элемента физического маятника, кг;

a_i – расстояние от оси вращения до центра масс i -го элемента физического маятника, м.

Момент инерции физического маятника относительно оси вращения в соответствии с теоремой Штейнера – Гюйгенса может быть рассчитан по формуле

$$J = \sum_i (J_{Ci} + m_i a_i^2), \quad (4)$$

где J_{Ci} – момент инерции i -го элемента физического маятника относительно оси, проходящей через центр масс этого элемента, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

После преобразований получим функциональную зависимость угловой скорости от угла отклонения:

$$\omega = \sqrt{\frac{2mga(1 - \cos \varphi)}{J}} \quad (5)$$

Ввиду того, что поведение троса во время удара трудно предсказать, в качестве основного параметра испытательного стенда выберем суммарный импульс физического маятника перед моментом удара [8]. Также будем считать, что происходящий удар будет абсолютно упругим. Поскольку импульс является аддитивной величиной, характеризующей количество движения всех точек маятника при ударе, то он может быть рассчитан с помощью формулы

$$p = \int_0^l \omega x \rho(x) dx = \omega m \cdot \frac{1}{m} \int_0^l x \rho(x) dx = \omega ma = \sqrt{\frac{2gm^3 a^3 (1 - \cos \varphi)}{J}}, \quad (6)$$

где l – длина физического маятника, м.

В результате расчетов для испытательного стенда, представленного в ГОСТе, получим значение импульса, равное 51 кг·м/с.

Для улучшения процесса испытания токоприемников необходимо изменить конструкцию испытательного стенда на такую, которая позволит точно воспроизводить ударные процессы при уменьшении длины маятника. Для этого необходимо заменить гибкий трос жестким телескопическим рычагом, что позволит уменьшить размеры стенда и обеспечит возможность изменения величины ударного импульса. Кроме того, указанное изменение конструкции повысит точность расчета ударных воздействий на токоприемник.

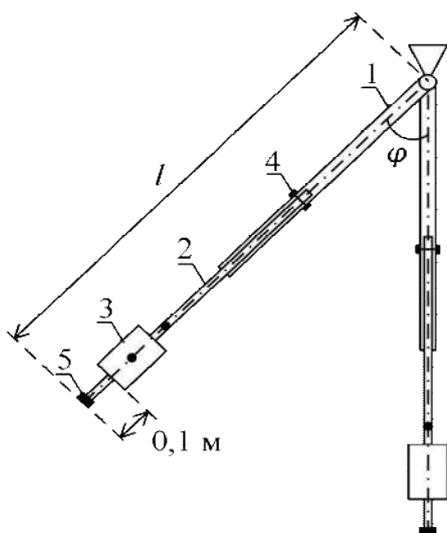


Рисунок 2 – Конструктивная схема предлагаемой испытательной установки



Рисунок 3 – Общий вид предлагаемой маятниковой ударной установки

В качестве замены существующего ударного испытательного стенда в ОмГУПСе при участии авторов разработан и изготовлен физический маятник с меньшими габаритами и расширенными функциональными возможностями (рисунок 2) [9]. Трос заменен жесткой телескопической штангой, состоящей из неподвижной 1 и подвижной 2 труб круглого сечения. Штанга предназначена для возможности изменения длины маятника. Изменение длины происходит за счет узла регулировки и фиксации 4. На телескопической системе закреплен груз 3, масса которого может варьироваться. На конце подвижной трубы закреплен боек 5, например, зажим контактной сети, с которым может столкнуться полз токоприемника. Параметры такого стенда можно рассчитать аналогично стенду, приведенному в ГОСТ 32204–2013.

На рисунке 3 представлен общий вид маятниковой ударной установки, реализованной в ОмГУПСе.

Для определения параметров предлагаемой маятниковой ударной установки проанализируем параметры подвижной и неподвижной труб и груза, представляющего собой сплошной стальной цилиндр. Центры масс данных элементов совпадают с их геометрическим центром, тогда центр масс маятниковой установки может быть рассчитан по формуле (3).

Моменты инерции подвижной и неподвижной труб могут быть рассчитаны по формуле

$$J_{с_тp} = \frac{1}{12} m_{тp} (3(r_1^2 + r_2^2) + l_{тp}^2), \quad (7)$$

где $m_{тp}$ – масса трубы, кг;

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

r_1 – внутренний радиус трубы, м;

r_2 – внешний диаметр трубы, м;

$l_{\text{тр}}$ – длина трубы, м.

Момент инерции груза относительно центра его масс может быть рассчитан так:

$$J_{C_{\text{тр}}} = \frac{1}{12} m_{\text{тр}} (3r_{\text{гр}}^2 + h_{\text{гр}}^2), \quad (8)$$

где $m_{\text{тр}}$ – масса груза, кг;

$r_{\text{гр}}$ – радиус груза, м;

$h_{\text{гр}}$ – высота груза, м.

После определения моментов инерции элементов конструкции предлагаемого ударного стенда общий момент инерции может быть вычислен по формуле (4). После определения расстояния до центра масс и момента инерции угловая скорость и импульс могут быть определены по формулам (5), (6).

Испытания проводятся следующим образом: маятник отводится в крайнее положение и фиксируется механической защелкой (рисунок 4, а), после разблокирования защелки маятник под тяжестью собственного веса поворачивается и происходит удар (рисунок 4, б). При ударе фиксируются перемещения и ускорения элементов конструкции токоприемника [10], анализируется процесс срабатывания предохранительных устройств.



Рисунок 4 – Процесс испытания токоприемника на ударные воздействия:
а – взведенное состояние маятника; б – момент удара по полозу

Для оценки достоверности данных математической модели было выполнено моделирование ударной установки в среде MatLab Simulink, в состав пакета которой входит среда Simscape Multibody, предназначенная для моделирования трехмерных механических систем (рисунок 5). Поскольку в начальный момент импульс системы равен нулю, то определение конечного импульса возможно через определение импульса силы, приложенной к маятнику:

$$p = \int mg \sin \varphi dt. \quad (9)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

По результатам расчетов были получены зависимости ударного импульса от массы груза, длины плеча и угла отклонения штанги маятника. Для реализации импульса 51 кг·м/с, заложенного в ГОСТ 32204–2013, длину штанги маятника целесообразно принять равной 1,25 м, массу груза – 15 кг и угол отклонения – 56 °.

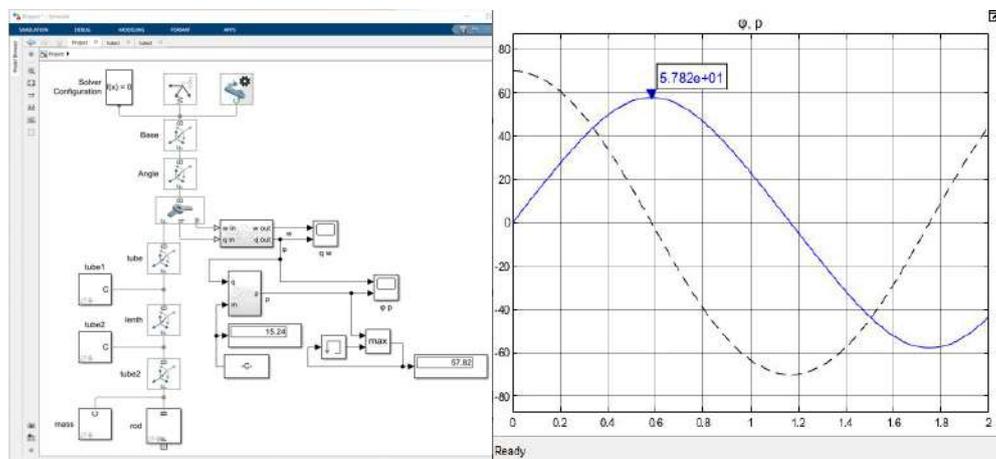
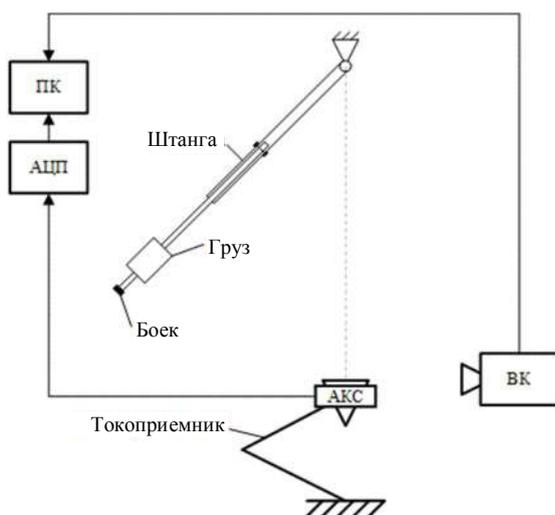


Рисунок 5 – Модель маятниковой ударной установки, реализованная в MatLab

Методика стендовых ударных испытаний представлена на рисунке 6.



АКС – акселерометр;
ВК – высокоскоростная видеокамера;
АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
ПК – персональный компьютер

Рисунок 6 – Методика стендовых ударных испытаний

При проведении эксперимента в качестве измерительных приборов используются высокоскоростная видеокамера JAI PULNIX TM-6740, направленная в зону удара перпендикулярно плоскости движения маятника, которая позволяет определить скорость в момент удара, и акселерометр ADXL326, определяющий ускорение полоза токоприемника в процессе удара. Информация, поступающая из акселерометра, обрабатывается в аналого-цифровом преобразователе L-CARD-14-140M.

Для определения скорости маятника в момент удара анализируются полученные высокоскоростной камерой кадры (рисунок 7). Скорость маятника в момент удара может быть рассчитана по формуле

$$V = M \cdot f \cdot (x_2 - x_1), \quad (10)$$

где M – масштаб пикселей, который определяется по известным габаритам маятника, м/рх;
 f – кадровая частота видеокамеры, к/с (для используемой видеокамеры $f = 200$ к/с);
 x_1, x_2 – положение маятника до удара и в момент удара соответственно, рх.

В результате анализа экспериментально полученных данных скорость маятника в момент удара составила 2,94 м/с. После этого определяется угловая скорость и по формуле (6) рассчитывается величина ударного импульса, которая составила 51 кг·м/с, что соответствует значению, регламентированному ГОСТ 32204–2013.

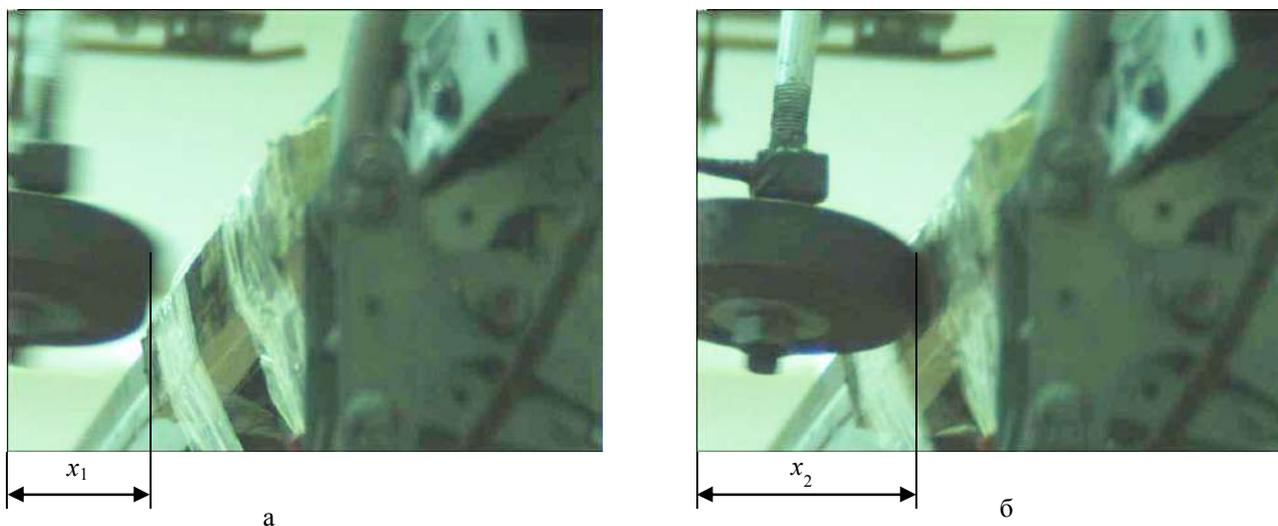


Рисунок 7 – Кадры, полученные высокоскоростной видеокамерой: а – перед моментом удара; б – в момент удара

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. Выявлены и проанализированы недостатки, присущие конструкции маятниковой установки, описанной в ГОСТ 32204–2013 «Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия».

2. Предложена усовершенствованная конструкция ударной стендовой установки с жесткой телескопической штангой, имеющая меньшие габариты, более широкие функциональные возможности и обеспечивающая более высокую достоверность при проведении испытаний.

3. Сформированы математическая и компьютерная модели, позволяющие достоверно оценивать величину ударного импульса при различных сочетаниях угла отклонения и длины штанги маятника и массы груза для точной настройки параметров стенда.

4. Разработана и реализована методика испытаний токоприемников, позволяющая определять скорость, ускорение и ударный импульс с использованием датчиков ускорения и высокоскоростной видеокамеры.

5. Предложенная конструкция стенда для ударных испытаний токоприемников имеет более широкие функциональные возможности, чем установка, описанная в ГОСТ 32204–2013, при значительно меньших габаритах и может быть рекомендована для оценки работоспособности токоприемников в условиях ударных воздействий.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р. «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года». – Текст : электронный URL : <https://mintrans.gov.ru/documents/2/859> (дата обращения : 20.02.2021).

2. Заренков, С. В. Совершенствование предохранительных устройств скоростных токоприемников / С. В. Заренков, И. Е. Чертков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 4 (24). – С. 17 – 27.

3. Совершенствование методов испытаний предохранительных устройств токоприемников скоростного электрического транспорта / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов, М. Б. Москалюк, М. С. Михайлов. – Текст : непосредственный // Наука и инновации – современные концепции : сборник научных статей по итогам работы международного научного форума. – Москва : Инфинити, 2019. – С. 177 – 182.

4. Голубков, А. С. Совершенствование методики испытаний токоприемников современного электроподвижного состава / А. С. Голубков, А. Н. Смердин, В. М. Павлов. – Текст : непосредственный // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта : тезисы докл. междунар. симпозиума «Eltrans-2013». – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 35 – 36.

5. Патент № 2703002 Российская Федерация, МПК В60L5/39; G01M 17/08; В60М 1/30. Устройство для динамических испытаний токоприемников метрополитена : № 2018139707 : заявлено 08.11.2018 : опубликовано 15.10.2019 / Сидоров О. А., Чертков И. Е., Маркелова К. С., Слатин А. И., Михайлов М. С.; патентообладатель Омский государственный университет путей сообщения. – 7 с. – Текст: непосредственный.

6. ГОСТ 32204-2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 24 с. – Текст : непосредственный.

7. Бидерман, В. Л. Теория механических колебаний : учебник / В. Л. Бидерман. – Москва-Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2009. – 407 с. – Текст : непосредственный.

8. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Т. I. Механика / Д. В. Сивухин. – Москва : Физматлит, 2006. – 560 с. – Текст : непосредственный.

9. Михайлов, М. С. Совершенствование методики экспериментальных исследований ударных воздействий на токоприемники электрического транспорта / М. С. Михайлов, О. А. Сидоров, В. М. Филиппов, И. Е. Чертков, Б. М. Москалюк // Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami : materiały XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. – Przemysł : Nauka i studia, 2020, pp. 67 – 70.

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

References

1. *Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 17.06.2008 № 877-r «O Strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda»* (Order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 No. 877-r «On the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030»), Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/859/> (accessed 20.02.2021).

2. Zarenkov, S. V., Chertkov I. E Improvement of safety devices of high-speed current-receivers [Sovershenstvovanie predokhranitel'nykh ustrojstv skorostnykh to-kopriemnikov]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 4 pp. 17 – 27.

3. Sidorov O. A., Filippov V. M., Moskalyuk M. B., Mikhailov M. S. Improvement of test methods for safety devices of pantographs of high-speed electric transport [Sovershenstvovanie metodov ispytaniy predokhranitel'nykh ustrojstv tokopriemnikov skorostnogo elektricheskogo transporta]. «*Nauka i innovacii – sovremennye koncepcii*» : *sbornik nauchnykh statej po itogam raboty Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma* («Science and Innovation – Modern Concepts» : collection of scientific articles on the results of the work of the international scientific forum). – Moscow, 2019, pp. 177 – 182.

4. Golubkov A. S., Smerdin A. N., Pavlov V. M. Improvement of test methods for current collectors of modern electric rolling stock [Sovershenstvovanie metodiki ispytaniy tokopriemnikov sovremennogo elektropodvizhnogo sostava]. *Elektrifikaciya i razvitie infrastruktury energoobespecheniya tyagi poezdov skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta : Tezisy dokl. VII mezhdunar. simpoziuma «Eltrans-2013»* (Electrification and development of energy supply infrastructure for traction of high-speed and high-speed railway transport: Theses of reports. VII int. symposium «Eltrans-2013»). – Saint-Petersburg, 2013, pp. 35 – 36.

5. Sidorov O. A., Chertkov I. E., Markelova K. S., Slatin A. I., Mihajlov M. S. *Patent RU 2703002*, 15.10.2019.

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

7. Biderman V. L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebanij* (Theory of mechanical vibrations). Moscow: NIC «Regulyar. i haotich. dinamika» Publ., 2009, 407 p.

8. Sivukhin D. V. *Obshchij kurs fiziki. T. I. Mekhanika. Izdanie 5-e, stereotipnoe.* (General course of physics. T. I. Mechanics. 5th edition, stereotyped), Moscow: Fizmatlit Publ., 2006, 560 p.

9. Mikhailov M. S., Sidorov O. A., Filippov V. M., Chertkov I. E., Moskalyuk B. M. Improvement of the methodology for experimental studies of collision effects on pantographs of electric transport [Sovershenstvovanie metodiki eksperimental'nyh issledovanij udarnyh vozdeystvij na tokopriyomniki elektricheskogo transporta]. *Perspektywiczne opracowania sq nauka i technikami – 2020: Materialy XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji* (Perspective studies are science and techniques - 2020: Materials of the XVI International Scientific-Practical Conference (November 7-15, 2020)). Przemysł : Nauka i studia Publ., 2020, pp. 67 – 70.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Михайлов Михаил Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студент, ОмГУПС.

E-mail: mikhailovms54@gmail.com

Москалюк Борис Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: mikhailovms54@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сидоров, О. А. Совершенствование методики испытаний токоприемников электроподвижного состава с учетом ударных воздействий / О. А. Сидоров, М. С. Михайлов, Б. М. Москалюк. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 48 – 56.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sidorov Oleg Aseksseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Railways power supply», OSTU.

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

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Mikhailov Mikhail Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Undergraduate student, OSTU.

E-mail: mikhailovms54@gmail.com

Moskalyuk Boris Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Railways power supply», OSTU.

E-mail: mikhailovms54@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sidorov O. A., Mikhailov M. S., Moskalyuk M. B. Improvement of the testing method of current collectors of electric rolling stock considering collision impacts. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 1 (45), pp. 48 – 56 (In Russian).

УДК 629.4-592

Ю. В. Кривошея

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ), г. Донецк, Донецкая Народная Республика

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ, ЗАПОЛНЯЮЩЕЙ МИКРОКОНТАКТНЫЕ ЗАЗОРЫ ОБЛАСТИ КОНТАКТА, НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ДИСКОВОГО ТОРМОЗА

Аннотация. В статье рассмотрено тепловое состояние элементов дискового тормоза при торможении с учетом распределения тепловых потоков между элементами трения. Представлены результаты исследования влияния термического сопротивления среды, заполняющей микроконтактные зазоры, обусловленные обратимыми деформациями микрогеометрии поверхности, на тепловое состояние элементов дискового тормоза. Метод – описание теплового состояния элементов дискового тормоза при торможении выполнено на основе дифференциального уравнения теплопроводности Фурье – Кирхгофа с учетом влияния термического сопротивления среды, заполняющей микрозазоры между поверхностями тормозной накладки и тормозного диска. Выполнен расчет теплового состояния железнодорожного дискового тормоза с учетом обратимых деформаций микрогеометрии поверхностей рабочих элементов дискового тормоза. Точные размеры и форма элементов дискового тормоза заданы в САД-системе (SolidWorks). Приведены графики изменения генерируемой и рассеиваемой дисковым тормозом тепловой энергии при различной начальной скорости и длительности торможения. Полученные зависимости иллюстрируют процесс диссипации тепловой энергии в окружающую среду. Показана инерционность фрикционной системы дискового тормоза в отношении диссипации генерируемой тепловой энергии в процессе торможения. Показано, что распределение тепловых потоков между рабочими элементами дискового тормоза зависит от уровня обратимых деформаций микрогеометрии поверхности тормозного диска, которые непосредственно обуславливают термическое сопротивление среды, заполняющей микроконтактные зазоры. Учет этого обстоятельства позволяет повысить достоверность расчетов генерируемой и рассеиваемой энергии рабочими элементами дискового тормоза при торможении. Результаты исследования рекомендуются для использования при расчетах теплового состояния рабочих элементов дискового тормоза при торможении.

Ключевые слова: контактное термическое сопротивление, теплообмен рабочих элементов, деформация микрогеометрии поверхности, микроконтактные зазоры, дисковый тормоз.

Yuriy V. Krivosheya

Donetsk Institute of Railway Transport (DRTI), Donetsk, Donetsk People's Republic

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE THERMAL RESISTANCE OF THE MEDIUM FILLING THE MICROCONTACT CLEARANCES OF THE CONTACT AREA ON THE THERMAL STATE OF THE DISC BRAKE ELEMENTS

Abstract. The article discusses the thermal state of the disc brake elements during braking, taking into account the distribution of heat fluxes between the friction elements. The results of the study of the influence of the thermal resistance of the medium filling the microcontact gaps, caused by reversible deformations of the surface microgeometry, on the thermal state of the disc brake elements are presented. Method – the description of the thermal state of the disc brake elements during braking is made on the basis of the Fourier – Kirchhoff differential equation of thermal conductivity, taking into account the influence of the thermal resistance of the medium filling the microgaps between the surfaces of the brake pad and the brake disc. Results of the work: The calculation of the thermal state of a railway disc brake was carried out taking into account the reversible deformations of the microgeometry of the surfaces of the working elements of the disc brake. The exact dimensions and shape of the disc brake elements are specified in the CAD system (SolidWorks). The graphs of changes in the thermal energy generated and dissipated by the disc brake at different initial speed and duration of braking are given. The obtained dependences illustrate the process of heat energy dissipation into the environment. The inertia of the friction system of the disc brake in relation to the dissipation of the generated thermal energy during braking is shown. It has been shown that the distribution of heat fluxes between the working elements of a disc brake depends on the level of reversible deformations of the microgeometry of the brake disc surface, which directly determine the thermal resistance of the medium filling the microcontact gaps. Taking this circumstance into account makes it possible to increase the reliability of calculations of the generated and dissipated energy by the working elements of the disc brake during braking. The results of the study are recommended for use in calculating the thermal state of the working elements of the disc brake during braking.

Keywords: contact thermal resistance, heat exchange of working elements, deformation of surface microgeometry, microcontact gaps, disc brake.

Согласно современным представлениям о силовом взаимодействии твердых тел торможение подвижного состава железных дорог представляет собой процесс преобразования кинетической энергии движения поезда, подведенной к тормозным системам, в тепловую энергию. Основными механизмами такой трансформации являются микродеформации микрогеометрии поверхностных слоев и макродеформации объема материала рабочих элементов дискового тормоза, изнашивание поверхностей, которые происходят с выделением большого количества тепла [1 – 3].

Деформирование взаимодействующих тел запускает процесс генерирования тепла, который превращается в самостоятельный фактор и оказывает влияние на индивидуальные свойства тормозных накладок и тормозного диска и, как следствие этого, – на коэффициент трения и интенсивность изнашивания рабочих поверхностей дискового тормоза. Дисковые тормоза подвижного состава имеют ограниченные возможности в отношении эффективной диссипации теплоты в окружающую среду. Это объясняется в первую очередь массогабаритными ограничениями, накладываемыми на узлы и системы экипажной части подвижного состава.

Распределение тепловой энергии между сопряженными рабочими элементами дискового тормоза в значительной мере зависит от величины термического сопротивления фрикционного контакта [4, 5], одной из составляющей которого является термическое сопротивление среды, заполняющей межконтактные зазоры. Известно, что на межконтактные зазоры оказывают влияние параметры микрогеометрии поверхности контактирующих тел. При торможении геометрические параметры микронеровностей в свободной от контакта области поверхностей претерпевают существенные изменения (по сравнению с исходными), которые носят обратимый характер [6, 7]. Уровень этих изменений находится в зависимости от напряженно-деформированного состояния области контакта.

В связи с этим при оценке теплового состояния элементов дискового тормоза необходимо учитывать влияние изменения геометрических параметров микронеровностей поверхности на термическое сопротивление среды, заполняющей микроконтактные зазоры, равно как и на термическое сопротивление фрикционного контакта в целом.

Целью настоящей работы является оценка влияния изменения термического сопротивления среды, заполняющей микрозазоры области контакта тормозной накладки и тормозного диска, зависящего от обратимых деформаций микрогеометрии поверхности, на тепловое состояние элементов дискового тормоза.

Повышение адекватности описания теплового состояния элементов дискового тормоза при торможении возможно при условии использования математической модели, учитывающей динамику обратимых изменений микрогеометрии поверхности элементов дискового тормоза, от которых зависит термическое сопротивление среды, заполняющей микрозазоры между поверхностями тормозной накладки и тормозного диска, равно как и термическое сопротивление фрикционного контакта в целом. В качестве основы такой математической модели взято уравнение теплопроводности Фурье – Кирхгофа (1), дополненное граничными условиями (2) и (3) [8, 9]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho_m \cdot c_{pm}} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] - \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где x, y, z – декартовы координаты; T – абсолютная температура; $\lambda_m, c_{pm}, \rho_m$ – соответственно, коэффициент теплопроводности, удельная изобарная теплоемкость и удельная масса материалов элементов тормозной системы; t – время; v_x, v_y, v_z – компоненты вектора скорости в точке окружающей среды (атмосферного воздуха) с координатами (x, y, z) в момент времени t .

Граничные условия 3-го рода. Для процесса теплообмена используется закон Ньютона – Рихмана:

$$q(x, y, z, t) = \alpha [T(x, y, z, t) - T_a(t)]; (x, y, z) \in F, \quad (2)$$

где T_a – температура окружающей среды; α – коэффициент теплоотдачи. F – поверхность тела.

Граничные условия 4-го рода (для условия неидеального теплового контакта) с поверхностным источником тепла:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{\text{ер}} q(t) - [T_1(x, y, z, t) - T_2(x, y, z, t)] / R_c = -\lambda_{m1} \frac{\partial T_1(x, y, z, t)}{\partial n}; \\ [T_1(x, y, z, t) - T_2(x, y, z, t)] / R_c + (1 - \alpha_{\text{ер}}) q(t) = \lambda_{m2} \frac{\partial T_2(x, y, z, t)}{\partial n}; \\ (x, y, z) \in F, \end{array} \right. \quad (3)$$

где R_c – термическое сопротивление фрикционного контакта тормозного диска с накладкой; $\alpha_{\text{ер}}$ – коэффициент перераспределения тепловой энергии; $q(t)$ – плотность теплового поверхностного источника тепла. Индексы «1» и «2» обозначают принадлежность к тормозному диску и тормозной колодке соответственно.

Уравнения (1) – (3), а также входящие в них величины более подробно рассмотрены в работе [9].

Термическое сопротивление фрикционного контакта R_c , входящее в граничное условие (3), описывается выражением [5]

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_{c1} + R_{c2} + R_{f1} + R_{f2}} + \frac{1}{R_{mc}} + \frac{1}{R_r}, \quad (4)$$

где R_{c1} , R_{c2} – термическое сопротивление, обусловленное «стягиванием» линий теплового потока к пятнам фактического контакта; R_{f1} , R_{f2} – термические сопротивления окисных пленок сопряженных поверхностей; R_{mc} – термическое сопротивление среды, заполняющей межконтактные зазоры; R_r – термическое сопротивление потока тепла, передаваемого с помощью излучения через межконтактные зазоры.

Составляющие уравнения (4) определяются согласно рекомендациям источника [5] так:

$$\frac{1}{R_{c1} + R_{c2}} = 2,5 \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \left(\frac{P_n}{H} \right)^{0,95} \cdot \left(\frac{[M_1^2 + M_2^2]^{0,5}}{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2]^{0,5}} \right), \quad (5)$$

где λ_1 , λ_2 – коэффициенты теплопроводности материалов взаимодействующих поверхностей; P_n – номинальное давление в контакте сопряженных поверхностей; M_1 , M_2 – средний угол наклона образующей конуса микронеровностей сопряженных поверхностей; σ_1 , σ_2 – максимальная высота выступов микронеровностей в зоне контакта сопряженных поверхностей; H – средняя микротвердость поверхности.

Средняя микротвердость поверхности [5]

$$H = P_n \left/ \left(\frac{P_n \cdot [M_1^2 + M_2^2]^{0,5}}{1,62 \cdot 10^6 \cdot c_1 \cdot (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{0,5}} \right)^{\frac{1}{1+0,071 \cdot c_2}} \right., \quad (6)$$

где c_1, c_2 – коэффициенты микротвердости по Виккерсу для сопряженных поверхностей:

$$\begin{aligned} c_1 &= H_{\text{BGM}} \cdot (4,0 - 5,77 \cdot k + 4,0 \cdot k^2 - 0,61 \cdot k^3); \\ c_2 &= -0,57 + k / 1,22 - k^2 / 2,42 + k^3 / 16,58, \end{aligned} \quad (7)$$

где $k = H_B / H_{\text{BGM}}$, здесь $H_{\text{BGM}} = 3,178 \cdot 10^9$ Па; H_B – твердость по Бринеллю [Па], вычисляемая отдельно для каждой из сопряженных поверхностей.

Термическое сопротивление среды, заполняющей микроконтактные зазоры [5],

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\text{mc}}} &= \frac{\lambda}{1,53 \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cdot \left(\frac{P_n}{H}\right)^{-0,097}} + \\ &\rightarrow \frac{2 \cdot \gamma}{Pr \cdot (\gamma + 1)} \cdot \left(\frac{2 - \alpha_1}{\alpha_1} + \frac{2 - \alpha_2}{\alpha_2}\right) \cdot L_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0}, \end{aligned} \quad (8)$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды в межконтактных зазорах; $\alpha_{1,2}$ – коэффициенты аккомодации на границах сопряженных поверхностей с межконтактной средой; L_0 – средний пробег молекулы среды в межконтактном зазоре с давлением P_0 и температурой T_0 (значения P_0, T_0 соответствуют нормальным условиям); P и T – соответственно текущее значение давления и температуры. Pr – число Прандтля, определяется для среды в зазорах по средней температуре сопряженных поверхностей; γ – степень тепла (статистический коэффициент).

Термическое сопротивление потоку тепла, передающегося посредством излучения [5],

$$\frac{1}{R_r} = \frac{C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]}{(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1) \cdot (T_1 - T_2)}, \quad (9)$$

где T_1, T_2 – средняя температура контактирующих поверхностей; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степень черноты взаимодействующих поверхностей.

В работе [10] показано, что на контактное термическое сопротивление элементов трения влияет функциональную связь между геометрическими параметрами микронеровностей поверхности тормозного диска и уровнем напряженно-деформированного состояния области контакта. Расчеты, выполненные без учета этой связи, приводят к завышенным величинам контактного термического сопротивления и, соответственно, к погрешности в определении величин тепловых потоков, проходящих через область контакта сопряженных поверхностей.

В работах [6, 7, 10] предложены зависимости, на основании которых представляется возможным оценить изменения высотных и шаговых параметров микрогеометрии в зависимости от силы трения F_T , а также геометрических и физико-механических характеристик материала тормозного диска.

В качестве исходных параметров микрогеометрии поверхностей, которые относятся к состоянию отсутствия действия касательных сил, взяты максимальные высоты выступов микронеровностей в зоне контакта сопряженных поверхностей σ_1, σ_2 , а также средний шаг микронеровностей Sm [6, 10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \sigma_0 + \frac{F_T}{2 \cdot \mu \cdot L} \cdot \frac{1}{\left(\frac{a_1}{e^{Sm_0/2\sigma_0}} + \frac{b_1}{2 \cdot Sm_0/\sigma_0} + c_1 \right)}; \\ Sm = Sm_0 - \frac{F_T}{\mu \cdot L} \cdot \sqrt{\left(\frac{a_2}{e^{2Sm_0/\sigma_0}} + \frac{b_2}{2 \cdot Sm_0/\sigma_0} + c_2 \right)}, \end{array} \right. \quad (10)$$

где σ_0 , Sm_0 – соответственно высотные (максимальная высота микронеровностей) и шаговые (средний шаг микронеровностей) параметры микрогеометрии поверхностей, находящихся во фрикционном взаимодействии, при условии отсутствия действия касательной силы (силы трения); F_T – сила трения между тормозным диском и накладкой дискового тормоза; μ – модуль сдвига соответствующего фрикционного материала; L – характерный линейный размер для площади фрикционного контакта; $a_{1,2}$, $b_{1,2}$, $c_{1,2}$ – константы, значения которых зависят от конструктивных особенностей.

На основании уравнений (1) – (10) и приведенных в работе [10] результатов представляется возможным дать оценку влиянию термического сопротивления фрикционного контакта, которое учитывает функциональную связь между геометрическими параметрами микронеровностей поверхности тормозного диска и уровнем напряженно-деформированного состояния, на тепловое состояние элементов трения дискового тормоза.

Уравнения (1) – (10) реализованы в расчете теплового состояния элементов железнодорожного дискового тормоза (рисунок 1). Решение системы дифференциальных уравнений в частных производных математической модели (1) – (3) выполнено методом конечных элементов с помощью программного пакета Comsol Multiphysics (использовался модуль численного решения (solver) – Bigstab (Preconditioner: Incomplete LU).

Точные размеры и форма элементов геометрической модели железнодорожного дискового тормоза, используемые в расчетах, заданы в CAD-системе (SolidWorks). Как отмечалось выше, термическое сопротивление, которому посвящена статья, входит в граничное условие (3) и, таким образом, программный пакет Comsol Multiphysics дает возможность оценить влияние величины термического сопротивления среды, заполняющей микроконтактные зазоры, на величину генерируемой и рассеиваемой энергии рабочими элементами дискового тормоза при торможении.

При расчете использовались следующие данные: номинальная площадь контакта составляла $0,12 \text{ м}^2$; параметры микрогеометрии поверхности тормозного диска $\sigma_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, параметры микрогеометрии поверхности тормозной накладки: $\sigma_2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; средний угол наклона микронеровностей – $M \approx \text{tg}(M) \sim 0,05$. $P_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $T_0 = 293 \text{ К}$, $\lambda_1 = 35 \text{ Вт/(м·К)}$, $\lambda_2 = 54,5 \text{ Вт/(м·К)}$, $\lambda = 0,04 \text{ Вт/(м·К)}$; $P_r = 0,7$; $Hb_1 = 4,0 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $Hb_2 = 7,0 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $\alpha_1 = 0,3$, $\alpha_2 = 0,7$; $\gamma = 1$; $\varepsilon_1 = 0,5$, $\varepsilon_2 = 0,6$; $L_0 \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}$. Коэффициенты: $a_1 = -7,641$; $b_1 = 0,041$; $c_1 = 5,316$; $a_2 = 0,0351$; $b_2 = 0,0081$; $c_2 = 0,197$.

Сила трения между тормозным диском и накладкой F_T задавалась в диапазоне $0 \dots 2 \text{ кН}$. Термическое сопротивление поверхностных пленок R_{f1} , R_{f2} в расчетах не учитывалась вследствие незначительности их влияния [11].

Для примера в качестве материала тормозного диска и материала тормозных накладок взяты Сталь 35 и серый чугун СЧ25 соответственно. Этому способствовала доступность их физико-механических и теплофизических свойств в справочной литературе и в библиотеке программы Comsol Multiphysics, а также применение их для изготовления тормозного диска и тормозных колодок, установленных на экспериментальном стенде [10].

Полученные результаты представлены на рисунках 2 и 3.

Графические зависимости, полученные путем интегрирования средствами программного пакета Comsol Multiphysics значений численного решения математической модели (1) – (10), иллюстрируют процесс диссипации тепловой энергии в окружающую среду.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Показана инерционность фрикционной системы дискового тормоза в отношении диссипации генерируемой тепловой энергии в процессе торможения. Учитывая различия в тепло-технических характеристиках рабочих элементов дискового тормоза и окружающей среды, диссипация тепловой энергии реализуется с запаздыванием, в результате которого интенсивно увеличивается температура элементов трения. Эффективность охлаждения тормозного диска и тормозных колодок повышается с увеличением разницы температур окружающей среды и элементов трения.

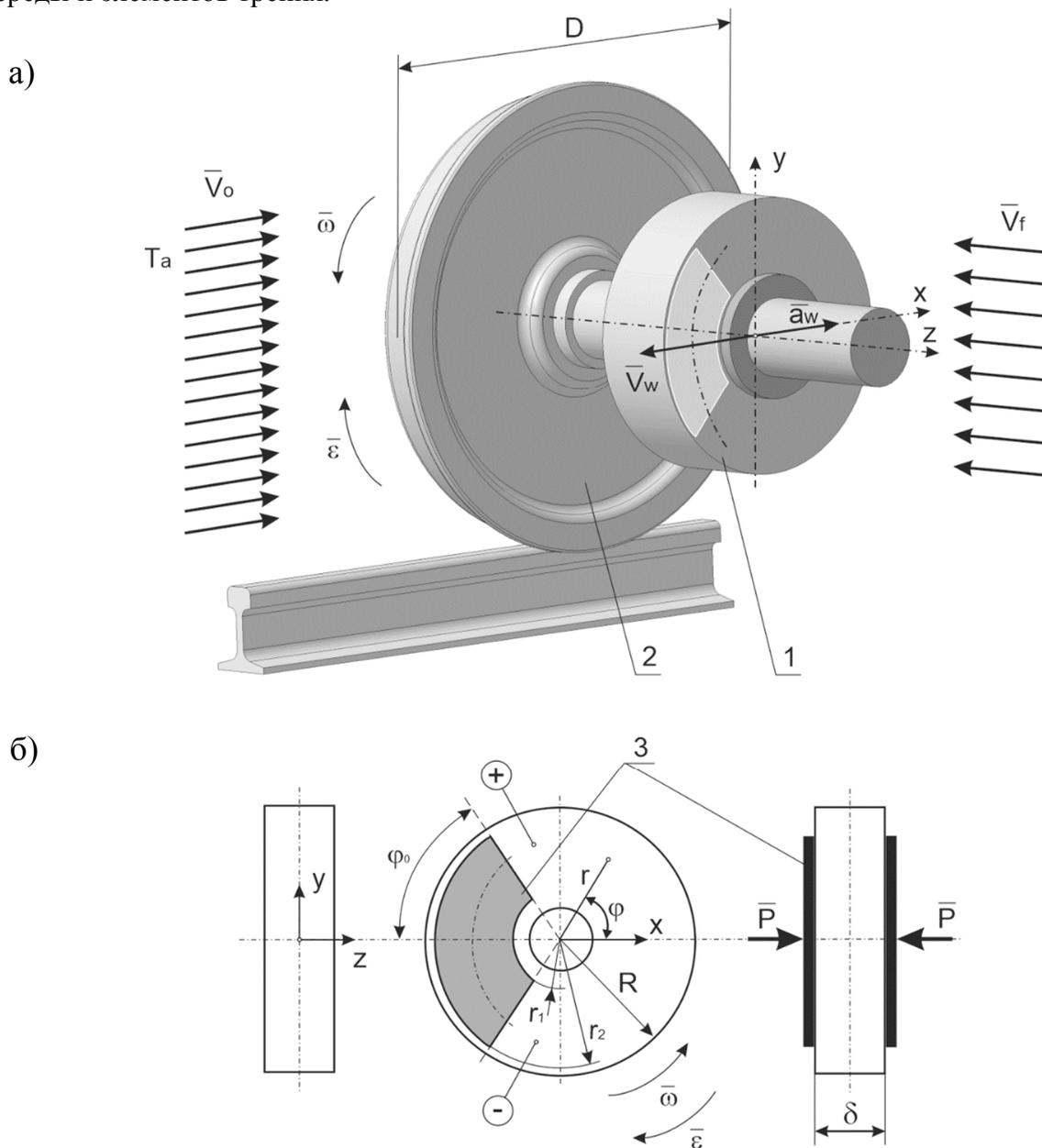


Рисунок 1 – Расчетная схема железнодорожного дискового тормоза: 1 – тормозной диск; 2 – колесо; 3 – тормозная накладка; D – диаметр колеса; R , δ – радиус и ширина тормозного диска; r – средний радиус области трения; V_0 , V_f – скорость встречного и бокового потоков воздуха соответственно; T_a – средняя температура воздуха на удалении; V_w , ω – линейная и угловая скорости; a_w , ϵ – линейное и угловое замедление колесной пары при торможении; r_1 , r_2 – радиусы, определяющие размеры (вместе с центральным углом φ_0) площади номинального контакта и величины перекрытия тормозного диска с тормозной накладкой; P – сила нормального прижатия тормозной накладки к тормозному диску; «+» – зона растяжения; «-» – зона сжатия

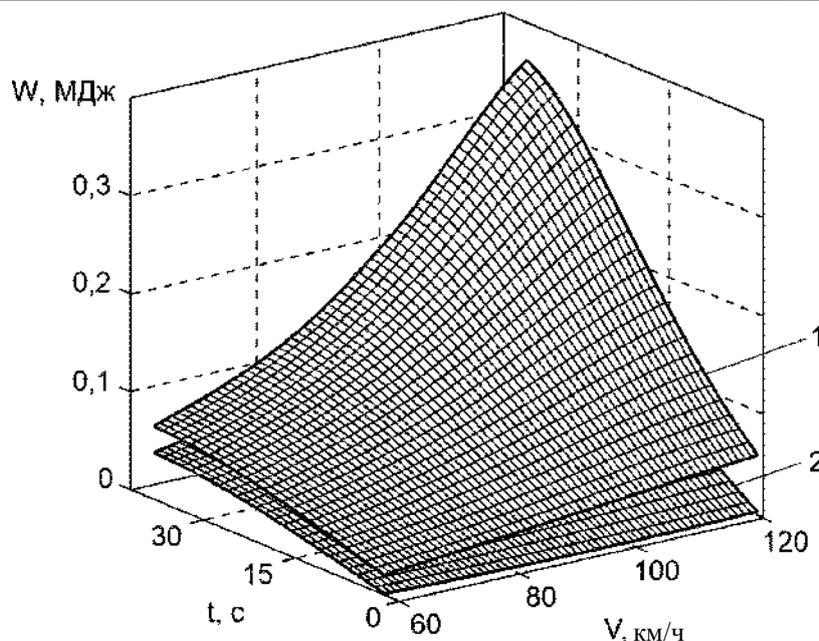


Рисунок 2 – Тепловая энергия W , рассеиваемая дисковым тормозом при начальной скорости торможения V за время t : 1 – зависимость, учитывающая изменения термического сопротивления контакта в результате обратимых деформаций микрогеометрии контактирующих поверхностей; 2 – зависимость, не учитывающая влияние указанного фактора

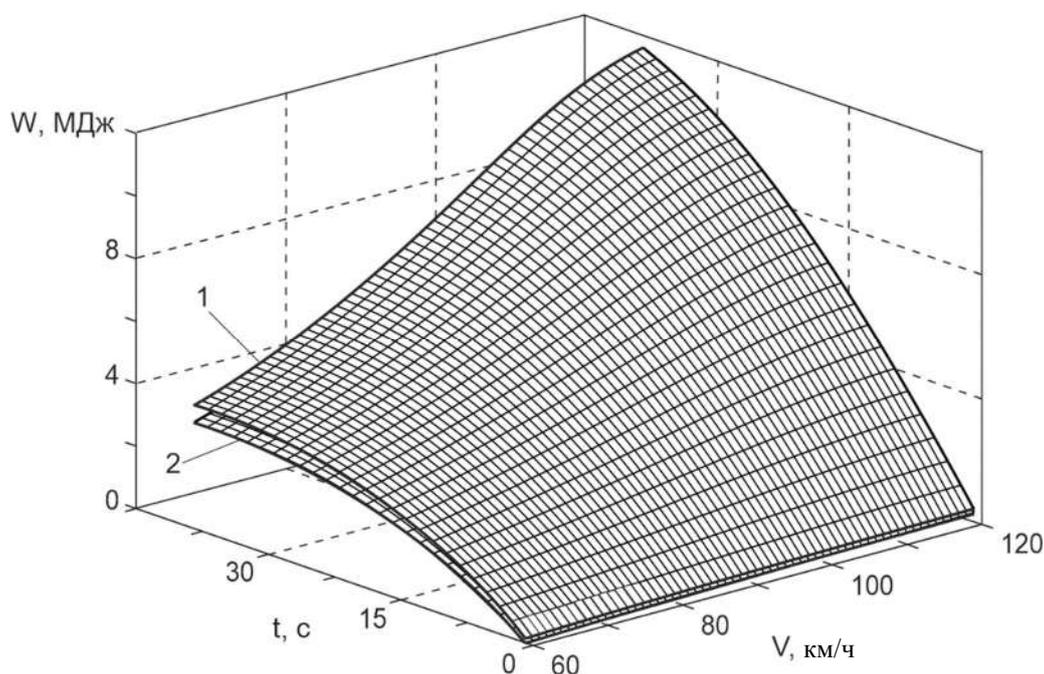


Рисунок 3 – Тепловая энергия W , генерируемая дисковым тормозом при начальной скорости торможения V за время t : 1 – зависимость, учитывающая изменения термического сопротивления контакта в результате обратимых деформаций микрогеометрии контактирующих поверхностей; 2 – зависимость, не учитывающая влияние указанного фактора

Оценка тепловой энергии, генерируемой и рассеиваемой в процессе торможения элементами дискового тормоза без учета обратимых деформаций микрогеометрии контактирующих поверхностей и их влияния на термическое сопротивление среды, заполняющей микрокон-

тактные зазоры, приводит к занижению итогового результата. Так, результаты расчетов, приведенные на рисунках 2 и 3, позволяют оценить разницу величин тепловой энергии (генерируемой и рассеиваемой в процессе торможения элементами дискового тормоза), найденной как с учетом влияния обратимых деформаций микрогеометрии контактирующих поверхностей на термическое сопротивление среды, заполняющей микроконтактные зазоры, так и без учета этого влияния, на уровне от 5 до 10 %.

Учет обратимых деформаций микрогеометрии поверхности тормозного диска и их влияния на термическое сопротивление среды, заполняющей микроконтактные зазоры, позволит повысить достоверность оценки генерируемой и рассеиваемой энергии рабочими элементами дискового тормоза при торможении.

Список литературы

1. Крагельский, И. В. Узлы трения машин : справочник / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – Москва : Машиностроение. – 1984. – 280 с. – Текст : непосредственный.
2. Ehlers, H.–R. et. al. Potential and limits of opportunities of the block brake, *Glaser's Annalen*, 2002, no. 6/7, pp. 290 – 300.
3. Справочник по триботехнике : в 3 т. / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1992. – 400 с. – Т. 3. – Текст : непосредственный.
4. Кутателадзе, С. С. Справочник по теплопередаче / С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. – Москва : Книга по требованию, 2012. – 415 с. – Текст : непосредственный.
5. Меснянкин, С. Ю. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел / С. Ю. Меснянкин, А. Г. Викулов, Д. Г. Викулов. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179. – № 9. – С. 943 – 970.
6. Осенин, Ю. И. Особенности деформирования единичной микронеровности тангенциальными силами / Ю. И. Осенин, Е. В. Белозеров, Б. И. Гулик. – Текст : непосредственный // Вісник Східноукраїнського державного університету. – 1999. – № 1. – С. 75 – 80.
7. Осенин, Ю. И. Методика решения задач деформировании поверхностных слоев тел тангенциальными силами / Ю. И. Осенин, К. В. Белозеров, Б. И. Гулик. – Текст : непосредственный // Вісник Східноукраїнського державного університету. – 1999. – № 2. – С. 23 – 31.
8. Акмен, Р. Г. Тепло- и массообмен / Р. Г. Акмен. – Харьков: Харьковский политехнич. ин-т, 2006. – 135 с. – Текст : непосредственный.
9. Osenin Yu.Yu., Douma Mansur Al-Makhdi, Sergienko O. V., Sosnov I. I, Chesnokov A. V. Providing stabile friction properties of disk brakes for railway vehicles, *Transport problems*, 2017, vol. 12, Issue 1, pp. 63 – 72 (Poland).
10. Кривошея, Ю. В. Влияние деформаций микрогеометрии поверхности на величину контактного термического сопротивления дискового тормоза / Ю. В. Кривошея. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 11 – 20.
11. Викулов, А. Г. Определение толщины поверхностных пленок посредством электрических измерений в контакте металлов / А. Г. Викулов. – Текст : непосредственный // Вестник МАИ. – 2007. – Т. 14. – № 2. – С. 47 – 52.

References

1. Kragelsky I. V., Mikhin N. M. *Uzly treniya mashin* (Friction units of machines). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984, 280 p.
2. Ehlers, H.–R. et. al. Potential and limits of opportunities of the block brake, *Glaser's Annalen*, 2002, no. 6/7, pp. 290 – 300.
3. Chichinadze A. V. *Spravochnik po tribotekhnike* (Handbook of tribotechnics). Ed. M. Hebdy. Moscow: Mashinostroenie Publ., Vol. 3. 1992, 400 p.
4. Kutateladze S. S. Borishansky V. M. *Spravochnik po teploperedache* (Heat Transfer Handbook). Moscow: Kniga po Trebovaniju Publ., 2012, 415 p.

5. Mesnyankin S. Y., Vikulov A. G., Vikulov D. G. Modern view on the problems of thermal contacting of solids [Sovremennyj vzglyad na problemy teplovogo kontaktirovaniya tverdyh tel]. *Uspehi fizicheskikh nauk – Advances in physical sciences*, 2009, vol. 179, no. 9, pp. 943 – 970.

6. Osenin Yu. I., Belozarov E. V., Gulik B. I. Features of deformation of a single microroughness by tangential forces [Osobennosti deformirovaniya edinichnoj mikronerovnosti tangentsial'nymi silami]. *Visnik Shidnoukraiïns'kogo derzhavnogo universitetu – East Ukrainian State University Bulletin*, 1999, no. 1, pp. 75 – 80.

7. Osenin Yu. I., Belozarov E. V., Gulik B. I. Technique for solving problems of deformation of surface layers of bodies by tangential forces [Metodika resheniya zadach deformirovaniya poverkhnostnykh sloev tel tangencial'nymi silami]. *Visnik Shidnoukraiïns'kogo derzhavnogo universitetu – East Ukrainian State University Bulletin*, 1999, no. 2, pp. 23 – 31.

8. Akmen R. G. *Teplo- i massoobmen* (Heat and mass transfer). Kharkov: Kharkiv Polytechnic Institute Publ., 2006, 135 p.

9. Osenin Yu. Yu., Douma Mansur Al-Makhdî, Sergienko O. V., Sosnov I. I., Chesnokov A. V. Providing stable friction properties of disk brakes for railway vehicles, *Transport problems*, 2017, vol. 12, Issue 1, pp. 63 – 72 (Poland).

10. Krivosheya Yu. V. Effect of surface microgeometry deformations on the value of the contact thermal resistance of the disc brake [Vliyanie deformatsij mikrogeometrii poverkhnosti na velichinu kontaktnogo termicheskogo soprotivleniya diskovogo tormoza]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 3 (43), pp. 11 – 20.

11. Vikulov A. G. [Opredelenie tolshhiny` poverkhnostny`kh plenok posredstvom e`lektricheskikh izmerenij v kontakte metallov]. *Vestnik MAI – Bulletin of the MAI*, 2007, vol. 14, no. 2, pp. 47 – 52.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кривошея Юрий Владимирович

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ).

Горная ул., д. 6, г. Донецк, 283018, Донецкая Народная Республика.

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

Тел.: +38 (071) 333-19-37.

E-mail: krivosheya.drty@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кривошея, Ю. В. Оценка влияния термического сопротивления среды, заполняющей микроконтактные зазоры области контакта, на тепловое состояние элементов дискового тормоза / Ю. В. Кривошея. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 57 – 65.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Krivosheya Yuriy Vladimirovich

Donetsk Railway Transport Institute (DRTI).

6, Gornaya st., Donetsk, 283018, Donetsk People's Republic.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Rolling stock of railways», DRTI.

Phone: +38 (071) 333-19-37.

E-mail: krivosheya.drty@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Krivosheya Y. V. Evaluation of the influence of the thermal resistance of the medium filling the microcontact clearances of the contact area on the thermal state of the disc brake elements. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 1 (45), pp. 57 – 65 (In Russian).

ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОВОЗА НА БАЗЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Аннотация. Целью данной статьи является анализ снижения напряжения в контактной сети от некачественной работы электровоза переменного тока при пропуске тяжеловесных поездов. Тяжеловесное движение сегодня рассматривается как действующий и необходимый инструмент для повышения весовых норм и увеличения пропускной способности участков железной дороги. В статье приведена статистика пропуска тяжеловесных и соединенных поездов по Красноярской железной дороге за 2019 и 2020 годы. Для эффективного использования тяжеловесного движения необходимо решить ряд проблем, одна из которых заключается в снижении напряжения в контактной сети при пропуске тяжеловесных поездов, это негативно сказывается на скорости движения поезда по перегону, ухудшаются условия охлаждения силового оборудования электровоза и т.д. В результате анализа работы тиристорного выпрямительно-инверторного преобразователя выявлен ряд недостатков. Причина низкого коэффициента мощности электровоза заключается в использовании устаревшей элементной базы на основе тиристоров, их закрытие осуществляется только в следующем полупериоде напряжения, длительная коммутация и большой угол открытия тиристоров приводят к значительному реактивному току в контактной сети. На основе анализа потерь напряжения на токоприемнике сделан вывод о необходимости уменьшения длительности процесса коммутации плеч ВИПа, при котором происходит короткое замыкание вторичной обмотки тягового трансформатора. Предложен альтернативный вариант преобразователя на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов – IGBT-транзисторов. Возможность открытия и закрытия в любой момент времени таких элементов позволяет максимально уменьшить угол сдвига фаз и повысить коэффициент мощности. За счет практически мгновенной коммутации транзисторов искажение в контактной сети минимизировано.

Ключевые слова: тяжеловесное движение, пропускная способность, выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП), коэффициент мощности, электровоз переменного тока, контактная сеть, алгоритм управления, коммутация.

Vyacheslav N. Znaenok, Aleksey O. Linkov, Oleg V. Melnichenko

Irkutsk State Transport University (IrSTU), Irkutsk, the Russian Federation

RECTIFIER-INVERTER CONVERTER OF AN ELECTRIC LOCOMOTIVE BASED ON IGBT TRANSISTORS AS A WAY TO INCREASE THE CAPACITY OF RAILWAY SECTIONS

Abstract. The purpose of this article is to analyze the voltage drop in the contact network caused by poor-quality operation of an alternating current electric locomotive when passing heavy trains. Heavy-haul traffic is considered today as a valid and necessary tool for increasing weight norms and increasing the throughput of railway sections. The article provides statistics on the passage of heavy and connected trains on the Krasnoyarsk railway for 2019 and 2020. For the effective use of heavy traffic, it is necessary to solve a number of problems, one of which is to reduce the voltage in the overhead network when passing heavy trains, this negatively affects the speed of the train along the haul, the conditions for cooling the power equipment of the electric locomotive deteriorate, etc. As a result of the analysis of the operation of the thyristor rectifier-inverter converter, a number of disadvantages were revealed. The reason for the low power factor of the electric locomotive lies in the use of an outdated element base based on thyristors, their closure is carried out only in the next voltage half-cycle, long-term switching and a large opening angle of thyristors leads to a significant reactive current in the contact network. Based on the analysis the voltage losses at the current collector, it was concluded that it is necessary to reduce the duration of the switching process of the arms of the rectifier-inverter converter, in which a short circuit occurs in the secondary winding of the traction transformer. An alternative version of the converter based on fully controlled semiconductor devices – IGBT transistors is proposed. The ability to open and close at any time of such elements allows you to minimize the phase angle and increase the power factor. Due to the almost instantaneous switching of transistors, the distortion in the contact network is minimized.

Keywords: heavy movement, bandwidth, rectifier-inverter converter, Power factor, alternating current electric locomotive, contact network, control algorithm, switching.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Указом Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» Правительству Российской Федерации поставлена задача обеспечить вхождение РФ в число пяти крупнейших экономик мира, реализовать темпы экономического роста выше мировых [1]. В рамках выполнения поручений предусмотрены увеличение провозной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей до 180 млн т к 2024 г. и мероприятия по увеличению пропускной способности для обеспечения роста транзитных перевозок контейнеров в четыре раза и сокращение времени перевозки контейнеров железнодорожным транспортом. Для решения поставленных задач холдинг ОАО «РЖД» разработал долгосрочную программу развития до 2025 г., в которой отмечено, что одним из инновационных направлений совершенствования холдинга является расширение технологии пропуска тяжеловесных поездов [2]. В стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» (Белая книга) тяжеловесное движение определено как приоритетное направление. Восточный полигон является одним из основных направлений для организации тяжеловесного движения, где в перспективе Генеральной схемой развития сети железных дорог предусмотрена организация перевозок угля в поездах массой 7100 т [3].

Сегодня тяжеловесное движение – это эффективный способ повышения пропускной способности. Для организации такого направления ключевым звеном является мощный тяговый подвижной состав с высокими энергетическими показателями. Задача повышения коэффициента мощности электровозов остается актуальной до сих пор.

С каждым годом пропуск тяжеловесных и соединенных поездов увеличивается. Так, в 2020 г. по Красноярской железной дороге проследовало в четыре раза больше тяжеловесных грузовых поездов массой 7100 т, чем за аналогичный период в 2019 г. На 8 % увеличилось формирование соединенных тяжеловесных поездов массой 12 тыс. т. Для сравнения – средний вес грузового состава на Красноярской железной дороге составляет 4,1 тыс. т. На рисунке 1 представлены диаграммы количества тяжеловесных и соединенных поездов, пропущенных по Красноярской железной дороге за 2019 и 2020 гг. [4].

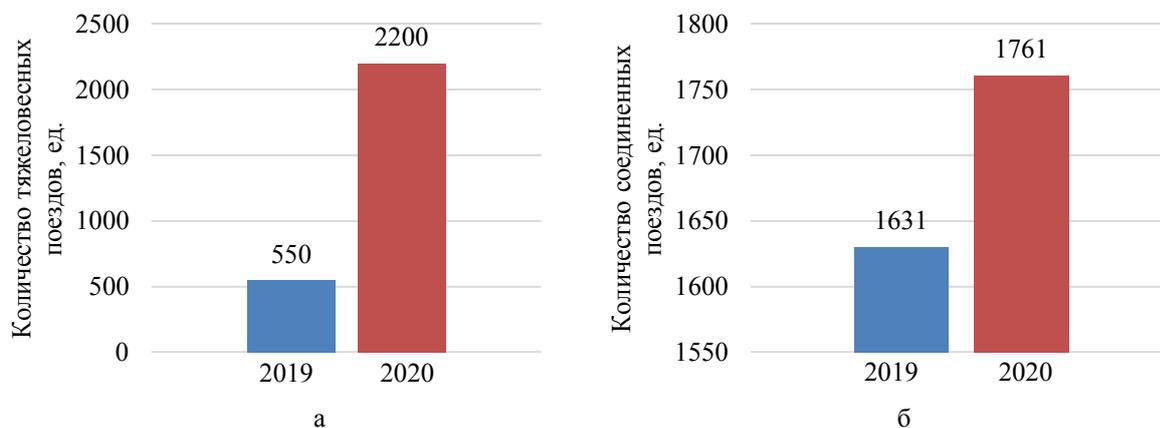


Рисунок 1 – Пропуск тяжеловесных и соединенных поездов на Красноярской железной дороге за 2019 – 2020 гг.

Однако пропуск тяжеловесных поездов значительно усложняет технологию работы всего железнодорожного комплекса [5]. Для эффективного использования тяжеловесного движения необходимо выполнить ряд мероприятий: создание полигонов, позволяющих выделить участки обращения таких поездов; внедрение современных средств автоматики и телемеханики, которые обеспечивают безопасность движения; удлинение приемоотправочных путей для возможности осуществления обгона пассажирскими поездами на отдельных пунктах; обеспечение дороги новым более мощным тяговым подвижным составом, модернизация существующего парка локомотивов; усиление системы тягового электроснабжения.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Кардинальное решение проблемы пропускной способности невозможно без усиления системы тягового электроснабжения и повышения энергетической эффективности электроподвижного состава. При пропуске тяжеловесных и соединенных поездов можно наблюдать резкие просадки напряжения в контактной сети. Факт снижения напряжения в контактной сети ниже допустимого зафиксирован бортовой аппаратурой электровоза ЗЭС5К во время движения с составом в поездке за 10.08.2019 – 11.08.2019 (рисунок 2). В промежуток времени 0:29 – 0:32 напряжение в контактной сети снизилось до 18600 В – ниже минимально допустимого значения.



Рисунок 2 – Фрагмент расшифровки параметров движения электровоза ЗЭС5К №265 с поездом за период 10.08.2019 – 11.08.2019

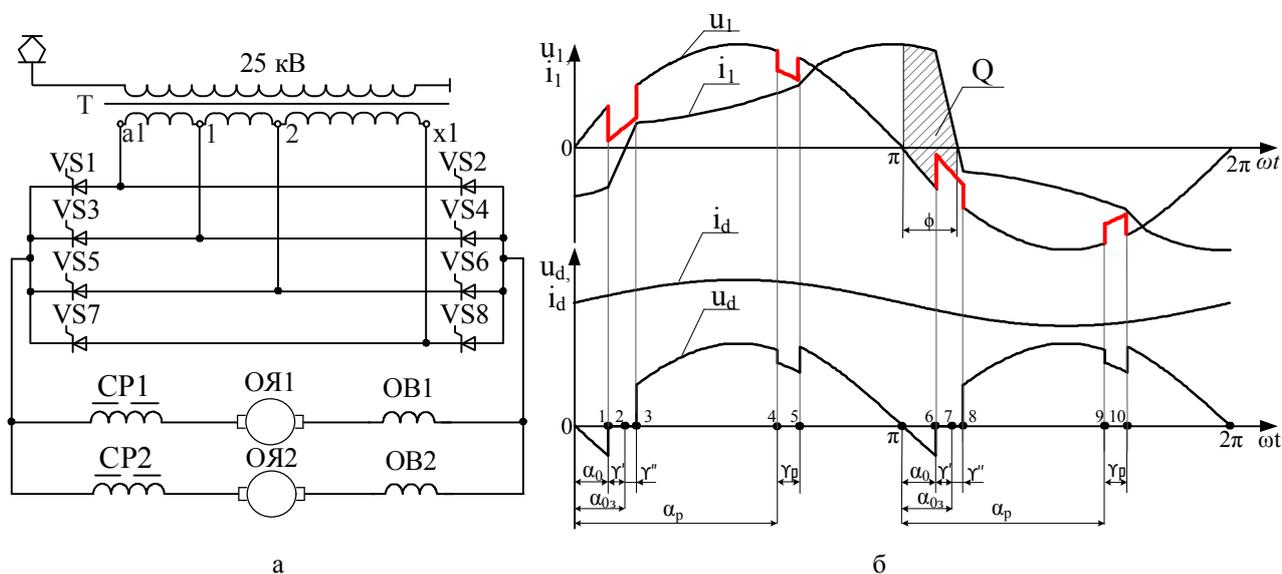
Снижение напряжения в контактной сети является значимым ограничением в наращивании весовых норм и тяжеловесного движения в целом. Со снижением напряжения уменьшается скорость движения и увеличивается перегонное время хода поездов, вследствие чего снижается пропускная способность участка. Ухудшаются условия охлаждения тяговых двигателей и всего 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 отказам [6].

Для поддержания скорости поезда при движении по перегону необходимо обеспечивать требуемое напряжение на тяговых двигателях, при низком напряжении в контактной сети следует увеличивать количество используемых обмоток тягового трансформатора, переходить на более высокие зоны регулирования. Все это вызовет повышение потребления электрической энергии на тягу поездов за счет увеличения тока в первичной обмотке тягового трансформатора и, соответственно, приведет к значительной нагрузке контактного провода активным и реактивным токами.

Для решения проблемы тягового электроснабжения требуются усиление существующего питания, создание дополнительных генерирующих мощностей, новых линий электропередач, модернизация тяговых подстанций. Такое решение весьма затратно, требует больших капитальных вложений и является сложным и продолжительным проектом. Необходимо отметить, что одной из причин снижения напряжения в контактной сети является работа электровозов с низким коэффициентом мощности и длительными коммутационными переключениями плеч выпрямительно-инверторного преобразователя, вызывающая дополнительно коммутационные и послекоммутационные колебания напряжения. Приоритетным путем реше-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ния данной проблемы является совершенствование тягового электроподвижного состава. Проблема низкого коэффициента мощности заключается в использовании устаревшей элементной базы ВИПов на основе тиристоров и принятого алгоритма управления [7]. Схема ВИПов на тиристорах и диаграммы работы представлены на рисунке 3.



а
б

Рисунок 3 – Работа выпрямительно-инверторного преобразователя на тиристорах:
а – принципиальная электрическая схема тележки электровоза с тиристорным ВИПом;
б – диаграммы электромагнитных процессов электровоза при работе ВИПа

Рассмотрим алгоритм работы тиристорного (далее – типового) ВИПа на четвертой зоне регулирования в положительном полупериоде питающего напряжения (рисунок 3, б). Допустим, в интервале времени $10 - 2\pi(0) - 1$ будут задействованы все три обмотки секции тягового трансформатора и прохождение тока по тяговым двигателям осуществляется через плечи ВИПа VS1 и VS8. После смены в точке 0 направления ЭДС на интервале $0 - 1$ обеспечивается возникновение отрицательно выпрямленного напряжения. В точке 1 подается сигнал управления α_0 на плечо VS7, оно открывается, образуя короткозамкнутый контур $x1 - VS7 - VS1 - a1$. На участке $1 - 2$ происходит коммутация, ток в плече VS7 возрастает, а в VS1 падает до нуля, тиристор VS1 закрывается. В точке 2 подается сигнал управления α_{0z} на плечо VS4, оно открывается и образует короткозамкнутый контур $x1 - VS8 - VS4 - 1$. На участке $2 - 3$ протекает коммутация, ток в плече VS4 возрастает, а в VS8 падает до нуля, плечо VS8 закрывается. На участке $3 - 4$ к тяговым двигателям прикладывается напряжение, обусловленное выводами $1 - x1$ вторичной обмотки тягового трансформатора, прохождение тока по тяговым двигателям осуществляется через открытые тиристорные плечи VS4 и VS7. В точке 4 на плечо VS2 подается импульс управления α_p , образуется короткозамкнутый контур $1 - VS4 - VS2 - a1$. На участке $4 - 5$ протекает коммутация, ток в плече VS2 возрастает, а в плече VS4 падает до нуля, плечо VS4 закрывается. В следующем полупериоде работа ВИПа аналогична.

Увеличение выпрямленного напряжения ВИПа на тиристорах осуществляется путем изменения фазы импульсов управления только с конца полупериода в сторону его начала. При регулировании выпрямленного напряжения затягивается процесс коммутации при смене обмоток трансформатора в полупериоде напряжения, когда тиристор с меньшим потенциалом закрывается, а ток начинает протекать по тиристорному с большим потенциалом.

Закрытие тиристорных плеч ВИПа при смене полупериода сетевого напряжения осуществляется за счет снижения тока через них ниже тока удержания путем открытия следующих плеч ВИПа и приложения обратного напряжения. В результате возникает большой угол сдвига фаз ϕ между током i_1 и напряжением u_1 в первичной обмотке тягового трансформатора. Высокая величина минимального угла открытия тиристорных α_0 ($9 - 20$ эл. град) приводит

к увеличению угла ϕ , как следствие, возрастает реактивная мощность Q , а коэффициент мощности снижается. Также на снижение коэффициента мощности влияет и длительный процесс поочередной коммутации тиристорных плеч ВИПа.

Периоды коммутации в работе ВИПа вызывают значительные искажения кривой напряжения контактной сети. Электровозы, работающие в режиме тяги, искажают в основном передний фронт в полупериоде напряжения, а в режиме рекуперативного торможения – задний фронт.

Искажение формы кривой напряжения в процессе коммутации преобразователей вызывает потерю среднеквадратичного значения напряжения в контактной сети. Значительное искажение переднего фронта и большой угол коммутации γ относятся к особо неблагоприятным условиям питания электровозов. Наибольшее снижение напряжения в контактной сети будет проявляться в середине межподстанционной зоны, особенно при одностороннем питании в вынужденных режимах работы устройств электроснабжения.

Искажение напряжения в контактной сети значительно влияет на устойчивость работы системы управления преобразователями, в блоках питания которой приходится применять стабилизаторы напряжения [8].

Когда электровоз находится на межподстанционной зоне длиной l и расстояние до первой тяговой подстанции равно l_1 , а до второй l_2 , в кривой принужденного напряжения на токоприемнике во время коммутации преобразователя возникают разрывы ΔU_n в момент начала и ΔU_k конца коммутации (рисунок 4):

$$\Delta U_n = \frac{L_{\text{ЭКВ}}}{L_{\text{ЭКВ}} + L_3} \cdot \frac{(L_{\text{ЭКВ}} + L_3)U_d - L_d U_m \sin \alpha}{L_{\text{ЭКВ}} + L_3 + L_d}, \quad (1)$$

$$\Delta U_k = \frac{L_{\text{ЭКВ}}}{L_{\text{ЭКВ}} + L_3} \cdot \frac{(L_{\text{ЭКВ}} + L_3)U_d + L_d U_m \sin(\alpha + \gamma)}{L_{\text{ЭКВ}} + L_3 + L_d}, \quad (2)$$

где L_3 и L_d – индуктивность тягового трансформатора и цепи выпрямленного тока соответственно;

U_d – напряжение, выпрямленное на тяговом двигателе электровоза;

U_m – напряжение амплитудное на зажимах тяговой подстанции;

$L_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентная индуктивность цепи между источником питания и токоприемником электровоза:

$$L_{\text{ЭКВ}} = \frac{(L_{n1} + \frac{l_1}{l} L_n)(L_{n2} + \frac{l_2}{l} L_n)}{(L_{n1} + L_{n2} + L_n)}, \quad (3)$$

где L_{n1} и L_{n2} – индуктивность первой и второй подстанций соответственно;

L_n – полная индуктивность контактной сети;

l_1 и l_2 – расстояние от электровоза до первой и второй тяговых подстанций соответственно;

l – длина межподстанционной зоны.

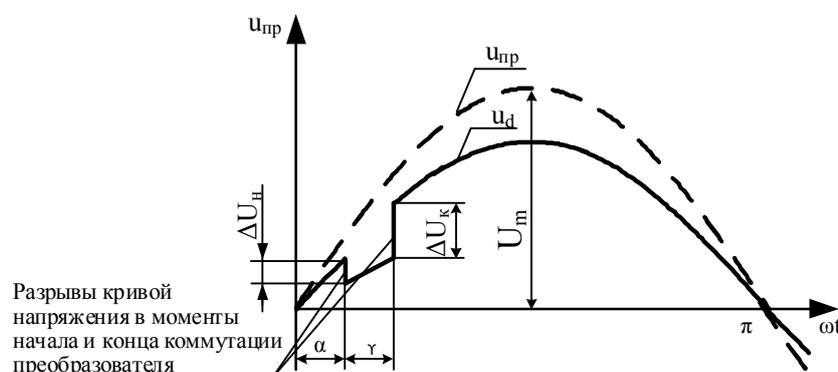


Рисунок 4 – Форма кривой напряжения на первичных шинах тяговой подстанции ($u_{\text{пр}}$) и на токоприемнике электровоза (u_n)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Анализируя формулы (1) – (3), можно сделать вывод о том, что потеря напряжения тем больше, чем больше коммутация γ .

Таким образом, чтобы снизить влияние электровоза на качество напряжения в контактной сети и увеличить коэффициент мощности, необходимо уменьшить минимальный угол открытия α и длительность коммутации γ . Одним из способов решения поставленной задачи является замена устаревшей элементной базы ВИПа на современные силовые полупроводниковые приборы (СПП). Примером таких устройств являются биполярные транзисторы с изолированным затвором – IGBT-транзисторы. Данные устройства полностью управляемые, высокая частота их переключений позволяет производить работу с низкими коммутационными потерями. Скорость коммутации IGBT-транзистора очень высокая, соответственно длительность коммутации будет значительно меньше по сравнению с тиристорами и, как следствие, искажающее воздействие на контактную сеть будет снижено. В настоящее время существует ВИП для коллекторного тягового привода, выполненный на основе IGBT-транзисторов. Данный преобразователь разработан учеными Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), его принципиальная электрическая схема и диаграммы работы представлены на рисунке 5 [9, 10].

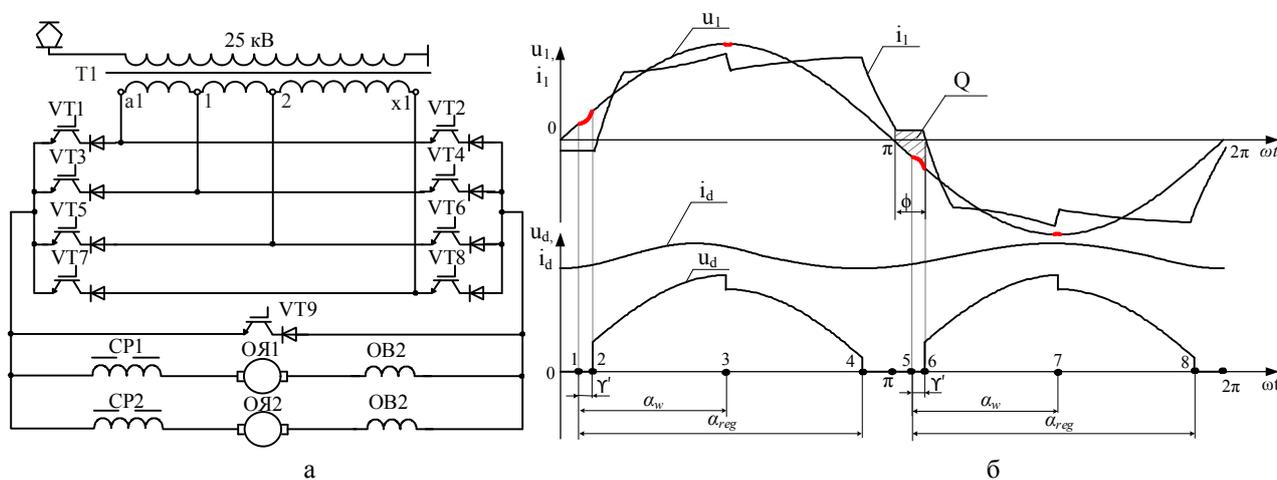


Рисунок 5 – Работа выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах:
а – принципиальная электрическая схема тележки электровоза с ВИПом на IGBT-транзисторах;
б – диаграммы электромагнитных процессов электровоза при работе ВИПа

Рассмотрим работу ВИПа на IGBT-транзисторах (рисунок 5, б). В момент времени 1 подаются сигналы управления: α_{reg} – на транзистор плеча VT2, α_w – на VT7 и VT4. На интервале 1 – 2 происходят коммутация и передача нагрузки с разрядного плеча VT9 на плечи VT2, VT7. На интервале 2 – 3 ток протекает по транзисторам VT2 и VT7, обеспечивается напряжение 4-й зоны регулирования. В момент времени 3 с транзистора VT2 снимается сигнал управления, в работе остаются транзисторы VT4 и VT7, обеспечивается напряжение 3-й зоны регулирования. В точке 4 снимаются сигналы управления с транзисторов VT4 и VT7, происходит открытие разрядного плеча VT9. На интервале 4 – 5 ток протекает через тяговые двигатели, сглаживающий реактор и транзисторное плечо VT9. В момент времени 5 на транзистор VT1 подается сигнал управления α_{reg} , на транзисторы VT8 и VT3 подаются сигналы управления α_w . На участке 5 – 6 происходит коммутация, снимается нагрузка с плеча VT9 на плечи VT1 и VT8. На участке 6 – 7 ток протекает по плечам VT1 и VT8, обеспечивается напряжение 4-й зоны регулирования. В точке 7 снимается управляющий сигнал с плеча VT1, в работу включается плечо VT3. На участке 3 – 8 ток протекает по плечам VT3 и VT8, обеспечивается напряжение 3-й зоны регулирования.

Описанный способ управления и наличие полностью управляемых СПП позволяет максимально уменьшить угол сдвига фаз ϕ , что дает существенный прирост коэффициента мощности [11]. Благодаря снижению длительности основной коммутации и исключению корот-

кого замыкания обмоток тягового трансформатора минимизировано искажение кривой напряжения контактной сети.

Используя методику расчета, приведенную в работе [8], проведем сравнение величины просадки напряжения при работе типового и транзисторного ВИПов. Мгновенное значение напряжения определяется по формуле:

$$u = U_m \sin(\omega t). \quad (4)$$

Среднеквадратичное значение напряжения в первичной обмотке тягового трансформатора определяется выражением:

$$U_{\text{скз}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(\omega t) d\omega t}, \quad (5)$$

где T – длительность одного периода питающего напряжения.

Соответственно, зная величину снижения напряжения в моменты коммутации, формулу среднеквадратичного значения напряжения с учетом разрывов во время коммутации преобразователя можно привести к виду:

$$U'_{\text{скз}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left(\int_0^T u^2(\omega t) d\omega t - 2 \int_{\alpha_0}^{(\alpha_0 + \gamma)} u'^2(\omega t) d\omega t \right)}, \quad (6)$$

где u' – напряжение просадки при коммутации преобразователя, определяется по формуле:

$$u' = C \cdot \sin(\omega t), \quad (7)$$

где C – постоянная просадки напряжения, определяется по формуле (2) при $(\alpha + \gamma) = 90$ эл. град.

Согласно исследованиям [12] длительность основной коммутации тиристорного ВИПа с учетом минимального угла открытия составляет 39 эл. град., тогда как у ВИПа на IGBT-транзисторах длительность коммутации составляет 20 эл. град., при этом коммутация начинается с начала полупериода. Если предположить, что напряжение в контактной сети $U_{\text{к.с}} = 25$ кВ, минимальный угол открытия тиристора составляет 9 эл. град., напряжение на тяговых двигателях 800 В, а электровоз находится в середине междуподстанционной зоны длиной 40 км с двусторонним питанием, определим величину снижения напряжения при основной (сетевой) коммутации:

$$\Delta U = U_{\text{к.с}} - U'_{\text{скз}}. \quad (8)$$

Осуществив необходимые преобразования, выполним расчет по формулам (4) – (7). Снижение напряжения в контактной сети составит 720 В и 470 В для типового и транзисторного ВИПов соответственно. Таким образом, с учетом только сетевой коммутации снижение напряжения в контактной сети уменьшится в 1,5 раза.

На основе проведенных исследований выявлена одна из причин снижения напряжения в контактной сети при пропуске поездов, которая заключается в возникновении просадки напряжения в моменты коммутации выпрямительно-инверторного преобразователя. Установлено, что замена устаревшей базы ВИПов на современные силовые приборы – IGBT-транзисторы – позволит уменьшить время коммутации, что приведет к меньшему снижению напряжения в контактной сети. Определение сокращения межпоездного интервала в тяжеловесном движении и расчет возможного ввода дополнительных пар поездов за счет внедрения современных силовых преобразователей на электровозе представляют направление для дальнейшей научной проработки.

Список литературы

1. 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.
2. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги». – Утв. Указом Президента Российской Федерации № 466р от 07.05.2018 / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2019. – 135 с. – Текст : непосредственный.
3. 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: 24.03.2021).
4. Красноярская железная дорога увеличила пропуск тяжеловесных грузовых поездов. – Текст : электронный. – URL: <https://kras.rzd.ru/news/> (дата обращения: 10.02.2021).
5. Гильманов, А. И. Увеличение массы поезда по сети железных дорог / А. И. Гильманов, О. И. Залогова. – Текст : электронный // Молодая наука Сибири : электрон. науч. журнал. – 2018. – № 11. – URL: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018> (дата обращения: 24.02.2021).
6. Борцов, П. И. Подвижной состав и основы тяги поездов / П. И. Борцов. – Москва : Транспорт, 1976. – 342 с. – Текст : непосредственный.
7. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) : Руководство по эксплуатации. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи. ИДМБ.661142.009.РЭ5. – Новочеркасск : ВЭЛНИИ, 2005. – 125 с. – Текст : непосредственный.
8. Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. – Москва : Транспорт, 1988. – 312 с. – Текст : непосредственный.
9. Патент 2498490 Российская Федерация, МПК H02M, H02P, G05F, B60L. Многозонный выпрямительно-инверторный преобразователь и способ управления преобразователем : № 2012114982/07 : заявлено 16.04.2012 : опубликовано 10.11.2013 / Портной А. Ю., Мельниченко О. В., Шрамко С. Г., Полуянов А. Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения». – 7 с. – Текст : непосредственный.
10. Яговкин, Д. А. Разработка нового энергосберегающего алгоритма управления ВПП электровоза на IGBT модулях / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной. – Текст : непосредственный // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2013. – № 9. – С. 17 – 24.
11. Линьков, А. О. Совершенствование выпрямительной установки возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Линьков Алексей Олегович ; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – 177 с. – Текст : непосредственный.
12. Мельниченко, О. В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Мельниченко Олег Валерьевич ; Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2015. – 392 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *O nacional'nyh celjah i strategicheskikh zadachah razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2024 goda № 466r* (On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024 № 466r). Moscow, President of Russian Federation, 2018, 19 p.

2. *Dolgosrochnaja programma razvitiya otkrytogo akcionernogo obshhestva «Rossijskie zheleznye dorogi» № 466r* (Long-term development program of the open joint-stock company "Russian Railways" No. 466r). Moscow, Government of the Russian Federation, 2019, 135 p.

3. 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/> (accessed 24 March 2021).

4. *Krasnoyarskaya zheleznaya doroga uvelichila propusk tyazhelovesnykh gruzovykh poyezdov* (Krasnoyarsk railway increased the passage of heavy freight trains), Available at: <https://kras.rzd.ru/news/> (accessed 10 February 2021).

5. Gilmanov A. I., Zalogova O. I. Increase of train weight on the railway network [*Uvelicheniye massy poyezda po seti zheleznykh dorog*]. Young science of Siberia: electron. scientific. journal, 2018, no. 11, Available at: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018>, free (accessed 24 February 2021).

6. Bortsov P. I. *Podvizhnoy sostav i osnovy tyagi poyezdov* (Rolling stock and the basics of train traction). Moscow: Transport Publ., 1976, 342 p.

7. *Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K): Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 5. Opisaniye i rabota. Elektronnoye oborudovaniye. Preobrazovateli* (Main electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Manual. Book 5. Description and operation. Electronic equipment. Converters). Novocherkassk: VELNII Publ., 2005, 125 p.

8. Tikhmenev B. N. *Ehleketrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami* (AC electric locomotives with thyristor converters). Moscow: Transport Publ., 1988, 312 p.

9. Portnoy A. Yu., Melnichenko O. V., Shramko S. G., Poluyanov A. G. *Patent RU2498490*, 10.11.2013.

10. Yagovkin D. A., Melnichenko O. V., Portnoy A. Yu. Development of a new energy-saving algorithm for controlling a rectifier-inverter converter electric locomotive on IGBT modules [*Razrabotka novogo energosberegayushchego algoritma upravleniya VIP elektrovoza na IGBT modulyakh*]. *Vestnik instituta tiagi i podvizhnogo sostava – Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock*, 2013, no. 9, pp. 17 – 24.

11. Linkov A. O. *Sovershenstvovaniye vypryamitel'noy ustanovki vozbuzhdeniya tyagovykh dvigateley elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya* (Improvement of the rectifier installation for excitation of traction motors of an AC electric locomotive in the regenerative braking mode). Ph. D. thesis, Omsk, OSTU, 2015, 177 p.

12. Melnichenko O. V. *Povysheniye energeticheskoy effektivnosti tyagovykh elektroprivodov elektrovozov peremennogo toka* (Increasing the energy efficiency of traction electric drives of AC electric locomotives). Doctor's of Sciences in Engineering thesis, Khabarovsk, FESTU, 2015, 392 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Знаенко Вячеслав Николаевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Студент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-950-126-23-70.

E-mail: znaenock@yandex.ru

Линьков Алексей Олегович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

ул. Чернышевского, д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Znaenok Vyacheslav Nikolaevich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

Chernyshevsky st., d. 15, Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Student of the department of Electric Rolling Stock,

Phone: 8-950-126-23-70.

E-mail: znaenock@yandex.ru

Linkov Alexey Olegovich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

Chernyshevsky st., d. 15, Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроподвижной состав», ИрГУПС.
Тел.: 8-924-709-52-99.
E-mail: linkovalex@mail.ru

Ph. D. in Engineering, associate professor of the de-
partment «Electric Rolling Stock».
Phone: 8-924-709-52-99.
E-mail: linkovalex@mail.ru

Мельниченко Олег Валерьевич
Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).
ул. Чернышевского, г. Иркутск, 664074, Россий-
ская Федерация.
Доктор технических наук, заведующий кафедрой
«Электроподвижной состав», ИрГУПС.
Тел.: 8-902-170-24-37.
E-mail: olegmelnval@mail.ru

Melnichenko Oleg Valerevich,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russian
Federation
Doctor of Sciences in Engineering, head of the de-
partment «Electric Rolling Stock».
Phone: 8-902-170-24-37.
E-mail: olegmelnval@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Знаенок, В. Н. Выпрямительно-инверторный пре-
образователь электровоза на базе IGBT-транзисторов
как способ повышения пропускной способности участ-
ков железной дороги / В. Н. Знаенок, А. О. Линьков,
О. В. Мельниченко. – Текст : непосредственный //
Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 66 – 75.

Znaenok V. N, Linkov A. O., Melnichenko O. V. Rec-
tifier-inverter converter of an electric locomotive based on
IGBT transistors as a way to increase the capacity of rail-
way sections. Journal of Transsib Railway Studies, 2021,
no. 1 (45), pp. 66 – 75 (In Russian).

УДК 621.89; УДК 629.4

И. А. Майба, Д. В. Глазунов

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), г. Ростов-на-Дону,
Российская Федерация

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СМАЗЫВАНИЯ КОЛЕС ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. В работе рассмотрен вопрос оптимизации применения смазочных материалов для снижения интенсивности изнашивания гребней колес тягового подвижного состава. Определены цель работы и объекты испытаний. Представлены виды испытаний, методика их проведения, краткое описание испытаний и соответствие техническому заданию и техническим требованиям. Проведены проектные работы по разработке твердых антифрикционных элементов для смазывания гребней колесных пар локомотивов (далее – стержни ТАЭЛ). Стендовые испытания проводились на универсальной машине трения 2168 УМТ «Унитриб», моделирующей контактное взаимодействие колеса с рельсом при нанесении на гребень колеса твердого смазочного материала. Определялись линейная интенсивность изнашивания смазочного элемента и момент трения. Натурные испытания проводились на базе тягового подвижного состава серии ВЛ80, 2ТЭ25КМ, ЧМЭЗ. Определялись такие показатели, как средняя интенсивность выработки стержней ТАЭЛ и штатных смазочных стержней и средняя интенсивность изнашивания гребней колес. Получены результаты лабораторных стендовых и натурных испытаний стержней ТАЭЛ в соответствии с порядком допуска смазочных материалов для контакта «колесо – рельс» к применению в гребнесмазывателях локомотивов, эксплуатирующихся на железных дорогах Российской Федерации. Натурные испытания тягового подвижного состава проводились на полигонах Северо-Кавказской, Юго-Восточной и Приволжской железных дорог. В период проведения натурных испытаний контролировались такие показатели: оценка влияния ТАЭЛ на износ гребней колесных пар, оценка фактического ресурса выработки ТАЭЛ, оценка функциональных возможностей стержней ТАЭЛ. По результатам испытаний разработанные стержни ТАЭЛ получили разрешение на использование для инфраструктуры ОАО «РЖД». При этом интенсивность изнашивания гребней колесных пар локомотивов, снаряженных ТАЭЛ, по сравнению со штатными стержнями, снизилась до 50 %.

Ключевые слова: машина трения, испытания, антифрикционный материал, коэффициент трения, расход, методика.

Igor A. Mayba, Dmitry V. Glazunov

Rostov State University of Railways (RSTU), Rostov-on-Don, the Russian Federation

TRIBOLOGICAL TESTS OF ANTIFRICTION MATERIALS FOR THE LUBRICATION OF ROLLING STOCK WHEELS

Abstract. *The issue of optimizing the use of lubricants to reduce the in-intensity wear of the wheels of traction rolling stock is considered in the work. The purpose of the work and the test objects are defined. The types of tests, their procedure, short description of tests, and compliance with the technical assignment and technical requirements are presented. Design work was carried out on the development of solid antifriction elements for lubricating the ridges of locomotive wheel pairs (hereinafter referred to as TAEЛ rods). Bench tests were carried out on a universal friction machine 2168 UMT «Unitrib», which models the contact interaction of the wheel with the rail when applying solid lubricant to the wheel ridge. The linear wear rate of the lubricating element and the friction moment were determined. Ex-plutаtion tests were carried out on the basis of traction rolling stock of the series VL80, 2TE25KM, ChME3. Such indicators as average intensity of development of cores of TAEЛ and lubricant cores and average intensity of wear of crests of wheels were defined. The results of laboratory bench-out and operational tests of TAEЛ rods were obtained in accordance with the order of admission of lubricating mats-rials for wheel-rail contact for use in locomotive combs operated on the railways of the Russian Federation. Operational tests of traction rolling stock were carried out at the landfills of the North Caucasus, South-Eastern and Volga Railways. During the performance test period, the following indicators were monitored: assessment of the impact of TAEЛ on the wear of co-forest steam ridges, assessment of the actual resource of TAEЛ production, assessment of the functional capabilities of TAEЛ rods. According to the test results, the developed TAEЛ rods received permission to use Russian Railways for the infrastructure. At the same time, the wear rate of the ridges of the wheel pairs of locomotives equipped with TAEЛ in comparison with the standard rods decreased to 50 %.*

Keywords: *friction machine, tests, antifriction material, friction coefficient, flow rate, technique.*

Смазывание контакта колеса с рельсом стало неотъемлемой частью технологии текущего содержания пути как за рубежом, так и на сети дорог России. В то же время можно отметить, что существует ряд нерешенных вопросов технико-экономического, технологического и организационного характера, которые препятствуют эффективному развитию систем лубрикации контакта «колесо – рельс» и соответственно требуют научно обоснованного подхода к их решению [1 – 5].

В числе актуальных вопросов, решение которых позволит существенно повысить экономическую эффективность применения технических средств лубрикации (ТСЛ), можно выделить вопрос оптимизации применения смазочных материалов в технических средствах лубрикации на железных дорогах России за счет повышения эффективности их работы [6 – 9].

Рассматривая и анализируя изобретения, относящиеся к смазочным материалам для контакта гребней колесных пар с рельсами, можно отметить, что при смазывании гребней колесных пар локомотивов используются как жидкие смазочные материалы, так и смазочные материалы в виде твердых смазочных элементов различной геометрической формы [10 – 16].

Цель работы – проведение трибологических испытаний твердых антифрикционных элементов для смазывания гребней колес локомотивов, позволяющих снизить износ колес тягового подвижного состава и рельсов и повысить ресурс смазочного материала.

Научная новизна – сформирована физико-математическая модель системы «грузовой электровоз, оснащенный бесприводными гребнерельсосмазывателями, – железнодорожный путь», позволяющая обосновать адекватность лабораторных испытаний натурным испытаниям.

Теоретическое обоснование – предложена эквивалентная схема передней набегающей колесной пары в поперечном и продольном направлениях, сформированы дифференциальные уравнения движения тележки, оснащенной бесприводными гребнерельсосмазывателями (ГРС) с учетом приходящих на колесную пару общих масс электровоза, внешних сил, действующих на них, и моментов инерций.

Объектами испытаний являются образцы стержней ТАЭЛ, разрабатываемые в соответствии с техническим заданием (ТЗ) и техническими требованиями (ТТ) на смазочные

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

материалы для смазки зоны контакта колес и рельсов. Материал стержней ТАЭЛ должен соответствовать следующим характеристикам:

- легко наноситься, не крошиться, не скалываться и удерживаться на гребне колесной пары локомотива при движении локомотива;
- не оказывать коррозионного воздействия на металлы;
- не иметь в своем составе воды;
- твердость по Шору – шкала D не менее 40 ед.;
- плотность – не менее $1,2 \text{ г/см}^3$;
- трибологические показатели при испытаниях на четырехшариковой машине трения (ЧМТ):
 - критическая нагрузка, Н, – не менее 980;
 - диаметр пятна износа шара при нагрузке 196 Н, мм, – не более 0,6;
 - нагрузка сваривания, Н, – не менее 980.
- должен быть изготовлен в климатическом исполнении У категории 1 и нормально функционировать в следующих условиях:
 - диапазон предельных рабочих температур – минус $50 \text{ }^\circ\text{C}$ до плюс $45 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - влажность – 100 % при температуре плюс $25 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - должен быть стабильным по составу;
 - не должен изменять свою геометрическую форму при хранении и применении.

Для обоснования адекватности лабораторных испытаний натурным выделена механическая система «грузовой электровоз, оснащенный бесприводными ГРС, – железнодорожный путь» и разработана физико-математическая модель данной системы, что позволило установить коэффициенты перехода от природы к модели. Разработана эквивалентная математическая модель передней набегающей колесной пары (рисунок 1), описываемая системой из четырех дифференциальных уравнений, учитывающих условия вписывания в криволинейный участок пути и конструктивные особенности грузового электровоза.

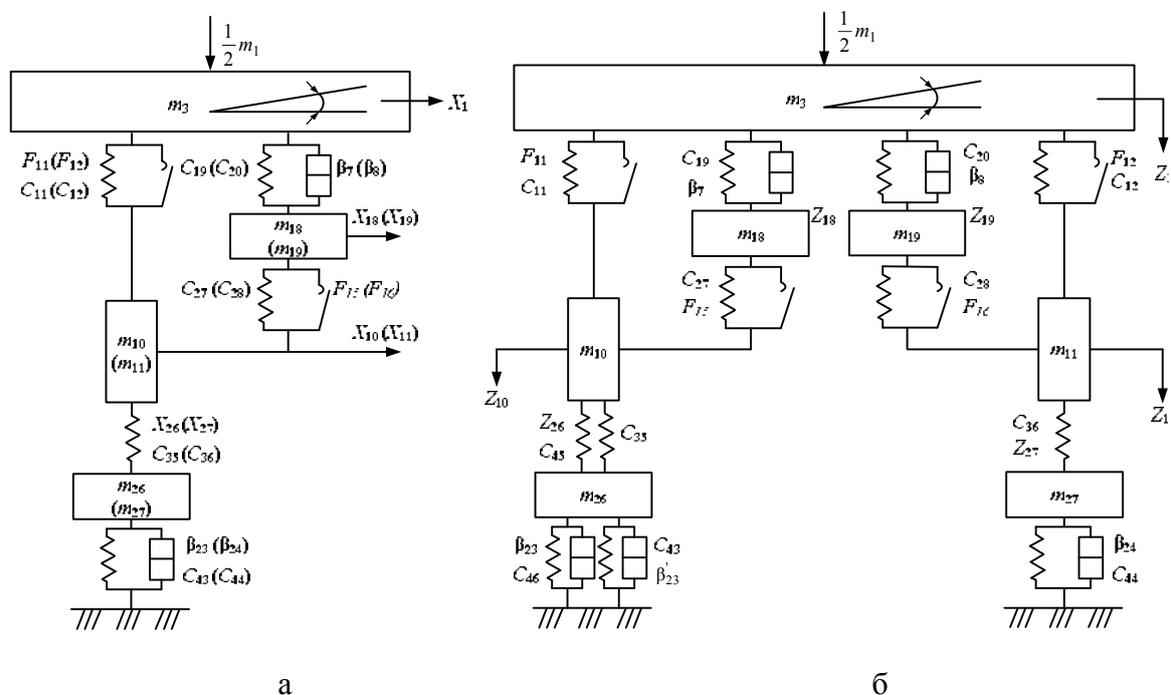


Рисунок 1 – Эквивалентная схема передней набегающей колесной пары:
а – поперечное направление; б – продольное направление

При вписывании в криволинейный участок пути наибольшие динамические нагрузки воспринимает колесо первой колесной пары, движущееся по внешнему рельсу. Перемещени-

ями масс в вертикальной плоскости, а также галопированием пути можно пренебречь, так как при вписывании в кривую наибольшее влияние на грузовой электровоз оказывает поперечная и горизонтальная динамика. Таким образом, мобильную трибосистему «грузовой электровоз, оснащенный бесприводными гребнерельсосмазывателями, – железнодорожный путь» можно представить в виде семимассной эквивалентной схемы, которая в полной мере описывается по четырем координатам: в продольном и поперечном направлениях – Ox , Oy ; угловых перемещениях – боковая качка (θ) и виляние (ψ). Дифференциальные уравнения движения тележки, оснащенной бесприводными ГРС, с учетом приходящих на колесную пару общих масс электровоза, внешних сил, действующих на них, и моментов инерций приведены ниже:

$$\begin{aligned}
 & m_3 \ddot{x}_3 + C_{11}(x_3 - x_{10}) + C_{12}(x_3 - x_{11}) + F_{11} \text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_{10}) + F_{12} \text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_{11}) + C_{19}(x_3 - x_{18}) + \\
 & + C_{20}(x_3 - x_{19}) + \beta_7(\dot{x}_3 - \dot{x}_{18}) + \beta_8(\dot{x}_3 - \dot{x}_{19}) = 0; \\
 & m_3 \ddot{y}_3 + C_{11}(y_3 - y_{10}) + C_{12}(y_3 - y_{11}) + F_{11} \text{sign}(\dot{y}_3 - \dot{y}_{10}) + F_{12} \text{sign}(\dot{y}_3 - \dot{y}_{11}) + C_{19}(y_3 - y_{18}) + \\
 & + C_{20}(y_3 - y_{19}) + \beta_7(\dot{y}_3 - \dot{y}_{18}) + \beta_8(\dot{y}_3 - \dot{y}_{19}) = \frac{1}{4}(H_{1r} - P_{1r} - Y_{p1} - Y_{p2}); \\
 & J_{3z} \cdot \ddot{\psi} - f_1 \cdot C_{11}(x_3 - x_{10}) + f_2 \cdot C_{12}(x_3 - x_{11}) + (L_1 + l_1)C_{11}(y_3 - y_{10}) + (L_2 + l_2)C_{12}(y_3 - y_{11}) - \\
 & - f_1 \cdot F_{11} \cdot \text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_{10}) + f_2 \cdot F_{12} \cdot \text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_{11}) + (L_1 + l_1)F_{11} \cdot \text{sign}(\dot{y}_3 - \dot{y}_{10}) + \\
 & + (L_2 + l_2)F_{12} \cdot \text{sign}(\dot{y}_3 - \dot{y}_{11}) - f_1 \cdot C_{19}(x_3 - x_{18}) + f_2 \cdot C_{20}(x_3 - x_{19}) + (L_1 + l_1)C_{19}(y_3 - y_{18}) + \\
 & + (L_2 + l_2)C_{20}(y_3 - y_{19}) - f_1 \cdot \beta_7(\dot{x}_3 - \dot{x}_{18}) + f_2 \cdot \beta_8(\dot{x}_3 - \dot{x}_{19}) + (L_1 + l_1)\beta_7(\dot{y}_3 - \dot{y}_{18}) + \\
 & + (L_2 + l_2)\beta_8(\dot{y}_3 - \dot{y}_{19}) = \frac{1}{4} \cdot (L_1 \cdot Y_{p1} - L_2 \cdot Y_{p2}); \\
 & J_{3x} \cdot \ddot{\theta} + f_1 \cdot C_{11}(z_3 - z_{10}) - f_2 \cdot C_{12}(z_3 - z_{11}) + f_1 \cdot F_{11} \cdot \text{sign}(\dot{z}_3 - \dot{z}_{10}) - f_2 \cdot F_{12} \cdot \text{sign}(\dot{z}_3 - \dot{z}_{11}) - \\
 & - h_1 \cdot C_{11}(y_3 - y_{10}) - h_2 \cdot C_{12}(y_3 - y_{11}) - h_1 \cdot F_{11} \cdot \text{sign}(\dot{y}_3 - \dot{y}_{10}) - h_2 \cdot F_{12} \cdot \text{sign}(\dot{y}_3 - \dot{y}_{11}) + \\
 & + f_1 \cdot C_{19}(z_3 - z_{18}) - f_2 \cdot C_{20}(z_3 - z_{19}) + f_1 \cdot \beta_7(\dot{z}_3 - \dot{z}_{18}) - f_2 \cdot \beta_8(\dot{z}_3 - \dot{z}_{19}) - \\
 & - h_1 \cdot C_{19}(y_3 - y_{18}) - h_2 \cdot C_{20}(y_3 - y_{19}) - h_1 \cdot \beta_7(\dot{z}_3 - \dot{z}_{18}) - h_2 \cdot \beta_8(\dot{z}_3 - \dot{z}_{19}) = \frac{1}{4} \cdot (h_1 Y_{p1} + h_2 Y_{p2}).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Приняты следующие обозначения: m_1 – масса кузова грузового электровоза; m_3 – масса тележки грузового электровоза; m_{10} , m_{11} – массы колес грузового электровоза; m_{18} , m_{19} – массы бесприводных ГРС стержневого типа, установленных на раме тележки грузового электровоза; m_{26} , m_{27} – приведенная масса пути (масса рельса, шпалы и балласта, приходящиеся на 1 м пути); C_{11} , C_{12} – жесткости контакта контактирующих масс тележек и колес грузового электровоза; C_{19} , C_{20} – жесткости контакта контактирующих масс тележек и бесприводных ГРС; F_{11} , F_{12} – диссипативная сила на фрикционном гасителе колебаний тележек; β_7 , β_8 – коэффициент демпфирования бесприводных ГРС, установленных на раме тележки при движении грузового электровоза [12].

Для корректного проведения проектных работ по разработке стержней ТАЭЛ была составлена матрица проведения лабораторных, стендовых и натурных испытаний, предусмотренных порядком допуска смазочных материалов на инфраструктуру ОАО «РЖД» в соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» от 19 августа 2009 г. № 1735р «О порядке допуска горюче-смазочных материалов к применению ОАО «РЖД».

В таблице 1 представлены содержание лабораторных испытаний (ТАЭЛ.222929.00ПМ-ЛБ) и соответствие их ТТ и ТЗ.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Содержание лабораторных испытаний (ТАЭЛ.222929.00ПМ-ЛБ) и соответствие их ТТ и ТЗ

Наименование вида проверки	Пункт ТЗ (ТТ)	Способ определения	Описание испытаний
Коррозионное воздействие	3.2.3 (7.7)	ГОСТ 9.080	Оценка коррозионного воздействия на металлы ТАЭЛ
Содержание воды	3.2.4 (7.7)	ГОСТ 2477	Оценка стабильности состава ТАЭЛ
Твердость	3.2.5	ГОСТ 24621	Оценка стойкости к истиранию ТАЭЛ
Плотность	3.2.6	ГОСТ 15139	Оценка объемно-массовых характеристик и однородности состава ТАЭЛ
Физико-химические показатели	3.2.3 3.2.4 3.2.5 3.2.6	ГОСТ 9.080 ГОСТ 2477 ГОСТ 24621 ГОСТ 15139	Проверка физико-химических показателей, полученных на этапе предварительных испытаний
Трибологические характеристики на четырехшариковой машине трения ЧШМ (смазывающие свойства)	3.2.8 (7.7)	ГОСТ 9490	Оценка смазывающих свойств на четырехшариковой машине трения ЧШМ: – критическая нагрузка P_k , Н – диаметр пятна износа D_n при нагрузке 196 Н, мм – нагрузка сваривания $P_{св}$, Н
Стойкость к внешним воздействиям	3.3.1 (7.1.)	ГОСТ 30630.2.1	Оценка соответствия климатическому исполнению У1

В таблице 2 представлены содержание стендовых испытаний (ТАЭЛ.222929.00ПМ-ЛБ) и соответствие их ТТ и ТЗ.

Таблица 2 – Содержание стендовых испытаний (ТАЭЛ.222929.000ПМ-СТ) и соответствие их ТТ и ТЗ

Наименование вида проверки	Пункт ТЗ (ТТ)	Способ определения	Описание испытаний
Моделирование реальных режимов работы ТАЭЛ	3.2.7, 5 (7.1)	Программа и методика испытаний ТАЭЛ.222929.000ПМ-СТ	Проверка соответствия требованиям влияния на эксплуатационную надежность и технико-экономические показатели техники

В таблице 3 представлены содержание натуральных испытаний (ТАЭЛ.222929.00ПМ-ЛБ) и соответствие их ТТ и ТЗ.

Таблица 3 – Содержание натуральных испытаний (ТАЭЛ.222929.000ПМ-ЭК) и соответствие их ТТ и ТЗ

Пункт ТЗ (ТТ)	Способ определения	Описание испытаний	Наименование вида проверки
Оценка нового смазочного материала в условиях эксплуатации локомотивов, установление периодичности технического обслуживания, расчет технико-экономической эффективности от применения ТАЭЛ	3.2.1, 5 (7.1 – 7.5)	Программа и методика испытаний ТАЭЛ.222929.000ПМ-ЭК	Проверка влияния ТАЭЛ на износ гребней колесных пар и ресурс выработки ТАЭЛ Проверка функциональных возможностей ТАЭЛ

Лабораторные испытания проводились в соответствии с программой и методикой лабораторных испытаний ТАЭЛ.222929.000ПМ-ЛБ. Для проведения испытаний были отобраны пробы ТАЭЛ. Пробы в виде шести образцов разной конфигурации были переданы в аккредитованную испытательную лабораторию ООО «ВНПП» г. Ростова-на-Дону. Методика проведения испытаний предусматривала использование стандартизованных методов испытаний, представленных в таблицах 1 – 3. Результаты лабораторных испытаний ТАЭЛ представлены в таблице 4.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 4 – Результаты лабораторных испытаний

Наименование показателя	Ед. измерения	Норма по ТЗ	Норма по ТТ	Фактическое значение
Коррозионное воздействие на металлы (сталь 40,45 по ГОСТ 1050)	–	Выдерживает	Выдерживает	Выдерживает
Содержание воды	%	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
Твердость по Шору – шкала D, не менее	н/мм ²	40	Не установлена	72/65
Плотность, не менее	г/см ³	1,2	Не установлена	1,45/1,33
Критическая нагрузка Р _к , не менее	Н	980	980	1098/1098
Диаметр пятна износа D _и при нагрузке 196 Н, не более	мм	0,6	0,6	0,45/0,45
Нагрузка сваривания Р _{св} , не менее	Н	2607	2607	4381/4381
Температурный диапазон	°С	–45...+50	–45...+50	
Влажность	%	100 %	100 %	Выдерживает

В результате испытаний установлено, что фактические значения физико-химических, трибологических показателей и показателей стойкости к климатическим воздействиям стержней ТАЭЛ соответствуют требованиям, установленным в техническом задании ТАЭЛ.222929.000ТЗ, и техническим требованиям на смазочные материалы для лубрикации зоны контакта «колесо – рельс», утвержденным распоряжением ОАО «РЖД» от 24.02.2010 № 375р. Результаты первого этапа приемочных лабораторных испытаний свидетельствуют о готовности ТАЭЛ к проведению второго и четвертого этапов приемочных испытаний – стендовых и натурных испытаний, обязательных для новых смазочных материалов для контакта «колесо – рельс».

Стендовые испытания проводились в соответствии с программой и методикой, предусматривающими проведение испытаний в условиях, моделирующих реальные режимы работы смазочных элементов ТАЭЛ, в сравнении со штатным твердым смазочным элементом, который применяется в системах гребнесмазывания ГРС-БМЗ тепловозов. Для проведения испытаний были отобраны и переданы Трибологической лаборатории РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, г. Москва, по три образца круглого сечения стержней ТАЭЛ Ø25×120 и смазочных стержней СНТС Ø25×120.

Испытания проводились по схеме «диск – палец» на универсальной машине трения 2168 УМТ «Унитриб», предназначенной для испытания фрикционных, антифрикционных и смазочных материалов на трение и износ в широком диапазоне режимов. В процессе испытаний измеряли момент трения, весовой (линейный) износ образцов стержней, частоту вращения и рассчитывали путь трения при постоянной подаче смазочного материала и неизменном удельном давлении в зоне фрикционного взаимодействия.

За результат оценки выработки смазочного стержня принималась усредненная весовая (линейная) интенсивность изнашивания смазочного стержня при трении о диск, определяемая как среднее арифметическое из трех испытаний.

По результатам испытаний составлялся протокол испытаний и делались выводы при сопоставлении следующих показателей:

- фактические значения расхода смазочных стержней;
- трибологические показатели контакта (момент трения, коэффициент трения).

Результаты стендовых испытаний стержней ТАЭЛ и штатных смазочных стержней приведены в таблице 5.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 5 – Результаты стендовых испытаний

Наименование показателя	Единица измерения	Фактическое значение		Сравнение
		ТАЭЛ	штатный	
Линейная интенсивность изнашивания смазочного элемента (среднее значение)	мм/км	0,01	0,08	В восемь раз меньше
Момент трения (разброс значений/среднее)	Н м	22...31/28	21...27/24	Сопоставимые значения

В результате стендовых испытаний на универсальной машины трения 2168 УМТ «Унитриб», проводимых в условиях, моделирующих контактное взаимодействие колеса с рельсом при нанесении на гребень колеса твердого смазочного материала, подаваемого в контакт в виде смазочных стержней круглого сечения, установлено, что фактические значения ресурса выработки ТАЭЛ в восемь раз меньше, чем у штатных смазочных стержней при сопоставимых значениях моментов трения в модельном контакте гребня колеса с рельсом. Стержни ТАЭЛ имеют существенно увеличенный ресурс выработки (восемь раз) по сравнению со штатными стержнями. Это улучшение свойств позволяет проводить регламентные работы по экипировке устройств гребнесмазывания локомотивов со значительно увеличенной периодичностью, что окажет положительное влияние на эксплуатационную надежность и технико-экономические показатели работы локомотивов. Полученные результаты требуют подтверждения в ходе следующего этапа приемочных испытаний – натурных испытаний, по результатам которых необходимо провести экономические расчеты и оценить эффективность применения ТАЭЛ. Натурные испытания проводились в соответствии с программой и методикой на представительском количестве единиц техники, достаточном для оценки показателей ее надежности с заданной точностью и достоверностью в соответствии с требованиями РД 50-690-89 «Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным», в условиях реальной ее эксплуатации.

В соответствии с согласованными с Дирекцией тяги – филиалом ОАО «РЖД» – картами опыта снаряжение штатных гребнесмазывателей локомотивов серии ВЛ80, 2ТЭ25КМ и ЧМЭЗ проводилось стержнями ТАЭЛ. Заправка осуществлялась в условиях сервисных локомотивных депо филиала «Северо-Кавказский» ООО «ЛокоТех-Сервис». Эксплуатация локомотивов проводилась на полигонах Северо-Кавказской, Юго-Восточной и Приволжской железных дорог.

В ходе проведения испытаний проводилась проверка следующих показателей.

1. Оценка влияния ТАЭЛ на износ гребней колесных пар. Выполнялись замеры износа гребней колесных пар с определением средних значений интенсивности их изнашивания по каждой серии локомотивов. Средняя интенсивность изнашивания гребней бандажей в секции локомотива определяется по формуле, мм/10⁴км:

$$I_{sr} = \frac{\sum \Delta a_i \times 10000}{L \times 2 \times n}, \quad (2)$$

где $\sum \Delta a_i$ – суммарная величина износа по толщине гребней всех бандажей в секции локомотива за все время испытаний, мм;

L – суммарный пробег локомотива за все время испытаний, км;

n – число осей в секции.

2. Оценка фактического ресурса ТАЭЛ. Проводились замеры ресурса ТАЭЛ с определением среднего ресурса для каждой серии локомотива.

Средний ресурс ТАЭЛ при трении о гребень колеса определяется по формуле, ед/10⁴ км:

$$V_{sr} = \frac{\sum N_i \times 10000}{L \times 2 \times n}, \quad (3)$$

где $\sum N_i$ – суммарное количество израсходованных ТАЭЛ в секции локомотива за время испытаний, ед;

L – суммарный пробег локомотива за все время испытаний, км;

3. Оценка функциональных возможностей стержней ТАЭЛ, их устойчивость к механическим и климатическим воздействиям. Проводился визуальный осмотр ТАЭЛ на наличие трещин, деформаций, повреждений и оценка состояния поверхности гребня колеса [9].

На основании изложенного можно сделать выводы.

Разработана физико-математическая модель системы «грузовой электровоз, оснащенный бесприводными гребнерельсосмазывателями, – железнодорожный путь», позволяющая установить адекватность лабораторных испытаний натурным.

В результате проведения натурных испытаний установлено:

интенсивность изнашивания гребней колесных пар локомотивов, снаряженных ТАЭЛ, по сравнению со штатными стержнями снижена на 25 – 50 %;

ресурс ТАЭЛ по сравнению со штатными стержнями выше от 7,5 до 50 раз.

В ходе испытаний не зафиксировано повреждений (сколов, трещин) стержней ТАЭЛ вследствие механических и климатических воздействий.

Список литературы

1. Буйносов, А. П. Расчет распределения нагрузки между телами качения в роликовом подшипнике тягового двигателя электровоза / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 1 (37). – С. 2 – 8.

2. Балановский, А. Е. Основные вопросы теории плазменного поверхностного упрочнения металлов (Обзор. Часть 2) / А. Е. Балановский. – Текст : непосредственный // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 1. – С. 25 – 34.

3. Богданов, В. М. Обеспечение устойчивой работы системы колесо – рельс на отечественных и зарубежных железных дорогах / В. М. Богданов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2010. – № 2. – С. 10 – 14.

4. Улучшение свойств металла обода колесных пар тягового подвижного состава / А. Ф. Богданов, А. М. Будюкин [и др.]. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2014. – № 1 (10). – С. 22 – 30.

5. Буйносов, А. П. Совершенствование метода расчета длины тормозного пути железнодорожного подвижного состава / А. П. Буйносов, Е. В. Федоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 1 (33). – С. 13 – 22.

6. Выбор оболочки гребнесмазочного блока / В. А. Кохановский, И. А. Майба, Д. В. Глазунов, И. В. Больших. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 2016. – № 2. – С. 53 – 54.

7. Кохановский, В. А. Управление эксплуатационными показателями смазочного материала / В. А. Кохановский, Д. В. Глазунов. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 2017. – № 6. – С. 54 – 58.

8. Порошковые подшипники с полимерными вставками / В. А. Кохановский, И. А. Майба, Д. В. Глазунов, И. А. Зориев. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 2019. – Т. 40. – № 3. – С. 291 – 297.

9. Глазунов, Д. В. Методика исследования трибологических характеристик компонентов смазочного блока, работающего в трибоконтакте «колесо – рельс» / Д. В. Глазунов. – Текст : непосредственный // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 3. – С. 31 – 37.

10. Майба, И. А. Теоретическое обоснование механизма смешанной (полужидкостной) смазки в контакте «твердый оболочечный смазочный стержень – колесо – рельс» / И. А. Майба, Д. В. Глазунов. – Текст : непосредственный // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 1 (19). – С. 223 – 232.

11. Кохановский, В. А. Концепция унификации трибосистем / В. А. Кохановский, Д. В. Глазунов. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 2019. – № 10. – С. 53 – 56.

12. Глазунов, Д. В. Исследование значимости факторов, влияющих на ресурс смазочного материала в паре трения «колесо – рельс» / Д. В. Глазунов. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 2017. – № 6. – С. 63 – 65.

13. Майба, И. А. Оптимизация триботехнических характеристик модификаторов трения пары «колесо – рельс» / И. А. Майба, Д. В. Глазунов. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 2020. – Т. 41. – № 6. – С. 698 – 703.

14. Кохановский, В. А. Макрокомпозиционные полимерпорошковые подшипники / В. А. Кохановский, Д. В. Глазунов, И. А. Зориев. – Текст : непосредственный // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 2. – С. 40 – 45.

15. Кохановский, В. А. Выбор компонентов смазочного материала для открытых узлов трения подвижного состава / В. А. Кохановский, Д. В. Глазунов. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 2016. – № 3. – С. 36 – 38.

16. Глазунов, Д. В. Визуализация ротапринтного метода смазывания гребней колес подвижного состава / Д. В. Глазунов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 7. – С. 70 – 72.

References

1. Buynosov A. P., Mishin Ya. A. Calculation of load distribution between rolling bodies in the roller bearing of the electric locomotive traction engine [Расчет распределения нагрузки между телами качения в роликовом подшипнике тягового двигателя электровоза]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 1 (37), pp. 2 – 8.

2. Balanovsky A. E. Basic questions of the theory of plasma surface hardening of metals (Obzor. Part 2) [Osnovnye voprosy teorii plazmennogo poverhnostnogo uprochneniya metallov (Obzor. Chast' 2)]. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia – Strengthening technologies and coatings*, 2016, no. 1, pp. 25 – 34.

3. Bogdanov V. M. Ensuring the stable operation of the wheel – rail system on domestic and foreign railways [Обеспечение устойчивой работы системы колесо – рельс на отечественных и зарубежных железных дорогах]. *Vestnik VNIIZHT – VNIIZHT Scientific Journal*, 2010, no. 2, pp. 10 – 14.

4. Budyukin A. M., Ivanov I. A., Zhukov D. A., Urushev S. V. Improving the properties of the metal rim of wheel pairs of traction rolling stock [Улучшение свойств металла обода колесных пар тягового подвижного состава]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of the results of scientific research*, 2014, no. 1 (10), pp. 22 – 30.

5. Buynosov A. P., Fedorov E. V. Improving the method for calculating the length of the braking distance of a railway rolling stock [Совершенствование метода расчета длины тормозного пути железнодорожного подвижного состава]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 1 (33), pp. 13 – 22.

6. Kokhanovsky V. A., Maiba I. A., Glazunov D. V., Bolshykh I. V. The choice of the shell of the grebnesmazochny block [Выбор оболочек гребнесмазочного блока]. *Vestnik mashinostroeniya – Bulletin of Mechanical Engineering*, 2016, no. 2, pp. 53 – 54.

7. Kokhanovsky V. A., Glazunov D. V. Management of operational indicators of the lubricant [Управление эксплуатационными показателями смазочного материала]. *Vestnik mashinostroeniya – Bulletin of Mechanical Engineering*, 2017, no. 6, pp. 54 – 58.

8. Kokhanovsky V. A., Maiba I. A., Glazunov D. V., Zoriev I. A. Powder bearings with polymer inserts [Порошковые подшипники с полимерными вставками]. *Trenie i iznos – Journal of Friction and Wear*, 2019, vol. 40, no. 3, pp. 291 – 297.

9. Glazunov D. V. Methodology for the study of tribological characteristics of components of a lubricating block operating in the wheel – rail tribocontact [Методика исследования триботехнических характеристик компонентов смазочного блока, работающего в трибоконтате «колесо – рельс»]. *Trenie i mazka v mashinah i mekhanizmah – Friction and lubrication in machines and mechanisms*, 2013, no. 3, pp. 31 – 37.

10. Maiba I. A., Glazunov D. V. Theoretical justification of the mechanism of mixed (semi-liquid) lubrication in contact «solid shell lubricating rod – wheel – rail» [Teoreticheskoe obosnovanie mekhanizma smeshannoj (poluzhidkostnoj) smazki v kontakte «tverdyj obolochecnyj smazochnyj sterzhen' – koleso – rel's»]. *Inzhenernyj vestnik Dona – Engineering Bulletin of the Don*, 2012, no. 1 (19), pp. 223 – 232.

11. Kokhanovsky V. A., Glazunov D. V. The concept of unification of tribosystems [Konceptsiya unifikacii tribosistem]. *Vestnik mashinostroeniya – Bulletin of Mechanical Engineering*, 2019, no. 10, pp. 53 – 56.

12. Glazunov D. V. Investigation of the significance of factors affecting the resource of the lubricant in the pair of friction «wheel – rail» [Issledovanie znachimosti faktorov, vliyayushchih na resurs smazochnogo materiala v pare treniya «koleso – rel's»]. *Vestnik mashinostroeniya – Bulletin of Mechanical Engineering*, 2017, no. 6, pp. 63 – 65.

13. Maiba I. A., Glazunov D. V. Optimization of tribotechnical characteristics of modifiers of the wheel – rail pair friction [Optimizaciya tribotekhnicheskikh harakteristik modifikatorov treniya pary «koleso – rel's»]. *Trenie i iznos – Journal of Friction and Wear*, 2020, vol. 41, no. 6, pp. 698 – 703.

14. Kochanowski V. A., Glazunov D. V. Macrocomposition polimerprom bearings [Makrokompozicionnye polimerporoshkovye podshipniki]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin – Problems of mechanical engineering and reliability of machines*, 2019, no. 2, pp. 40 – 45.

15. Kohanovsky V. A., Glazunov D. V. The choice of components of the lubricant for open friction units of rolling stock [Vybor komponentov smazochnogo materiala dlya otkrytyh uzlov treniya podvizhnogo sostava]. *Vestnik mashinostroeniya – Bulletin of Mechanical Engineering*, 2016, no. 3, pp. 36 – 38.

16. Glazunov D. V. Visualization of the rotaprint method of greasing the ridges of rolling stock wheels [Vizualizaciya rotaprintnogo metoda smazyvaniya grebnej koles podvizhnogo sostava]. *Zheleznodorozhnyj transport – Railway transport*, 2018, no. 7, pp. 70 – 72.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Майба Игорь Альбертович

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 кафедры «Транспортные машины и триботехника», РГУПС.

Тел.: +7 (863) 272-65-91.

E-mail: 123mia@yandex.ru

Глазунов Дмитрий Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортные машины и триботехника», РГУПС.

Тел.: +7 (863) 272-63-04.

E-mail: glazunovdm@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Майба, И. А. Трибологические испытания антифрикционных материалов для смазывания колес подвижного состава / И. А. Майба, Д. В. Глазунов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 75 – 84.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maiba Igor Albertovich

Rostov state transport University (RSTU).

Rostov square Infantry Regiment of the people's Militia., 2, Rostov-on-don, 344038, The Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Transport cars and tribology», RSTU.

Phone: +7 (863) 272-65-91.

E-mail: 123mia@yandex.ru

Glazunov Dmitry Vladimirovich

Rostov state transport University (RSTU).

Rostov square Infantry Regiment of the people's Militia., 2, Rostov-on-don, 344038, The Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport cars and tribology», RSTU.

Phone: +7 (863) 272-63-04.

E-mail: glazunovdm@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Maiba I. A., Glazunov D. V. Tribological tests of anti-friction materials for the lubrication of rolling stock wheels. *The Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 1 (45), pp. 75 – 84 (In Russian).

В. И. Моисеев¹, А. В. Жебанов²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), г. Самара, Российская Федерация

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Аннотация. Транспортировка в вагонах-цистернах вязких наливных грузов (мазатов, парафинов, технических масел, крекинг-остатков и др.) затруднена их застыванием, сопровождающимся резким повышением вязкости. Фактически это приводит к необходимости разогрева или частичного подогрева перевозимого нефтепродукта перед выгрузкой, проводимой обычно как слив самотеком, с целью восстановления текучести доставленного нефтегруза. Процесс выгрузки в этом случае с разогревом ведет к значительному увеличению стоимости транспортировки нефтепродуктов, в том числе и простоя вагонов-цистерн, а в целом к уменьшению оборота подвижного состава. По проведенному анализу по определению затрат на технологический процесс разогрева застывших нефтепродуктов, перевозимых железнодорожным транспортом, затрачивается порядка 600 тыс. т в год условного топлива, а простой вагонов-цистерн под выгрузкой и последующей очисткой котлов от высоковязких остатков нефтегруза превышает 1 млн вагоночасов. Актуальность вопроса снижения себестоимости железнодорожных перевозок вязких грузов обусловлена интенсивным развитием северных и восточных регионов РФ. Важными для перевозки в этих условиях факторами становятся не только отрицательная среднесуточная температура воздуха, но и большие расстояния.

Рассмотрен вопрос о снижении себестоимости перевозок вязких нефтепродуктов при низких температурах воздуха. Вязкие нефтепродукты при загустевании превращаются в реологическую жидкость, у которой нет четкой границы раздела между жидкой и твердой фазами. Применены методы перевода в стратифицированное состояние горячего мазута при его медленном охлаждении и частичном затвердевании с образованием теплоизолирующего слоя из затвердевшего мазута. Положительный эффект достигается снижением времени и затрат тепловой энергии на выгрузку доставленного нефтепродукта за счет снижения темпа его охлаждения при перевозках. Это в свою очередь достигается подавлением естественной конвекции горячего нефтепродукта на холодных стенках котла вагона-цистерны в первые несколько часов после налива в цистерну. Из сравнения экспериментальных данных и результатов расчета подобраны значения эмпирических коэффициентов уравнения для коэффициента теплоотдачи жидкого нефтепродукта. Среднеквадратическое отклонение абсолютной температуры жидкого нефтепродукта составило 8 %.

Ключевые слова: вагон-цистерна, транспортировка нефтепродукта, математическая модель, тепловой расчет, коэффициент теплоотдачи, вакуумные панели.

Vladimir I. Moiseev¹, Alexander V. Zhebanov²

¹ Saint-Petersburg State Transport University Emperor Alexander I (SSTU), Saint-Petersburg, the Russian Federation;

² Samara State University of Transport (SSUT), Samara, the Russian Federation

CALCULATION OF THE THERMAL MODEL OF A WAGON-TANK FOR THE TRANSPORTATION OF PETROLEUM PRODUCTS

Abstract. Transportation in tank cars of viscous liquid cargo (fuel oil, paraffins, industrial oils, cracking residues, etc.) is difficult with their solidification, accompanied by a sharp increase in viscosity. In fact, this leads to the need to warm up or partially warm up the transported oil product before unloading, usually carried out as a gravity discharge, in order to restore the fluidity of the delivered oil cargo. The process of unloading in this case with heating leads to a significant increase in the cost of transporting petroleum products, including the downtime of tank cars, and in general, a decrease in the turnover of rolling stock. According to the analysis carried out to determine the costs of the technological process of heating frozen petroleum products transported by rail, about 600 thousand tons of conventional fuel are spent per year, and the idle time of tank cars under unloading and subsequent cleaning of boilers from high-viscosity residues of oil cargo exceeds 1 million car-hours. The urgency of the issue of reducing the cost of railway transportation of viscous cargo is due to the intensive development of the Northern and Eastern regions of the Russian Federation. Important factors for transportation in these conditions are not only the negative average daily air temperature, but also long distances.

The issue of reducing the cost of transportation of viscous petroleum products at low air temperatures is considered. Viscous petroleum products, when thickened, turn into a rheological liquid, which does not have a clear interface between the liquid and solid phases. The methods of transfer to the stratified state of hot fuel oil during its slow cooling and partial solidification with the formation of a heat-insulating layer of solidified fuel oil are applied. The positive effect is achieved by reducing the time and cost of thermal energy for unloading the delivered oil product by reducing the rate of its cooling during transportation. This, in turn, is achieved by suppressing the natural convection of the hot oil product on the cold walls of the boiler of the tank car in the first few hours after filling the tank. From the comparison of the experimental data and the calculation results, the values of the empirical coefficients of the equation for the heat transfer coefficient of liquid petroleum products are selected. The standard deviation of the absolute temperature of the liquid petroleum product was 8 %.

Keywords: wagon-tank, transportation of petroleum products, mathematical model, thermal calculation, heat transfer coefficient, vacuum panels.

При транспортировке в вагонах-цистернах вязких наливных грузов (ВНГ), таких как мазуты, парафины, технические масла, крекинг-остатки и др., происходит их застывание, сопровождающееся резким повышением вязкости. Это приводит к необходимости разогрева перевозимого нефтепродукта перед выгрузкой, проводимой обычно как слив самотеком, для восстановления текучести доставленного нефтегруза.

Разогрев большой (около 66 т) массы ВНГ, находящейся в котле только одного вагона-цистерны, представляет собой трудоемкую, длительную, энергоемкую и дорогостоящую технологическую операцию, связанную с эксплуатацией специального оборудования на сливных площадках и производственных площадях.

Операция выгрузки ВНГ, проводимая с разогревом, ведет к значительному увеличению стоимости перевозок нефтепродуктов и простоя вагонов-цистерн, а следовательно, и к уменьшению оборота подвижного состава. Всего на разогрев ВНГ, перевозимых железнодорожным транспортом РФ, затрачивается в год около 600 тыс. т условного топлива, а годовой простой вагонов-цистерн под выгрузкой ВНГ и очисткой котлов от высоковязких остатков нефтегруза превышает 1 млн вагоночасов.

Актуальность вопроса снижения себестоимости железнодорожных перевозок ВНГ обусловлена интенсивным развитием северных и восточных регионов РФ, где находится и большинство предприятий по добыче и переработке нефти. Для районов Сибири и Севера характерен продолжительный (свыше девяти месяцев в году) холодный осенне-зимний период с низкими температурами воздуха.

Важными для перевозки в этих условиях факторами становятся отрицательная среднесуточная температура воздуха, большие расстояния и низкая разветвленность железнодорожной сети РФ в названных регионах, определяющие продолжительность (около 15 суток) перевозки нефтегруза [1].

Вязкие нефтепродукты в большинстве случаев ввиду нехватки единиц специализированного подвижного состава перевозятся в универсальных вагонах-цистернах с последующим разогревом в пунктах выгрузки. В настоящее время производятся вагоны-цистерны с улучшенными техническими характеристиками, оборудованные наружным теплоизоляционным кожухом толщиной 300 мм (мод. 15-6913, 15-6900), предназначенные для транспортировки затвердевающих химических грузов, таких как, например, расплавленная сера, каменноугольный и нефтяной пек и ряд других продуктов. Однако практика эксплуатации таких вагонов показала их низкую рентабельность.

Стоимость изготовления вагонов-цистерн-термосов по сравнению с универсальными вагонами-цистернами или вагонами-цистернами, оборудованными, например, парообогревательными рубашками, в два раза выше. Плановые ремонтные работы также оказались достаточно дорогостоящими. Все ВНГ, включая даже нефтебитумы, оказываются пожароопасными материалами, имеющими низкую температуру вспышки. Поэтому одним из требований, предъявляемых к теплоизолирующей оболочке котла вагона-цистерны, является низкая способность к воспламенению в открытом пламени. Ее в полной мере проявляют только асбестовое волокно и войлок стеклянный, но это экологически небезопасные материалы, имею-

щие недостаточную ремонтпригодность и высокую плотность $\rho \approx 200...250 \text{ кг/м}^3$. Асбестовая теплоизолирующая оболочка толщиной 0,3 м вместе с защитным укрытием и элементами крепежа существенно увеличивает массу тары вагона-цистерны с нежелательным ростом нагрузки на оси колесных пар [2].

По этим и другим причинам парк вагонов-цистерн-термосов очень мал, его доля в общем парке вагонов-цистерн РФ не превышает 2 %, и этот парк не способен обеспечить необходимый объем перевозок вязких нефтегрузов [3, 4].

Поэтому целесообразно рассмотрение новых методов перевозки ВНГ, при которых сохраняется внутренняя теплота транспортируемых продуктов. Первый из этих, нетрадиционных подходов подразумевает рациональное использование физических свойств нефтепродуктов. Они, во-первых, позволяют значительно снизить темп охлаждения ВНГ при перевозках в вагоне-цистерне и, во-вторых, создать тепловую изоляцию на внутренней поверхности котла вагона-цистерны из самого перевозимого нефтегруза. Этими свойствами практически всех темных нефтепродуктов являются следующие:

высокий коэффициент объемного теплового расширения $\beta = 9,4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (лишь в 3,8 раза меньший, чем у воздуха);

низкая молекулярная теплопроводность $\lambda_{\text{ж}} = 0,12 \text{ Вт/ м }^\circ\text{C}$ (лишь в 2,3 раза большая, чем у асбестового волокна).

С целью оценки эффективности подхода к подобным техническим решениям разработаны различные математические модели процесса охлаждения ВНГ [5, 6].

Задача по снижению температуры перевозимого нефтепродукта в вагоне-цистерне, не имеющем внутри источника теплоты, математически выражается уравнением нестационарной теплопроводности Фурье – Кирхгофа, которое следует рассматривать в цилиндрических координатах. Распределение температур в загустевшей массе, которая начинает расти слоем, образующимся на стенке котла, имеющим большой ($\approx 1,5 \text{ м}$) радиус кривизны, можно рассматривать из того же уравнения, но записанного в декартовых координатах. Как в первом, так и во втором случае тепловая задача рассматривается как одномерная:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $a = 7 \times 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ – температуропроводность нефтепродукта, ее можно считать постоянной и для жидкой, и для загустевшей фракций ВНГ.

Уравнение (1) рассматривалось как для начальных, так и для граничных условий:

$$t|_{\tau=0} = t_0; \quad (3)$$

а) условия на оси котла вагона-цистерны:

$$-\lambda_{\text{ж}} \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad (4)$$

б) условия на поверхности котла вагона-цистерны:

$$-e_k * \lambda_{\text{ж}} \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R} = k_{\Sigma} (t_{\text{ст}} - t_{\text{г}}) \Big|_{r=R+\delta_{\text{ст}}}. \quad (5)$$

Здесь k_{Σ} – коэффициент теплопередачи окружающей среде через поверхность стенки котла вагона-цистерны, $\text{Вт/ м}^2 \text{ }^\circ\text{C}$; e_k – коэффициент конвекции жидкого нефтепродукта, который при наливке в котел вагона-цистерны имеет высокую температуру и малую вязкость.

В этих условиях на режим охлаждения котла вагона-цистерны в значительной степени влияет естественная конвекция на его холодных стенках. Вводится понятие эквивалентной

теплопроводности жидкости, заполняющей сосуд, которой учитывается конвективный теплоперенос. Отношение эквивалентной теплопроводности движущейся жидкости к ее молекулярной теплопроводности и будет коэффициентом конвекции e_k .

В приближенных расчетах эту величину находят из критериального уравнения [13]:

$$e_k = \frac{\lambda_{\text{экв}}}{\lambda_{\text{ж}}} = 0,18 Ra^{0,25}, \quad (6)$$

где Ra – критерий Рэлея – безразмерный комплекс, образуемый следующими величинами: β – коэффициент объемного теплового расширения жидкости 1/град; g – ускорение свободного падения м/с²; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости м²/с; a – коэффициент температуропроводности жидкости м²/с; l – характерный линейный размер сосуда, заполненного жидкостью, м; Δt – характерный перепад температур, град.,

$$Ra = g \beta \Delta t \frac{l^3}{\nu \cdot a}. \quad (7)$$

В рассматриваемой задаче охлаждения ВНГ при перевозках за l можно принять диаметр котла вагона-цистерны, а за характерный перепад температур в массе нефтепродукта – их разницу в верхней и нижней частях котла вагона-цистерны. Эта величина зависит от температуры окружающей среды и должна определяться после обобщения натуральных экспериментов. Имеющийся у авторов материал позволяет оценить ее как величину, находящуюся в интервале $\Delta t = 4,5 - 6$ °С.

При расчете по формуле (7) используем для таких ВНГ, как мазуты М40 и М100, значения чисел Рэлея в области $Ra = 3 \cdot 10^{10} - 10^{11}$. При этом коэффициент конвекции e_k составляет ≈ 70 , т. е. эквивалентная теплопроводность ВНГ $\lambda_{\text{экв}} \approx 8,5$ Вт/м град. Даже некоторые металлы (ртуть, свинец) имеют не очень близкие, но все-таки одного порядка значения молекулярной теплопроводности. Большой коэффициент конвекции $e_k \approx 70$ характерен для пристеночной области нефтепродукта в вагоне-цистерне.

Наибольшая скорость циркуляционного движения ВНГ наблюдается в пограничном слое, примыкающем к «вертикальному участку» стенки котла, длиной l около 1,5 м, где она достигает $u \approx 0,23$ м/с. Затем, по мере удаления от стенки, она снижается до нуля на расстоянии около 0,4 м. Далее, ближе к оси котла, наблюдается «неподвижное ядро» жидкости, а за ним – восходящие токи. Последние замыкают ток течения горячей жидкости, происходящий при ее естественной конвекции на холодных стенках котла вагона-цистерны.

Пока существует естественная конвекция, холодная стенка котла омывается горячим движущимся жидким нефтепродуктом и тот быстро охлаждается во всем объеме котла вагона-цистерны. Конвективный теплоперенос в десятки раз превышает перенос теплоты молекулярной теплопроводностью.

Для решения задачи охлаждения ВНГ в котле вагона-цистерны использовался метод конечных элементов, а именно пакет программного обеспечения ANSYSR 18.2. Результаты тепловых расчетов были получены с применением конечно-разностного аналога дифференциальных уравнений теплопроводности и краевых условий к ним, реализованных в программе для ЭВМ, написанной на языке FORTRAN в стандарте 77 (оболочка FPS-1.0).

Начальная температура (температура налива) нефтепродукта принималась в диапазоне $t_0 = +70 \dots +100$ °С, температура окружающей среды (воздуха) – в диапазоне $t_g = -20 \dots -40$ °С; стенка котла вагона-цистерны однослойная, стальная. Нефтепродукт считался неподвижной средой ($\varepsilon_k = 1$) или в состоянии движения в ползущем режиме течения ($\varepsilon_k = 4$).

Ползущий режим течения отвечает слабому конвективному движению, им можно моделировать смешанную естественно-вынужденную конвекцию. Первая возникает на холодных стенках котла вагона-цистерны, вторая связана с колебаниями движущегося вагона, вызывающими образование волн на поверхности перевозимого нефтепродукта.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На рисунке 1 показано распределение температур в массе мазута М100, перевозимого в нефтебензиновом вагоне-цистерне общего назначения без тепловой изоляции стенок котла, при температуре воздуха $t_g = -20\text{ }^\circ\text{C}$, начальная температура мазута низкая – $t_0 = +50\text{ }^\circ\text{C}$.

Видно, что через 18 ч охладился слой мазута, прилегающий к стенкам котла вагона-цистерны (выделено синим и голубым цветами). При отрицательных температурах этот слой можно рассматривать как теплоизолирующую оболочку внутреннего объема котла. Около 85 % нефтепродукта сохраняет высокую температуру, близкую к нормативной для обеспечения слива самотеком (выделено красным, бежевым, желтым и зеленым цветами).

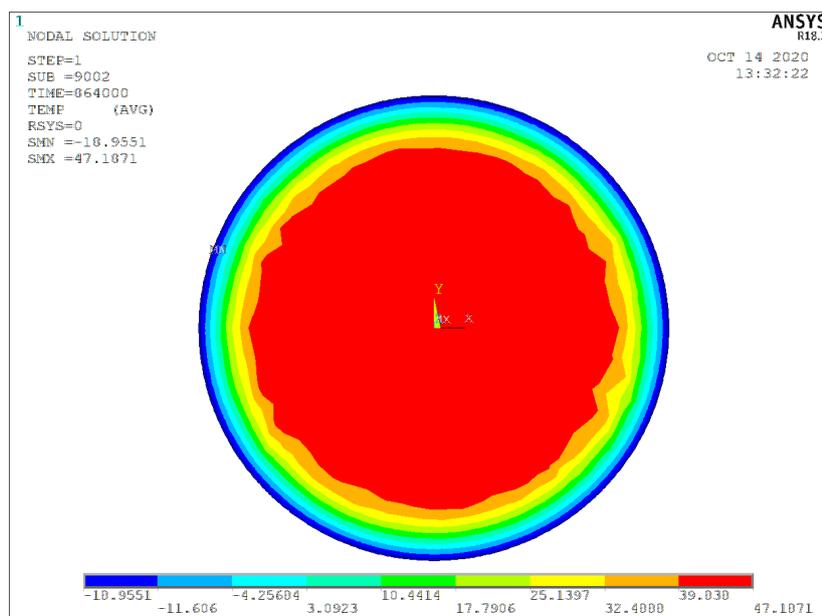


Рисунок 1 – Распределение температур по сечению котла вагона-цистерны без теплоизолирующей оболочки (мазут М40 в стратифицированном состоянии, температура воздуха $t_g = -20\text{ }^\circ\text{C}$, начальная температура нефтепродукта $t_0 = +50\text{ }^\circ\text{C}$, время охлаждения 18 ч)

Подразумевалось, что неподвижное или слабо циркулирующее состояние горячего нефтепродукта задается на стадии его налива в горячем виде в котел вагона-цистерны.

Нефтепродукт принудительно переводится в гидродинамически устойчивое стратифицированное состояние, при котором его плотность в верхней части котла существенно (на 5 – 10 %) ниже, чем в нижней его части.

Это состояние сравнительно легко обеспечить, создав вертикальный градиент температур, направленный снизу вверх. На более горячие слои жидкости в верхней части котла вагона-цистерны не будет действовать сила Архимеда, являющаяся причиной естественной конвекции. Конвективный теплоперенос в массе нефтепродукта сойдет на нет, и он будет охлаждаться только за счет молекулярной теплопроводности, которая как отмечалось выше, очень мала.

На рисунке 2 показано расчетное изменение со временем температуры мазута М40, находящегося в стратифицированном состоянии в зоне сливного прибора вагона-цистерны без наружной теплоизолирующей оболочки стенок котла. Видно, что через 42 ч (150000 с) температура мазута осталась достаточно высокой для обеспечения возможности выгрузки самотеком.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

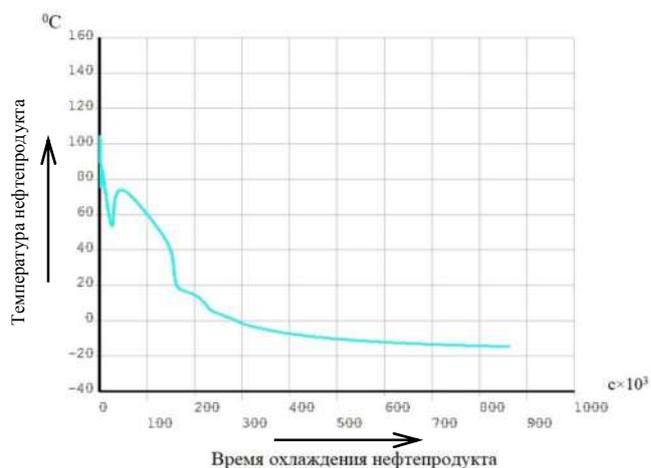
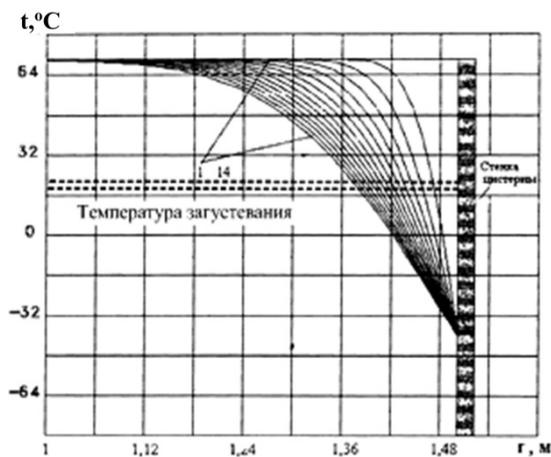


Рисунок 2 – Охлаждение со временем мазута М40 в нижней части котла вагона-цистерны (начальная температура мазута $t_0 = +100^\circ\text{C}$, температура воздуха $t_g = -20^\circ\text{C}$); на оси абсцисс обозначено время охлаждения τ , с, на оси ординат – температура мазута t , $^\circ\text{C}$

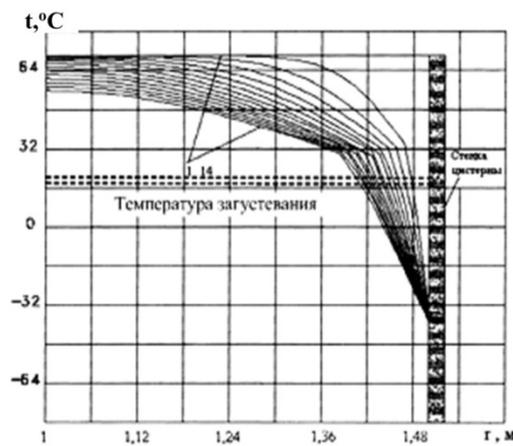
12 ч охлаждения, линия 2 – через 24 ч и т. д. Линия 14 характеризует распределение температур через 7 суток охлаждения. На рисунке 3, а представлено распределение температур в неподвижном продукте (модель квазитвердого тела), а на рисунке 3, б – распределение температур в слабо циркулирующем первоначально стратифицированном продукте при коэффициенте конвекции $\epsilon_k = 4$.

Из приведенных на рисунке 3 кривых можно сделать вывод о том, что начальная стратификация горячего мазута обеспечивает его медленное охлаждение и частичное затвердевание с образованием теплоизолирующего слоя из затвердевшего мазута. Толщина затвердевшего слоя – около 10 см, основная же масса нефтегруза сохраняет высокую температуру и достаточную текучесть.



а

Неподвижный нефтегруз $\epsilon_k = 1$



б

Ползущее течение нефтегруза $\epsilon_k = 4$

Рисунок 3 – Изменение распределения температур мазута по радиусу котла вагона-цистерны со временем охлаждения в интервале $0 < \tau < 32$ ч: а – неподвижный нефтегруз; б – слабо циркулирующий нефтегруз (исходная температура $T_0 = +70^\circ\text{C}$, температура воздуха -40°C)

Теоретические основы теплового расчета вязкой жидкости в сосуде при понижении ее среднemasовой температуры до порога температуры ее загустевания-затвердевания изложены в монографии [7], их принято описывать с позиций классической задачи Стефана [8].

Но для ВНГ этот подход является очень упрощенным. Вязкие нефтепродукты при загустевании превращаются в реологическую жидкость, у которой нет четкой границы раздела между жидкой и твердой фазами. В ее отсутствие нельзя указать и местоположение источников теплоты фазового перехода. Математическая модель процесса охлаждения перевозимого нефтегруза в вагоне-цистерне используется только в «нулевом приближении», где ВНГ условно рассматривается как неподвижная среда.

В источнике [9] изменение температуры ВНГ со временем τ описывается формулой, предложенной советским ученым Шуховым:

$$\frac{T_{sm} - T_h}{T_{sm}^{нач} - T_h} = \exp\left(-\frac{k F}{M_g c_g} \cdot \tau\right), \quad (8)$$

где T_{sm} – среднемассовая температура нефтегруза в жидкой фазе, К; $T_{sm}^{нач}$ – начальное значение среднемассовой температуры нефтегруза в жидкой фазе, К; T_h – температура воздуха окружающей среды, К; k – коэффициент теплопередачи, принимаемый постоянным по времени, Вт/(м²·К); F – площадь теплопередающей поверхности котла вагона-цистерны, м²; M_g, c_g – масса и удельная теплоемкость нефтегруза в жидкой фазе, кг, Дж/(кг·К).

При определении среднемассовой температуры ВНГ с помощью выражения (8) можно получить результат, носящий только оценочный характер. Прежде всего в равенстве (8) остается неизвестным коэффициент теплопередачи k . Он изменяется и вдоль поверхности котла, и по мере изменения скорости ветра, и с изменением воздействия таких внешних факторов, как солнечная радиация и атмосферные осадки. В условиях солнечной радиации верхняя часть котла вагона-цистерны получает достаточно мощный приток теплоты, а в условиях атмосферных осадков она, наоборот, охлаждается значительно быстрее, чем нижняя часть котла.

Во-вторых, остается неизвестным и распределение коэффициента теплоотдачи от циркулирующего к стенкам котла нефтепродукта.

Построение двумерной модели процесса остывания жидкого нефтепродукта в железнодорожной цистерне с переменной границей затвердевания предпринято в статье [10], однако использование данной математической модели в инженерных расчетах затруднительно ввиду сложности алгоритма расчета.

В работе [11] рассмотрен вариант упрощенного описания расчета процесса охлаждения мазута при транспортировке в вагоне-цистерне в условиях отрицательных температур воздуха. Описываемый вариант решает вопрос построения математической модели охлаждения жидкого нефтегруза в котле вагона-цистерны с использованием полуэмпирического уравнения для изменяющегося со временем коэффициента теплоотдачи. Выбирались из лучшей вариативности итогов эксперимента и расчета эмпирические коэффициенты:

$$\alpha_g(\tau) = \alpha_g \cdot 0,7 \cdot \frac{\left(\frac{T_{sm}^{нач}}{T_{gg}}\right)^5 \cdot \left[1 - \left(\frac{T_{gk}}{T_{sm}}\right)^3\right]}{\left[1 - \left(\frac{T_{gk}}{T_{sm}}\right)^3\right] \cdot \left(\frac{T_{gk}}{T_h}\right)^3}, \quad (9)$$

где α_g – коэффициент теплоотдачи жидкой фракции ВНГ в пристеночной зоне котла вагона-цистерны при среднемассовой температуре нефтегруза $T_{sm} > T_{gg}$, Вт/(м²·К); $T_{sm}^{нач}$ – температура нефтепродукта в жидкой фазе при наливе в котле вагона-цистерны, К; T_h – температура окружающей среды.

Коэффициент теплоотдачи нефтегруза в жидкой фазе в пристеночной зоне котла вагона-цистерны в диапазоне температур T_{sm} от $T_{sm}^{нач}$ до T_{gg} вычисляется для условий свободной конвекции согласно рекомендациям работы [12].

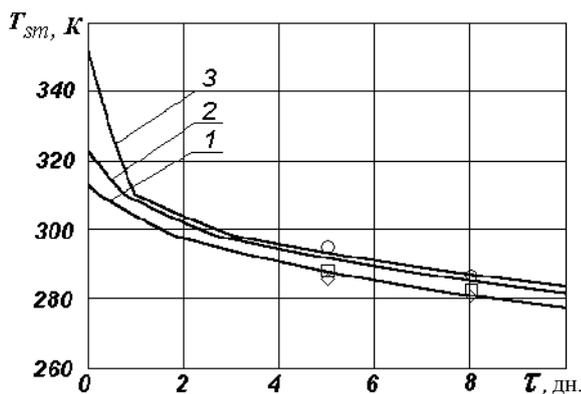
$$\alpha_g = 0,184 \cdot \frac{\lambda_g}{2R_k} \left[\frac{\rho_g^2 g \beta_t c_g |T_k - T_{sm}|}{\lambda_g \mu_g} \right]^{0,33}, \quad (10)$$

где λ_g – коэффициент теплопроводности нефтегруза (мазута), Вт/(м·К); R_k – радиус котла вагона-цистерны, м; ρ_g – плотность нефтегруза (мазута), кг/м³; $g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения; β_t – коэффициент температурного расширения нефтегруза (мазута), 1/К; c_g – теплоемкость нефтегруза (мазута), Дж/К; T_k – температура стенки котла вагона-цистерны, К; μ_g – коэффициент динамической вязкости нефтегруза (мазута), Н·с/м².

При определении температуры у пристеночной области котла вагона-цистерны T_k она примерно приравнивалась к полусумме температуры воздуха T_h и среднemasсовой температуры нефтегруза T_{sm} .

Результаты расчетов можно увидеть на рисунке 4, а и б в виде кривых 1 – 3. По описанной методике в зависимости от исходной температуры нефтегруза рассчитывается среднemasсовая температура транспортируемого в вагоне-цистерне мазута. Результаты расчетов [9] показаны для двух интервалов времени транспортировки – пять и восемь суток.

Расчеты проводились для мазута марки М40, у которого температура застывания находится в интервале от +25 °С (начальная стадия застывания-затвердевания) до +10 °С (конечная стадии – полное затвердевание), транспортируемого в четырехосном вагоне-цистерне.



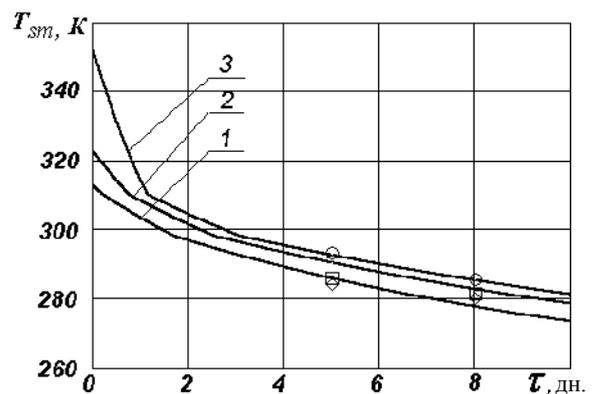
— — расчет при $T_h = 263$ К (–10 °С);

1, \diamond – $T_{sm}^{нач} = 313$ К (40 °С);

2, \square – $T_{sm}^{нач} = 323$ К (50 °С);

3, \circ – $T_{sm}^{нач} = 353$ К (80 °С)

а



— — расчет при $T_h = 253$ К (–20 °С);

1, \diamond – $T_{sm}^{нач} = 313$ К (40 °С);

2, \square – $T_{sm}^{нач} = 323$ К (50 °С);

3, \circ – $T_{sm}^{нач} = 353$ К (80 °С)

б

Рисунок 4 – Сравнение полученных расчетных итогов и опытных данных работы:
а – расчет при $T_h = 263$ К (–10 °С); б – расчет при $T_h = 253$ К (–20 °С)

Исходя из данных, показанных на рисунке 4, можно сказать, что результаты расчетов близки к данным экспериментов, при этом среднеквадратическое отклонение абсолютной температуры нефтегруза в жидком состоянии составляет 8 %.

На основе изложенного можно сделать выводы.

Перспективы развития железнодорожной транспортной системы в целом и, в частности, повышение рентабельности перевозок вязких наливных грузов направлены на сокращение среднего времени оборота подвижного состава (вагонов-цистерн). В это время входит и простой вагонов под сливом, проводимым с разогревом нефтегруза для восстановления его текучести. Предложенные варианты тепловых расчетов способствуют решению этого направ-

ления путем сокращения времени, затрачиваемого на операции разгрузочного цикла. Была показана возможность резкого снижения темпа охлаждения нефтепродукта за счет перевода его в стратифицированное состояние при наливе в котел вагона-цистерны.

Для второго варианта предложена математическая модель застывания транспортируемого жидкого нефтепродукта. Модель основана на полуэмпирическом уравнении для коэффициента теплоотдачи нефтепродукта в жидком состоянии, эмпирические коэффициенты приведены из лучшей вариативности итогов расчета и данных эксперимента, среднеквадратическое отклонение абсолютной температуры жидкого нефтепродукта составило 8 %.

Список литературы

1. Жебанов, А. В. Сохранение теплофизических свойств перевозимых в вагонах-цистернах нефтепродуктов при переводе их в стратифицированное состояние / А. В. Жебанов, В. И. Моисеев. – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту. – 2017. – № 1. – С. 27 – 29.

2. Жебанов, А. В. Полный цикл работы цистерны с теплоизоляцией: от нанесения покрытия до утилизации / А. В. Жебанов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2011. – № 1(28). – С. 51 – 54.

3. Патент № 129188 Российская Федерация, МПК F16L59/06, B82Y99/00. Теплоизоляционное изделие : № 2012155384/06 : заявлено 19.12.2012 : опубликовано 20.06.2013 / Балалаев А. Н., Мокшанов А. С. – 5 с. – Текст : непосредственный.

4. Патент № 182602 Российская Федерация, МПК B65D 88/00. Цистерна для перевозки вязких продуктов : № 2018104341: заявлено 05.02.2018 : опубликовано 23.08.2018 / Балалаев А. Н., Паренюк М. А., Жебанов А. В., Ананников И. О. – 8 с. – Текст : непосредственный.

5. Жебанов, А. В. Пути снижения теплотеря вязких нефтегрузов при транспортировке железнодорожным транспортом / А. В. Жебанов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 3 (27). – С. 31 – 38.

6. Исследование твердотельной модели котла цистерны с кожухом из вакуумных теплоизоляционных панелей / А. Н. Балалаев, А. В. Жебанов, М. А. Паренюк, М. А. Спириугова. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 3 (63). – С. 21 – 31.

7. Балалаев, А. Н. Моделирование газодинамических аппаратов и теплотехнических процессов железнодорожного транспорта : монография / А. Н. Балалаев. – Самара : Самарская гос. академия путей сообщения, 2004. – 192 с. – Текст : непосредственный.

8. Гудмен, Т. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена / Т. Гудмен. – Текст : непосредственный // Проблемы теплообмена : сборник статей. – Пер. с англ. под ред. П. Л. Кириллова. – Москва : Атомиздат, 1967. – С. 41 – 96.

9. Железнодорожная климатология / под ред. проф. Б. Д. Фишбеина. – Самара : Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2007. – 508 с. – Текст : непосредственный.

10. Балалаев, А. Н. Уточненный расчет охлаждения мазута при перевозке железнодорожными цистернами в зимнее время / А. Н. Балалаев, А. С. Летов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы развития транспортного комплекса : материалы всерос. науч.-практ. конф. – Самара : Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – С. 61 – 64.

11. Балалаев, А. Н. Упрощенный метод расчета охлаждения мазута при перевозке железнодорожными цистернами в зимнее время / А. Н. Балалаев, А. С. Летов. – Текст : непосредственный // Вестник РГУПС. – 2009. – № 3. – С. 10 – 15.

12. Карминский, В. Д. Техническая термодинамика и теплопередача : курс лекций / В. Д. Карминский. – Москва : Маршрут, 2005. – 224 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Zhebanov A. V., Moiseev V. I. Preservation of thermophysical properties of petroleum products transported in tank cars when transferring them to a stratified state [Sokhranenie teplofizi-

cheskikh svoystv perevozimykh v vagonakh-tsisternakh nefteproduktov pri perevode ikh v stratifikirovannoe sostoianie]. *Nauka i obrazovanie transportu – Science and Education of transport*, 2017, no. 1, pp. 27 – 29.

2. Zhebanov A. V. The full cycle of operation of a tank with thermal insulation: from coating to disposal [Polnyi tsikl raboty tsisterny s teploizolatsiei: ot naneseniia pokrytiia do utilizatsii]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2011, no. 1 (28), pp. 51 – 54.

3. Balalaev A. N., Mokshanov A. S. *Patent RU 129188*, 20.06.2013.

4. Balalaev A. N., Pareniuk M. A., Zhebanov A. V., Anannikov I. O. *Patent RU 182602*, 23.08.2018.

5. Zhebanov A. V. Ways to reduce heat loss of viscous oil and gas cargoes during transportation by rail [Puti snizheniia teplopoter' viazkiikh neftegruzov pri transportirovke zheleznodorozhnym transportom]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 3 (27), pp. 31 – 38.

6. Balalaev A. N., Zhebanov A. V., Pareniuk M. A., Spiryugova M. A. Research of a solid-state model of a tank boiler with a casing made of vacuum heat-insulating panels [Issledovanie tverdotel'noi modeli kotla tsisterny s kozhukhom iz vakuumnnykh teplo-izolatsionnykh panelei]. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of Transport of the Volga Region*, 2017, no. 3 (63), pp. 21 – 31.

7. Balalaev A. N. *Modelirovanie gazodinamicheskikh apparatov i teplotekhnicheskikh protsessov zheleznodorozhnogo transporta: monografiia* (Modeling of gas-dynamic apparatuses and heat-engineering processes of railway transport: monograph). Samara: Samara State Transport University Publ., 2004, 192 p.

8. Gudmen T. Application of integral methods in nonlinear problems of non-stationary heat transfer [Primenenie integral'nykh metodov v nelineinykh zadachakh nestatsionarnogo teploobmena]. *Problemy teploobmena – Problems of heat transfer*. Moscow: Atomizdat Publ, 1967, pp. 143 – 177.

9. Fishbein B. D., Bondarenko A. A. et al. *Zheleznodorozhnaia klimatologiya* (Railway climatology). Samara : Samara State Transport University Publ., 2007, 508 p.

10. Balalaev A. N., Letov A. S. Refined calculation of fuel oil cooling during transportation by railway tanks in winter [Utochnennyi raschet okhlazhdeniia mazuta pri perezovke zheleznodorozhnymi tsisternami v zimnee vremia]. *Aktual'nye problemy razvitiia transportnogo kompleksa: materialy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Actual problems of transport complex development: materials of the All-Russian scientific and practical conference). – Samara, 2009. – pp. 61 – 64.

11. Balalaev A. N., Letov A. S. Simplified method for calculating the cooling of fuel oil during transportation by railway tanks in winter [Uproshchennyi metod rascheta okhlazhdeniia mazuta pri perezovke zheleznodorozhnymi tsisternami v zimnee vremia]. *Vestnik RGUPSa – Bulletin of the RSTU*, 2009, no. 3, pp. 10 – 14.

12. Karminsky V. D. *Tekhnicheskaiia termodinamika i teploperedacha: kurs lektsii* (Technical thermodynamics and heat transfer: a course of lectures). Moscow: Marshrut Publ., 2005, 224 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Моисеев Владимир Иванович

Петербургский государственный университет
пути сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031,
Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Математика и моделирование», ПГУПС.

Тел.: +7 911-122-51-00.

E-mail: moiseev_v_i@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Moiseev Vladimir Ivanovich

Saint-Petersburg State Transport University
Imperator Alexander I (SSTU).

Moscow Ave, 9, St. Petersburg, 190031, the Russian
Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the
department «Mathematical simulation», SSTU.

Phone: +7 911-122-51-00.

E-mail: moiseev_v_i@list.ru

Жебанов Александр Владимирович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., д. 2 в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны», СамГУПС.

Тел.: +7 927-000-68-73.

E-mail: zhebanov@inbox.ru

Zhebanov Alexander Vladimirovich

Samara State University of Transport (SSUT).

2 V Svoboda st., Samara, 443066, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Wagons», SSTU.

Тел.: +7 927-000-68-73.

E-mail: zhebanov@inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Моисеев, В. И. Расчет тепловой модели вагон-цистерны для перевозки нефтепродуктов / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 85 – 95.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Moiseev V. I., Zhebanov A. V. Calculation of the thermal model of a wagon-tank for the transportation of petroleum products. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 1 (45), pp. 85 – 95 (In Russian).

УДК 621.333

В. Д. Шестакова, П. Ю. Иванов, В. Н. Иванов

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЗОВ

Аннотация. В настоящее время тяговый электродвигатель (ТЭД) является одним из наиболее ответственных элементов конструкции подвижного состава, поскольку от его бесперебойной работы зависят безопасность и стабильность обеспечения перевозочного процесса на сети железных дорог компании ОАО «РЖД». В данной статье приведен детальный анализ отказов ТЭД тепловозов серии 2,3ТЭ10 в/и приписного парка локомотивного депо Новая Чара Восточно-Сибирской дирекции тяги. Участок обращения тепловозов от станции Таксимо до станции Хани является одним из сложнейших не только в границах Восточно-Сибирской железной дороги, но и всей сети железных дорог страны. Анализ статистики причин отказов ТЭД тепловозов локомотивного депо Новая Чара за 2006 – 2012 гг. показал, что имеет место достаточно экстремальный режим эксплуатации и что большая часть отказов приходится на пробой изоляции якорной обмотки ТЭД. Во время исследовательской поездки на полигоне обслуживания тепловозов коллективом ученых ИрГУПС были проведены натурные замеры скорости движения, режима ведения поезда, температуры нагрева ТЭД, учтены климатические факторы – температура окружающей среды, относительная влажность, давление и др. После исследований имеющейся информации было предложено дополнительно покрывать изоляцию лаком ФЛ-98 с целью поддержания и восстановления ее свойств в условиях локомотивного депо Зима при проведении ТР-3.

В ИрГУПСе продолжительное время ведутся работы по исследованию процесса сушки изоляции с помощью инфракрасного излучения (ИК). Эффективность данного способа доказана многочисленными экспериментальными исследованиями. По данной тематике уже проведены несколько защит кандидатских диссертаций в различных диссертационных советах. В данной статье представлена также статистика отказов эксплуатируемых ТЭД уже с дополнительной пропитанной лаком изоляцией открытых лобовых частей после внедрения мероприятий по итогам работы группы ученых ИрГУПС. Установлено, что метод нанесения компаунда на изоляцию лобовой части обмоток электрических машин и капсулирования его с помощью энергии ИК-излучения является эффективным в борьбе с отказами ТЭД вследствие пробоя изоляции.

Ключевые слова: тяговый двигатель, надежность, тепловоз, долговечность, железная дорога, изоляция.

Valeriya D. Shestakova, Pavel Y. Ivanov, Vladimir N. Ivanov

Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

ON THE ISSUE OF IMPROVING THE RELIABILITY AND DURABILITY OF TRACTION ELECTRIC MOTORS OF DIESEL LOCOMOTIVES

Abstract. *At this time the traction electric motor (TEM) is one of the most important elements of the design of rolling stock, since the safety and stability of the transportation process on the railway network of JSC "Russian Railways" depends on its uninterrupted operation. This article is given a detailed analysis of the TEM failures of diesel locomotives of the 2,3TE10 v / series and the assigned fleet of the Novaya Chara locomotive depot of the East Siberian Traction Directorate. The section of circulation of diesel locomotives from Taksim station to Hani station is one of the most difficult not only in the borders*

The East Siberian Railway, but also the entire railway network of the country. The analysis of the statistics of the reasons for the failures of the TEM of locomotives of the Novaya Chara locomotive depot for 2006 – 2012 showed that there is a rather extreme operation mode and that most of the failures are due to the breakdown of the insulation of the anchor winding of the TEM. During a research trip to the diesel locomotive maintenance site, a team of IRGUPSA scientists conducted full-scale measurements speed of movement, driving mode of the train, heating temperature of the TEM, taken into account the climate factors – ambient temperature, relative humidity, pressure and others. After studying the available information, it was proposed to additionally coat the insulation with FL-98 varnish in order to maintain and restore its properties in the conditions of the Winter locomotive depot during TR-3.

IRGUPS has been working for a long time to study the process of drying insulation using infrared radiation (IR). The effectiveness of this method has been proven by numerous experimental studies. Several PhD theses have already been defended in various dissertation councils on this topic. This article presents also the statistics of failures of operated TEM already with additional varnish-impregnated insulation of open frontal parts after the implementation of measures based on the results of the work of the IRGUPS group of scientists. It is established that the method of applying the compound to the insulation of the frontal part of the windings of electric machines and encapsulating it with the help of IR radiation energy is effective in combating TEM failures due to insulation breakdown.

Keywords: *traction motor, reliability, diesel locomotive, durability, railway, insulation.*

Одной из важнейших проблем Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД) на стыке с Дальневосточной железной дорогой является необходимость обеспечения надежной работы тягового подвижного состава. На протяжении последних 15 лет приписной парк тепловозов серии 2,3ТЭ10в/и остается практически прежним. При этом за счет проведения модернизации в условиях Уссурийского локомотиворемонтного завода тепловозный парк локомотивного депо Новая Чара переходит на более экономичные дизели Д49.

Исходя из анализа надежности тягового подвижного состава для локомотивного депо Новая Чара электрические двигатели по-прежнему являются основным повреждаемым узлом [1, 2]. Данный анализ показал, что на долю тяговых электрических двигателей приходится до одной трети всех отказов технических средств, допущенных в процессе эксплуатации на участке обращения Таксимо – Новая Чара – Хани. Масса поездов на этом участке составляет до 5800 т. При этом климатические условия, такие как наличие снежного покрова практически восемь месяцев, повышенное атмосферное давление, высокая относительная влажность, экстремально низкие температуры, накладываются на неблагоприятный профиль с применением тепловозов подталкивающего движения на затяжных участках и усугубляют техническое состояние не только всего тепловоза, но и состояние изоляции кабельной продукции и электрических машин в целом. Перенос тепла и влаги в ТЭД происходит постоянно. При любом изменении режимов работы тепловоза и параметров окружающей среды термодинамическое равновесие нарушается и изоляция ТЭД переходит к новому равновесному состоянию, обмениваясь с атмосферой влагой и теплом. Наиболее перспективными методами управления температурно-влажностными режимами следует считать такие методы, которые будут адаптироваться к микроклиматическим условиям эксплуатации тепловоза и режимам его нагрузки. С учетом заранее не известных параметров окружающей среды и тепловоза они должны осуществлять управление тепловлагообменными процессами. Изоляция обмоток ТЭД представляет собой капиллярно-пористую коллоидную систему, реагирующую на ма-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

лейшие изменения влажности и температуры атмосферы посредством ответного изменения комплекса своих свойств. Эти изменения пропорциональны приложенному воздействию, т. е. степени изменения внутренней и внешней среды. Более значительное влияние на величину изменения свойств изоляции обмоток оказывает интенсивность процессов переноса тепла и влаги в изоляции [3]. Диэлектрические свойства существенно понижаются при повышении интенсивности переноса тепла и влаги. При отсутствии таких систем возникают необходимость и целесообразность в проведении дополнительных пропиточно-сушильных мероприятий для изоляции ТЭД.

Руководством ВСЖД для повышения пропускной способности БАМа перед отраслевым институтом – ИрГУПСом – была поставлена задача определить проблемные места в технологическом процессе эксплуатации тепловозов. Учеными и аспирантами кафедры «Электроподвижной состав» ИрГУПСа по согласованию с руководством службы локомотивного хозяйства ВСЖД летом 2006 г. выполнена экспериментальная поездка по участку Таксимо – Новая Чара – Хани. Основной целью проведения испытания было определение причин массового выхода из строя тяговых двигателей магистральных тепловозов.

По итогам проведения испытаний осуществлена фиксация скорости движения, режима ведения поезда, температуры нагрева ТЭД, климатических факторов (температура окружающей среды, относительная влажность, давление) и других факторов. Коллективом ученых ИрГУПСа были предложены мероприятия для поддержания и восстановления покрывного слоя изоляции якорей ТЭД типа ЭД118Б в условиях базового локомотивного депо Зима при проведении ТР-3 и формировании рекомендаций для локомотивного депо Новая Чара производить их обязательную пропитку лаком ФЛ-98 и сушку в сушильных камерах. Результаты работы по намеченным мероприятиям отображены в таблице 1 в столбцах с 2006 по 2009 г.

Таблица 1 – Причины отказов ТЭД тепловозов депо Новая Чара в период 2006 – 2012 гг.

Новая Чара – отказ ТЭД	Год						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Р изоляции обмотки якоря 0	105	98	79	60	99	143	151
в т. ч. из-за попадания масла и воды	8	4	10	7	1	19	31
в т. ч. пропитанные		8	16	9			
Р изоляции обмотки возбуждения 0	35	12	24	34	10	19	61
в т. ч. пропитанные		3	5	5			
Разрушение, заклинивание моторно-якорных подшипников (МЯПов)	17	7	11	25	6	7	9
Межвитковое замыкание	0	1	0	5	3	2	4
в т. ч. пропитанные							
Размотка банджа якоря	11	15	12	11	12	20	23
в т. ч. пропитанные		1	0	3			
Отгар кабелей, неисправности ТЭД и щеткодержателей	25	20	24	14	11	30	19
Задир коллектора	11	5	6	8	3	3	4
Переброс по коллектору	0	6	2	0	0	2	1
Шестерня			0	3			
Прочие неисправности ТЭД	5	17	15	6	1	8	18
в т. ч. пропитанные			4	1			
Итого	209	181	173	163	145	234	290

С целью мониторинга эффективности предложенных рекомендаций был проведен анализ надежности ТЭД типа ЭД118Б эксплуатируемых тепловозов 3ТЭ10у и 3ТЭ10м грузового движения. При проведении анализа были использованы статистические данные об отказах оборудования за период с 2006 по 2012 г., представленные отделом главного технолога и группой учета цеха эксплуатации локомотивного депо Новая Чара.

Рассмотрим рисунок 1. Линия тренда (обозначенная наклонной линией) и прогрессирующая (обозначенная ломаной линией) от 80 случаев в 2006 г. до 135 случаев в 2012 г. указы-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

вадет на непосредственный рост произведенных выкаток ТЭД по причине пробоя изоляции обмоток якоря ЭД118Б при условии выполнения предложенных и применяемых мероприятий для эксплуатации в особых климатических условиях. Предлагаемые мероприятия позволили снизить непреднамеренные выкатки ТЭД. Так, в 2009 г. их число было снижено на одну треть. Тем не менее в последующие годы отмечен рост данного показателя в 2 – 2,3 раза.

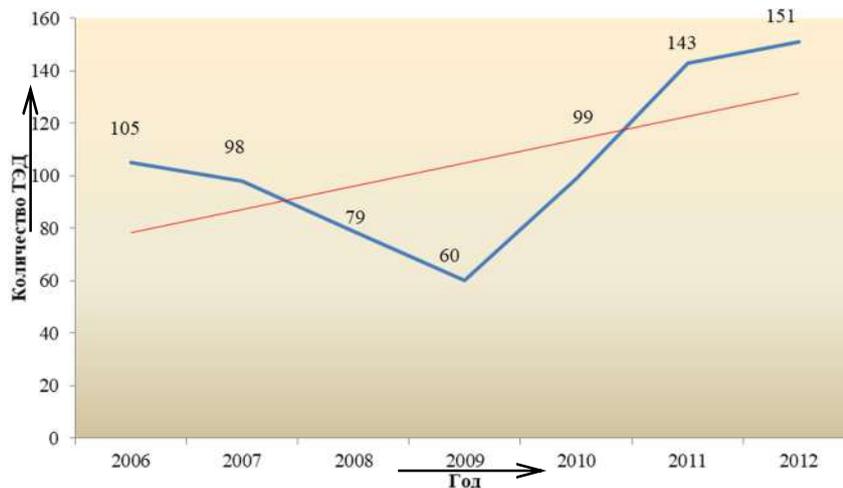


Рисунок 1 – Количество смен ТЭД по причине пробоя изоляции обмотки якоря ЭД118Б

При рассмотрении причин выкаток ТЭД из-за пробоя изоляции обмоток возбуждения, которым в свою очередь также проводили пропитку, можно отметить возрастающую тенденцию, что и отображено на рисунке 2.

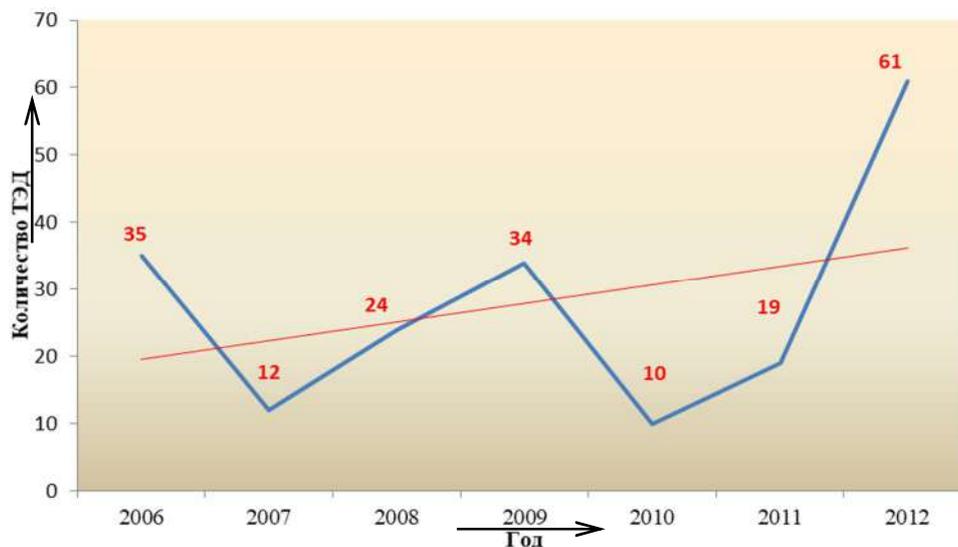


Рисунок 2 – Количество смен ТЭД по причине пробоя изоляции обмотки возбуждения ЭД118Б

Причинами увеличения случаев выхода из строя ТЭД магистральных тепловозов, эксплуатируемых на северном участке Восточно-Сибирской железной дороги, с большей степенью вероятности являются вынужденное превышение норм по пробегам тепловозов между плановыми видами ремонтов, упрощение цикловых работ по восстановлению надежности на плановых видах ремонта, эксплуатация в экстремальных климатических условиях, перенасыщенность изоляции влагой [1 – 5].

Проанализируем очередной период эксплуатации ТЭД, для якорей которых длительное время осуществляется пропитка после ТР-3 и СР в условиях сервисного локомотивного депо Зима. Необходимо отметить, что в 2020 г. произошел практически двухкратный рост количества внеплановых ремонтов ТЭД по причине выхода из строя якорной обмотки по сравнению с 2017 – 2019 гг. Аналогичные показатели отказов прослеживались и в 2014 – 2015 гг.,

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

при этом в данный период пропитка якорей на больших видах ремонта производилась еще не всем ТЭД и носила экспериментальный характер.

Таблица 2 – Причины отказов ТЭД тепловозов депо Новая Чара в период 2017 – 2020 гг.

Новая Чара – отказ ТЭД	Год			
	2017	2018	2019	2020
Сопrotивление изоляции обмотки якоря 0 в т. ч. из-за попадания масла и воды	49	49	69	142
Сопrotивление изоляции обмотки возбуждения 0	3	5	2	5
Разрушение, заклинивание моторно-якорных подшипников	10	18	8	9
Межвитковое замыкание	1	1		
Размотка бандажа якоря	4	7	1	1
Отгар кабелей, неисправности ТЭД и щеткодержателей	0	2	2	12
Задир коллектора	1			
Переброс по коллектору	1	1	7	13
Спрессовка шестерни			5	3
Прочие неисправности ТЭД	3	3		
Итого	72	86	95	183

При систематическом обновлении парка тепловозов приписки локомотивного депо Новая Чара необходимо рассмотреть возможность проведения пробной пропитки изоляции обмоток ТЭД компаундами (в сравнении с лаком ФЛ-98 компаунды практически не содержат растворителей) и сушки изоляции (запекание поверхностного слоя) с применением ИК-излучателей, позволяющим значительно сократить время на проведение ремонта в сервисном локомотивном депо [2, 7 – 9].

Для объектов, работоспособность которых может быть восстановлена после отказа [6], показатели надежности определяют по статистическим данным, полученным с помощью планов $[N, R, L_0]$; $[N, R, r]$. В качестве показателя безотказности применяют параметр потока отказов $\omega(l)$. По определению параметр потока отказов $\omega(l)$ есть среднее число отказов локомотива (или его элементов) за единицу пробега, взятое для рассматриваемого пробега l .

Для расчета оценки $\omega(l)$ по статистическим данным применяют формулу

$$\omega(l) = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \times (l + \Delta l) - \sum_{i=1}^N m_i(l)}{N \cdot \Delta l} = \frac{\Delta m}{N \Delta l}, \quad (1)$$

где $m_i(l + \Delta l)$ и $m_i(l)$ – накопленное число отказов i -го объекта за пробеги $(l + \Delta l)$ и l соответственно; Δm – число отказов всех N локомотивов за интервал пробега $\Delta l = (l + \Delta l) - l$.

Формула (1) выведена при условии, что все N локомотивов работали с момента l до $l + \Delta l$. Если в течение интервала Δl число локомотивов изменилось (уменьшилось), следует вместо $N \Delta l$ использовать суммарный пробег всех работавших локомотивов $\sum_{i=1}^{N_i} \Delta l_i$. Формула (1) преобразуется к виду:

$$\omega(l) = \Delta m \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_i} \Delta l_i}. \quad (2)$$

Выбор ширины интервала Δl определяется общей продолжительностью наблюдений, цикличностью периодов эксплуатации, видом объектов, целями анализа. При оценке влияния внешних (например, метеорологических) факторов интервал может быть выбран равным пробегу за месяц, квартал.

Исследования, представленные в монографии [6], показали, что на надежность изоляции якорей ТЭД электровозов существенное влияние оказывает величина нагрузки ТЭД.

На первом этапе исследования в качестве основных факторов, определяющих состояние изоляции обмотки якоря в эксплуатации, для анализа приняты величина нагрузки ТЭД и

температура окружающего воздуха ϑ_B . Для характеристики нагрузки ТЭД выбран коэффициент степени использования электровоза по номинальной силе тяги:

$$K_F = \frac{F_{k\text{ ср}}}{F_{k\infty}}, \quad (3)$$

где $F_{k\text{ ср}}$ – средняя реализуемая сила тяги;

$F_{k\infty}$ – сила тяги на ободе колес в длительном режиме работы электровоза.

Для проведения исследования выбран многофакторный корреляционный анализ. В результате расчета, выполненного методом четырех полей, получены три частные прямые линейные корреляции, связывающие исследуемые признаки и выраженные соответствующими уравнениями регрессии: $\omega = 5,2 K_F - 1,96$; $\omega = -0,0105 \vartheta_B + 0,229$; $K_F = -0,00193 \vartheta_B + 0,422$ с коэффициентами корреляций соответственно: $r_{\omega, K_F} = 0,72$; $r_{\omega, \vartheta_B} = -0,65$; $r_{K_F, \vartheta_B} = -0,825$. Так как эти коэффициенты по абсолютной величине во всех трех случаях больше 0,4 – 0,6, то нет необходимости применять криволинейную корреляцию.

Уравнение множественной регрессии с тремя неизвестными имеет вид:

$$\omega = AK_F + B\vartheta_B + C, \quad (4)$$

где A, B – коэффициенты множественной регрессии.

Параметр регрессии C отражает количественно влияние неучтенных при анализе факторов.

В результате расчета получена зависимость параметра потока отказов от действия принятых факторов:

$$\omega = 4,75K_F - 0,0014\vartheta_B - 1,779. \quad (5)$$

Теснота связи признака с K_F и ϑ_B оценена выборочным совокупным коэффициентом корреляции $R = 0,72$.

Частные выборочные коэффициенты корреляции соответственно таковы:

$$r_{\omega, K_F}(\vartheta_B = \text{const}) = 0,58; \quad r_{\omega, \vartheta_B}(K_F = \text{const}) = -0,06.$$

Для данного случая величины этих коэффициентов показывают, что непосредственное воздействие признака ϑ_B на ω является во много раз меньшим, чем признака K_F на ω .

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы.

1. Параметр потока отказов изоляции обмотки якоря ТЭД зависит прежде всего от степени использования электровоза.

2. Параметр потока отказов зависит от температуры окружающей среды, влияние которой выражается и непосредственно, и косвенно. Непосредственное влияние обусловлено увлажнением изоляции при больших перепадах температур, характерных для зимнего времени, косвенное – увеличением степени использования электровозов при понижении температуры.

Длительное наблюдение за работой тяговых двигателей НБ-406 показало, что параметр потока их отказов по пробую изоляции на одних участках работы электровозов больше, на других – меньше, особенно в зимний период.

Определяющими факторами с точки зрения протекания физико-химических процессов, влияющими на отказы ТЭД по пробую изоляции, являются такие.

1. Степень нагрузки по длительному току

$$x_1 = \frac{I_{\text{эф}}}{I_{\text{д}}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{эф}}$, $I_{\text{д}}$ – эффективный и длительный токи, А.

2. Степень нагрева изоляции

$$x_2 = \frac{\tau_{п.и}}{\tau_d}, \quad (7)$$

где $\tau_{п.и}$ и τ_d – температуры перегрева обмоток изоляции при текущем и длительном режимах работы электровозов, °С.

3. Пульсация температуры нагрева изоляции

$$x_3 = A \cdot f, \quad (8)$$

где A – амплитуда нагрева изоляции, °С; f – частота перепада температуры нагрева в единицу времени.

4. Показатель отстоя электровоза в нерабочем состоянии:

$$x_4 = \frac{T}{24}, \quad (9)$$

где T – время отстоя, ч.

По результатам проведения анализа статистики отказов ТЭД до пропитки изоляции лаком ФЛ-98 и после этого предлагается локальный метод компаундирования изоляции обмоток лобовых частей с использованием управляемого электромагнитного излучения, позволяющий достичь стабильной теплопроводности, высокой влаго- и термостойкости, повышения срока службы изоляции тяговых двигателей с открытыми головками секций [11]. Решение предлагаемой задачи достигается тем, что нанесение компаунда на изоляцию лобовой части обмоток электрических машин и капсулирование его с помощью энергии ИК-излучения происходит одновременно [2, 7 – 9].

Теоретическое обоснование применения ИК-излучения для восстановления изоляционных свойств открытых лобовых частей якорной обмотки ТЭД подробно изложено в работах [2, 7 – 9] и др. Сам механизм компаундирования основан на основании анализа дифференциального уравнения энергетического баланса. Такой подход был осуществлен впервые в диссертационных работах П. Д. Лебедева и А. М. Худоногова [9]. Применительно к тяговым двигателям в осциллирующих режимах ИК-энергоподвода была выполнена работа Е. М. Лыткиной [8].

Применение на практике локального метода компаундирования изоляции обмоток лобовых частей с использованием электромагнитного излучения позволяет достичь стабильной теплопроводности [11], высокой влаго- и термостойкости и, как следствие, повышения срока службы изоляции ТЭД с открытыми головками секциями якоря, что дает возможность снизить отказы, а это особенно актуально для северных участков Восточно-Сибирской железной дороги.

Список литературы

1. Иванов, П. Ю. Состояние вопроса надежности и долговечности изоляции асинхронных вспомогательных машин / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. М. Худоногов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 2 (22). – С. 2 – 6.
2. Анализ методов математического моделирования процесса капсулирования полимерной изоляции электрических машин / А. М. Худоногов, Е. М. Лыткина [и др.]. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – Иркутск : Иркутский государственный университет путей сообщения, 2016. – Т. 2. – С. 505 – 509.
3. Исмаилов, Ш. К. Кинетика процесса тепло- и влагообмена в изоляции обмоток тяговых электрических машин / Ш. К. Исмаилов, В. П. Смирнов, А. М. Худоногов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2008. – № 9. – С. 35 – 42.
4. Худоногов, А. М. Больше внимания изоляционным конструкциям двигателей / А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский, В. Н. Иванов. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2018. – № 7. – С. 36 – 37.

5. Анализ конструктивных особенностей элементов электромагнитной системы тяговых двигателей локомотивов / А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский, В. Н. Иванов, И. О. Лобыцин. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – Иркутск : Иркутский государственный университет путей сообщения, 2018. – Т. 2. – С. 351 – 355.

6. Смирнов, В. П. Непрерывный контроль температуры предельно нагруженного оборудования электровоза : монография / В. П. Смирнов. – Иркутск : Иркутский государственный университет, 2003. – 328 с. – Текст : непосредственный.

7. Инновационные технологии повышения надежности электрических машин / А. М. Худоногов, Е. М. Лыткина [и др.]. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2012. – № 10 (670). – С. 27 – 28.

8. Дульский, Е. Ю. Исследование эффективности конвективного и терморadiационного методов капсулирования изоляции обмоток при ремонте электрических машин тягового подвижного состава / Е. Ю. Дульский, Н. С. Доценко, Е. М. Лыткина. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 14 – 19.

9. Иванов, В. Н. Электротехнологическое продление ресурса электрических машин тепловым излучением : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванов Владимир Николаевич ; Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). – Москва, 2014. – 172 с. – Текст : непосредственный.

10. Гамаюнов, И. С. Управление температурно-влажностным процессом изоляции обмоток тяговых электродвигателей подталкивающего электровоза / И. С. Гамаюнов. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2006. – № 4 (28). – С. 35 – 36.

11. Патент № 2396669 Российская Федерация, МПК H02K 15/12. Локальный способ герметизации компаундом изоляции лобовых частей обмоток тяговых электрических машин : № 2009117049/28 : заявлено 04.05.2009 : опубликовано 10.08.2010 / Худоногов А. М., Худоногов И. А., Иванов В. Н., Ильичев Н. Г., Оленцевич Д. А., Сидоров В. В., Лыткина Е. М. – 3 с.: ил. – Текст : непосредственный.

References

1. Ivanov P. Yu., Dul'skii E. Yu., Hudonogov A. M. The state of the issue of reliability and durability of isolation of asynchronous auxiliary machines [Sostoyanie voprosa nadezhnosti i dolgovechnosti izolyacii asinhronnyh vspomogatel'nyh mashin]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 2 (22), pp. 2 – 6.

2. Hudonogov A. M., Lytkina E. M., Dul'skii E. Yu., Ivanov V. N., Vasil'ev A. A. Analysis of methods of mathematical modeling of the process of encapsulation of polymer insulation of electric machines [Analiz metodov matematicheskogo modelirovaniya processa kapsulirovaniya polimernoj izolyacii elektricheskikh mashin]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* (Transport infrastructure of the Siberian region). – Irkutsk, 2016, pp. 505 – 509.

3. Ismailov Sh. K., Smirnov V. P., Khudonogov A. M. Kinetics of the heat and moisture exchange process in the insulation of the windings of traction electric machines. Mechanical engineering [Kinetika processa teplo- i vlagoobmena v izolyacii obmotok tyagovykh elektricheskikh mashin]. *Izvestiia vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie – News of higher educational institutions. Mechanical engineering*, 2008, no. 9, pp. 35 – 42.

4. Khudonogov A. M., Dul'skii E. Yu., Ivanov V. N. More attention to engine insulation designs [Bol'she vnimaniya izolyacionnym konstrukciyam dvigatelej]. *Lokomotiv – Locomotive*, 2018, no. 7, pp. 36 – 37.

5. Hudonogov A. M., Dul'skii E. Yu., Ivanov V. N., Lobycin I. O. Analysis of the design features of the elements of the electromagnetic system of locomotive traction engines [Analiz konstruktivnykh osobennostej elementov elektromagnitnoj sistemy tyagovykh dvigatelej lokomotivov].

Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona (Transport infrastructure of the Siberian region). – Irkutsk, 2018, pp. 351 – 355.

6. Smirnov V. P. *Nepreryvnyj kontrol' temperatury predel'no nagruzhennogo oborudovaniya elektrovoza* (Continuous temperature monitoring of extremely loaded electric locomotive equipment). Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 2003, 328 p.

7. Khudonogov A. M., Lytkina E. M., Dul'skiy E. Yu., Ivanov V. N., Alekseev D. Yu., Isachenko V. I., Vasiliev A. A. Innovative technologies for improving the reliability of electric machines [Innovacionnyye tekhnologii povysheniya nadezhnosti elektricheskikh mashin]. *Lokomotiv – Locomotive*, 2012, no. 10 (670), pp. 27 – 28.

8. Dul'skii E. Iu., Dotsenko N. S., Lytkina E. M. Research of efficiency of convective and thermoradiation methods capsulation of isolation of windings in the repair of electric cars traction rolling stock [Issledovanie effektivnosti konvektivnogo i termoradiatsionnogo metodov kapsulirovaniia izoliatsii obmotok pri remonte elektricheskikh mashin tiagovogo podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 1 (17), pp. 14 – 19.

9. Ivanov V. N. *Elektrotekhnologicheskoe prodlenie resursa elektricheskikh mashin teplovym izlucheniem* (Electrotechnological extension of the service life of electric machines by thermal radiation). Doctor's thesis, Moscow, 2014, 172 p.

10. Gamayunov I. S. Control of temperature-humidity process of insulation of windings of traction electric motors of the pushing electric locomotive [Upravlenie temperaturno-vlazhnostnym processom izolyatsii obmotok tyagovykh elektrodvigatelej podtalkivayushchego elektrovoza]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2006, no. 4 (28), pp. 35 – 35.

11. Khudonogov A. M., Khudonogov I. A., Ivanov V. N., Ilyichev N. G., Olentsevich D. A., Sidorov V. V., Lytkina E. M. *Patent RU 2396669*, 10.08.2010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шестакова Валерия Дмитриевна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Студентка факультета «Транспортные системы», ИрГУПС.

Тел.: +7 (9500) 57-33-73.

E-mail: valeriyashestakova0509@gmail.com

Иванов Павел Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: +7 (9500) 65-21-77.

E-mail: P_Ivanov@ssdigit.ru

Иванов Владимир Николаевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: +7 (9149) 17-63-10.

E-mail: v.n.ivanov40161@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shestakova Valeriya Dmitrievna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Student of the Faculty «Transport Systems», ISTU.

Phone: +7 (9500) 57-33-73.

E-mail: valeriyashestakova0509@gmail.com

Ivanov Pavel Yurievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor the Subdepartment of «Electric rolling stock», ISTU.

Phone: +7 (9500) 65-21-77.

E-mail: P_Ivanov@ssdigit.ru

Ivanov Vladimir Nikolaevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor the Subdepartment of «Electric rolling stock», ISTU.

Phone: +7 (9149) 17-63-10.

E-mail: v.n.ivanov40161@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Шестакова, В. Д. К вопросу повышения надежности и долговечности тяговых электродвигателей тепловозов / В. Д. Шестакова, П. Ю. Иванов, В. Н. Иванов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 95 – 104.

Shestakova V. D., Ivanov P. Yu., Ivanov V. N. On the issue of improving the reliability and durability of traction electric motors of diesel locomotives. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 1 (45), pp. 95 – 104 (In Russian).

УДК 625.1

В. В. Романенко, А. Б. Невзорова

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ), г. Гомель, Республика Беларусь

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРИВЫХ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ДЛЯ ИХ ПАСПОРТИЗАЦИИ

Аннотация. Особое внимание на Белорусской железной дороге (БЖД) занимают вопросы эксплуатации криволинейных участков пути, так как в рамках решения задачи повышения скоростей движения поездов одним из существенных препятствий изменения скоростного режима является несоответствие фактического положения кривой проектной документации. Применяемые на дороге автоматизированные системы мобильных диагностических средств в полной мере позволяют оценить фактические параметры кривых, которые могут составлять основу для моделирования искомых положений кривых с целью их паспортизации. С этой целью ежегодно издаются различные приказы и распоряжения на БЖД, устанавливающие основные параметры кривых в плане и по уровню, а также объемы работ по переустройству (реконструкции) кривых с целью приведения их к проектной документации. В введенной на БЖД Методике по оценке фактических параметров устройства кривых участков пути приводятся общие положения по регламенту, определяющему порядок выполнения действия при проведении качественной и количественной оценок показателей геометрии рельсовой колеи. В зависимости от установленных фактических параметров предполагается присвоение кривой определенного статуса, который устанавливает порядок ее дальнейшей эксплуатации в зависимости от степени расстройств фактических параметров относительно проектных. Проведенный параметрический анализ данной Методики позволил обобщить результаты структурного, функционального и информационного анализов порядка оценки уровня расстройств кривых с присвоением им соответствующего статуса и величины показателей, определяющих степень расстройств. Исследование параметров криволинейных участков позволило выявить расхождения в качественной и количественной оценках одних и тех же участков пути, а также предположить необходимость комплексной оценки фактических и проектных параметров геометрии рельсовой колеи.

Ключевые слова: методика, рельсовая колея, криволинейный участок пути, степень расстройств, статус кривой.

Viktoriya V. Romanenko, Alla B. Nevzorova

Belarusian State University of Transport (BelsUT), Gomel, Republic of Belarus

ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION OF CURVED SECTIONS RAILWAYS FOR THEIR PASSPORTIZATION

Abstract. Special attention on the Belarusian Railway is paid to the issues of operation of curved-linear sections of the track, since in the framework of solving the problem of increasing train speeds; one of the significant obstacles to changing the speed regime is the discrepancy between the actual position of the curve of the project documentation. The automated systems of mobile diagnostic tools used on the road fully allow us to evaluate the actual parameters of the curves, which can form the basis for modeling the desired positions of the curves for the purpose of their certification. For this purpose, various orders and orders are drawn up annually, which set the main parameters of the curves in the plan and level, as well as the volume of work on the reconstruction (modernization) of the curves in order to bring them to the project documentation. In the Methodology introduced at the Belarusian Railways for evaluating the actual parameters of the installation of curves of track sections, general provisions given for the regulations that determine the procedure for performing actions when performing qualitative and quantitative assessments of the parameters of the geometry of the rail track. Depending on the state of the actual parameters, it is assumed that the curve will be assigned a certain status, which determines the order of its further operation, and depending on the ratio of the actual parameters relative to the design parameters, the degree of violation. The parametric analysis of this technique allowed us to

generalize the results of structural, functional and informational analyses of the order of assessment of the level of disorder of curves, with assigning them the appropriate status, and the value of indicators that determine the degree of violation. The study of the parameters of curved sections revealed discrepancies in the qualitative and quantitative estimates of the same track sections, as well as the need for a comprehensive assessment of the actual and design parameters of the rail gauge geometry.

Keywords: methodology, track gauge, curved section of track, extent of the violation, curve status.

На Белорусской железной дороге в рамках действующей программы повышения скоростей движения поездов исследуются проектные геометрические положения криволинейных участков пути с целью либо изменения, либо сохранения скоростного режима [1]. Однако в процессе эксплуатации пути и в результате применения выправочных машин без предварительных измерительных поездок и определения сдвижек в фиксированных точках путь на всех направлениях часто бывает «зарихтован» [2]. В этом случае параметры плана, регламентированные проектной документацией и принимаемые при переустройстве, в настоящее время практически не имеют ничего общего с фактическим положением либо значительно отличаются от него [3].

Реальную оценку возможности пропуска поездов с установленными на участке скоростями, а при необходимости и их повышения, дает решение задачи о приведении существующего положения конкретной кривой к проекту либо, если это не представляется возможным [4], определение нового проектного положения кривой, которое необходимо «узаконить».

На БЖД с 06.11.2020 введена в действие Методика по оценке фактических параметров устройства кривых участков пути мобильными диагностическими средствами для их паспортизации (далее – Методика) [5]. Центр диагностики объектов инфраструктуры (ЦДИ) государственного объединения «Белорусская железная дорога» имеет возможность с применением комплексных автоматизированных систем проводить исследования геометрических параметров пути [6] с последующим определением и анализом

- фактических параметров устройства криволинейных участков пути;
- допускаемых скоростей движения поездов по криволинейным участкам пути;
- степени расстройтва криволинейных участков пути, параметры которых отличаются от паспортных (проектных);
- криволинейных участков пути с изменившимися параметрами устройства под воздействием поездной нагрузки или после выполнения путевых работ.

Необходимость в разработке данной Методики обусловлена отсутствием алгоритма, который бы увязывал все этапы моделирования параметров искомого положения криволинейного участка [7 – 9] по следующим пунктам:

- измерение и регистрация фактических параметров существующих кривых (рисунок 1);
- выявление криволинейных участков пути, положение которых не соответствует проектной документации, кривых с величинами непогашенного ускорения ($a_{нп}$) и скорости изменения непогашенного ускорения (Ψ), кривизной отвода возвышения наружного рельса (i), превышающей допускаемые значения, а также с параметрами геометрии рельсовой колеи (ГРК), существенно отличающимися от проектного положения;
- определение проектного положения кривой и степени несоответствия его фактическому положению;
- установление наличия возможных препятствий для реализации переустройства кривой (переезды, опоры контактной сети, сооружения, нарушающие габарит приближения строения, недостаточная ширина плеча балластной призмы, обочины и др.);
- определение возможности либо невозможности приведения существующего положения кривой в проектное;
- моделирование положения кривой, которое позволит не только уменьшить величины сдвижек, но и не нарушит основные требования по проектированию и содержанию кривых [10];
- проверка нового положения (для внесения в проектную документацию) на соответствие установленным скоростям движения по величинам $a_{нп}$, Ψ и i ;

Железнодорожный путь, ИЗЫСКАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

– составление плана проведения планово-предупредительных работ с применением выправочных машин по постановке кривых либо в проектное положение, либо в положение, соответствующее установленным скоростям и условиям эксплуатации криволинейных участков.

Кривых правая		Начало		Характеристики кривой		Конец		разн.		Длина разн.		Угол		1-й отвод		переходные		2-й отвод			
план	уровень	км	м	км	м	км	м	м	м	м	м	град.	Макс.	Средн.	Длина	Макс.	Средн.	Длина	Макс.	Средн.	
692	918	692	918	693	107	693	107	189				6.06	0.51	0.48		0.50	0.42	77			
692	950	692	950	693	99	693	99	149	40				0.88	0.84		0.71	0.71	51			
пред. след.	0,680 0	На	2	1	Характеристики	1	Характеристики	2	3	д./Уров./Шаб.	0,42/0,45	0,19	Впз	95	80						
план	уровень	км	м	км	м	км	м	м	м	Макс.	Средн.	0,24/0,26	0,10	Вкр	114	90					
692	986	692	986	693	30	693	30	44		1055	1165	1089	3	933	Впр	120	90				
692	993	692	993	693	48	693	48	56	-12	33	37	36	P=0,78 (1 ст.)	Виз	134	90					
шаблон										1520	1524	1524	V _{+0,3} = 84	Vсопр	-	-					
Боковой износ:	>6мм – не опр.			0мм – не опр.									V _{-0,3} = -	Вдп	110	90					
Пикеты с огр.	Вдп			Вкр				Впр					Виз								

Рисунок 1 – Регистрация параметров существующей кривой в отчетной форме ФП-3.2: 1 – положение начала и конца переходных кривых (НПК и КПК); 2 – несовпадение в точках НПК и КПК отводов возвышения наружного рельса и кривизны; 3 – радиус круговой кривой (минимальный, максимальный и средний); 4 – величина возвышения наружного рельса (минимальная, максимальная и средняя); 5 – величина непогашенного ускорения (средняя и максимальная); 6 – установленная скорость движения поездов

Решение задачи по первому пункту возможно в полной мере, так как фактические параметры кривой определяются с помощью мобильных диагностических средств и отражаются в карточке кривой отчетной формы ФП-3.2 [11].

Для реализации алгоритма по остальным пунктам, в частности, согласно Методике для оценки кривых на соответствие фактических параметров установленным скоростям движения поездов предполагаются:

качественная оценка – присвоение статуса «не паспортизован», «паспортизован» и «не соответствует установленной скорости»;

количественная оценка – определение величины показателя степени расстройтва.

Статус кривой показывает, насколько фактические параметры кривой соответствуют или не соответствуют установленным на БЖД нормативным требованиям по содержанию и эксплуатации кривых.

Для определения статуса кривой необходимо учитывать параметры по следующим пунктам:

превышение непогашенного ускорения: $a_{нп} > 0,7 \text{ м/с}^2$;

наличие длинных неровностей в плане, приводящих к изменению кривизны в пределах круговой кривой и вызывающих отклонение среднего радиуса ($R_{ср}$) от проектного ($R_{пр}$) более чем на 10 %;

отклонение средней величины возвышения наружного рельса ($h_{ср}$) от проектной ($h_{пр}$) более чем на 15 мм, в том числе требующее ограничение установленной скорости;

несовпадение точек начала переходных кривых (НПК) и конца переходных кривых (КПК) по отводам возвышения наружного рельса и кривизны (ΔL) более чем на 20 м.

В рамках параметрического анализа Методики для количественной и качественной оценок уровня расстройтва рассмотрены десять криволинейных участков пути, эксплуатируемых на БЖД, фактические параметры которых согласно отчетным формам АСКД-И «Эксперт» ФП-3.2 приведены в таблице 1.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Таблица 1 – Фактические параметры кривых

№ п/п	Начало кривой, км + м	$V_{пз}$, км/ч	$a_{нп}$, м/см ²	Ψ , м/см ³	R_{min} , м	R_{max} , м	$R_{ср}$, м	h_{min} , мм	h_{max} , мм	$h_{ср}$, мм	$R_{пр}$, м	$h_{пр}$, мм
1	768 + 238	115	0,20	0,17	2628	3586	2970	28	36	32	3500	30
2	693 + 325	100	0,78	0,37	624	709	649	74	86	82	620	90
3	691 + 928	100	0,45	0,19	1055	1165	1089	33	37	36	1100	50
4	667 + 356	70	0,38	0,11	609	715	661	35	47	43	634	40
5*	772 + 227	115	0,76	0,33	862	1077	925	64	72	69	1100/915	70
6	210 + 688	100	0,2	0,58	1920	1975	1958	44	52	47	1620	45
7	245 + 279	100	0,39	0,1	592	692	618	133	143	139	610	12
8	0 + 690	60	0,27	0,13	400	400	400	65	74	70	400	70
9	80 + 789	120	0,52	0,39	1610	1670	1640	21	28	25	1920	25
10	135 + 656	60	0,03	0,01	1025	1052	1039	45	52	48	1010	40

Примечание. * – составная кривая (двухрадиусная).

Расчеты отклонений и несовпадений по фактическим параметрам расстройств кривых для анализируемых кривых сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные величины фактических параметров расстройств кривых

№ п/п	Отклонение $R_{ср}$ от $R_{пр}$, %	Отклонение $h_{ср}$ от $h_{пр}$, мм	Отвод $h_{н.р}$ при длине 1-й ПК		Отвод $h_{н.р}$ при длине 2-й ПК		Несовпадения НПК и КПК по кривизне и уровню (ΔL)			
			$L_{пк1}$, м	i , ‰	$L_{пк2}$, м	i , ‰	НПК ₁	КПК ₁	КПК ₂	НПК ₂
1	15	2	46	0,70	59	0,54	30	43	75	41
2	4	3	87	0,94	85	0,96	21	22	29	3
3	1	11	42	0,86	50	0,72	32	7	18	8
4	4	3	162	0,27	128	0,34	66	2	7	8
5	16	1	127	0,54	129	0,53	11	29	6	4
6	17	2	39	1,20	36	1,30	26	15	14	0
7	17	19	118	1,18	117	1,19	10	7	28	12
8	0	0	34	2,06	76	0,92	23	35	83	43
9	15	0	46	0,54	76	0,33	22	100	58	3
10	3	8	60	0,80	62	0,77	15	9	4	1

Анализ данных таблицы 2 показывает, что только для одной кривой (№ 10) все фактические параметры находятся в допустимых значениях, а для остальных выявлены:

- только несовпадение ΔL в одной из точек – кривые № 3 и № 4, в трех точках – № 2;
- кроме несовпадения ΔL еще и отклонение $R_{ср}$ от $R_{пр}$ более 10 % – кривые № 5 (ΔL в одной из точек), № 9 (ΔL в трех точках), № 1 (ΔL в четырех точках);
- сочетание несовпадения ΔL , отклонения $R_{ср}$ от $R_{пр}$ и превышения i – кривая № 6 (ΔL в одной из точек);
- сочетание несовпадения ΔL и превышения i – кривая № 8 (ΔL в четырех точках);
- сочетание несовпадения ΔL , отклонения $R_{ср}$ от $R_{пр}$, превышения i и отклонения $h_{ср}$ от $h_{пр}$ более чем на 15 мм – кривая № 7 (ΔL в одной из точек).

Согласно Методике в зависимости от фактических параметров устройства кривых и их соответствия установленным скоростям грузовых и пассажирских поездов:

– статус «не паспортизован» присваивается, если кривая расстроена хотя бы по одному показателю из $a_{\text{нп}} > 0,7 \text{ м/с}^2$, $\Psi > 0,6 \text{ м/с}^2$, $i > [i]$ в зависимости от скорости движения поездов, отклонения $R_{\text{ср}}$ от $R_{\text{пр}}$ более чем на 10 %, $h_{\text{ср}}$ от $h_{\text{пр}}$ более чем на 15 мм, несовпадение НПК или КПК по кривизне и уровню более чем на 20 м;

– статус «паспортизован» имеют кривые, у которых все показатели не превышают значений, указанных для кривой, имеющие статус «не паспортизован»;

– статус «не соответствует установленной скорости» присваивается кривым, состояние фактических параметров которых требует ограничения скорости [8].

Таким образом, девять из десяти исследуемых кривых имеют статус «не паспортизован», одна – «паспортизован».

Для кривых со статусом «не паспортизован» после определения степени расстройтва кривой Методика предполагает определение паспортных данных, для которых должны быть определены следующие характеристики:

- количество кривых участков круговой кривой с разными радиусами и их величины;
- положение начала НПК и конца КПК кривого участка пути (км, м);
- угол поворота кривой (град.);
- рациональное возвышение, величина которого соответствует кривизне и удовлетворяет установленным критериям по величинам $a_{\text{нп}}$ для пассажирских и грузовых поездов;
- скорости движения пассажирских и грузовых поездов, установленные приказом по скоростям (км/ч);
- длины переходных кривых, обеспечивающие необходимые для установленной скорости движения величины отвода по кривизне и возвышению;
- максимально допустимая скорость в зависимости от расчетных $a_{\text{нп}}$, Ψ и i .

Для количественной оценки уровня расстройтва вводятся три показателя расстройтва кривого участка пути, определяемые согласно карточке кривой.

1. Показатель расстройтва по кривизне ($P_{\text{пл}}$). Определяется по соотношению максимального и минимального радиусов в пределах круговой кривой по формуле

$$P_{\text{пл}} = k_{\text{пл}} \cdot (R_{\text{max}} / R_{\text{min}} - 1), \quad (1)$$

где R_{max} – максимальный радиус в пределах круговой кривой, м; R_{min} – минимальный радиус в пределах круговой кривой, м; $k_{\text{пл}}$ – коэффициент, зависящий от среднего радиуса круговой кривой и установленной скорости движения поездов.

Значения коэффициентов $k_{\text{пл}}$ при $R_{\text{ср}} = 1200$ м и менее и $R_{\text{ср}}$ от 1200 до 3000 м включительно независимо от скорости движения поездов установлены соответственно 1 и 0,5, для $R_{\text{ср}}$ более 3000 м и скорости более 140 км/ч – 0,2, при меньшей скорости – 0.

2. Показатель расстройтва по возвышению наружного рельса ($P_{\text{ур}}$). Определяется исходя из разности минимальной и максимальной величин $h_{\text{н.р}}$, рассчитывается по формуле

$$P_{\text{ур}} = (h_{\text{max}} - h_{\text{min}}) : 10, \quad (2)$$

где h_{max} – максимальная величина $h_{\text{н.р}}$ в пределах круговой кривой, мм; h_{min} – минимальная величина $h_{\text{н.р}}$ в пределах круговой кривой, мм.

3. Показатель расстройтва криволинейного участка пути по несовпадению точек начала и конца отводов возвышения и кривизны в переходных кривых (P_{Δ}), определяется по уравнению

$$P_{\Delta} = \Delta L_{\text{пк}} : 20, \quad (3)$$

где $\Delta L_{\text{пк}}$ – максимальная величина несовпадения точек начала и конца отвода кривизны и соответствующего ему отвода возвышения, м.

В зависимости от значений величины показателей $P_{\text{пл}}$, $P_{\text{ур}}$ и P_{Δ} оцениваются две степени расстройтва (S), градации которых приведены в таблице 3.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Таблица 3 – Степень расстройтва кривого участка пути в зависимости от значения $P_{пл}$, $P_{ур}$ и P_{Δ}

Показатель расстройтва	Степень расстройтва S	
	1 (S_1)	2 (S_2)
$P_{пл}$	Более 0,3 до 0,5 включительно	Более 0,5
$P_{ур}$	Более 2 до 3 включительно	Более 3
P_{Δ}	Более 1,5 до 3 включительно	Более 3

Согласно Методике обнаружение изменений параметров $P_{пл}$, $P_{ур}$ и P_{Δ} в ходе текущей проверки мобильными средствами диагностики по сравнению с предыдущими является основанием для планирования путевых работ и оценки качества их выполнения.

На основании расчетов для исследованных кривых определены параметры $P_{пл}$, $P_{ур}$ и P_{Δ} для всех кривых (таблица 4).

Таблица 4 – Показатели расстройтва кривых

№ п/п	Показатель расстройтва по кривизне $P_{пл}$	Показатель расстройтва по возвышению $P_{ур}$	Показатель расстройтва по несовпадению точек начала и конца отводов возвышения и кривизны в переходных кривых P_{Δ}			
			НПК ₁	КПК ₁	КПК ₂	НПК ₂
1	-0,32	0,8	1,50	2,15	3,75	2,05
2	0,14	1,2	1,05	1,10	1,45	0,15
3	0,10	0,4	1,60	0,35	0,90	0,40
4	0,17	1,2	3,30	0,10	0,35	0,40
5	0,25	0,8	0,55	1,45	0,30	0,20
6	-0,49	0,8	1,30	0,75	0,70	0
7	0,17	1,00	0,50	0,35	1,40	0,60
8	0	0,9	1,15	1,75	4,15	2,15
9	-0,48	0,7	1,10	5,00	2,90	0,15
10	0,03	0,7	0,75	0,45	0,20	0,05

Определение степени расстройтва кривых выполнено в ходе построения диаграммы распределения показателей, определенных в таблице 4 (рисунок 2).

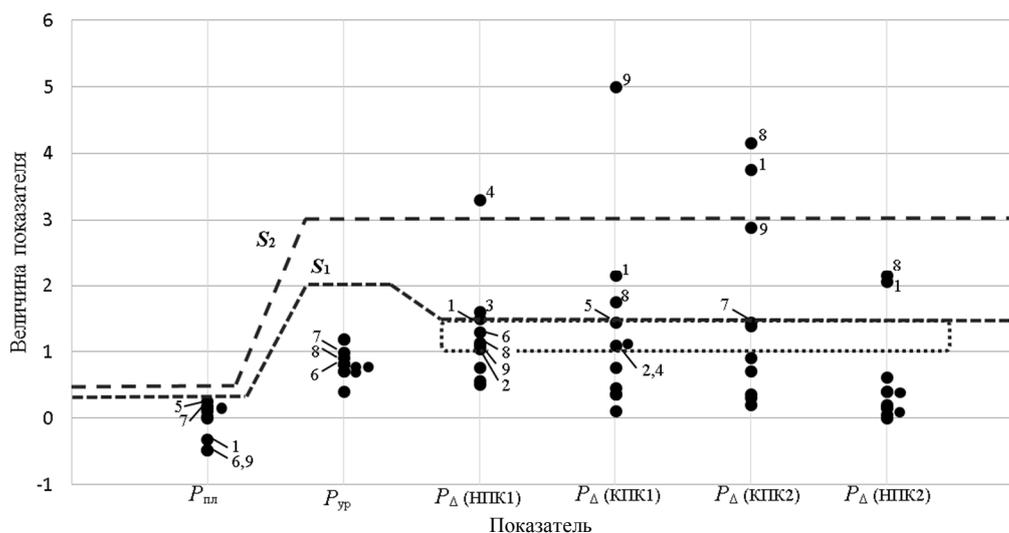


Рисунок 2 – Диаграмма распределения показателей $P_{пл}$, $P_{ур}$ и P_{Δ} в зависимости от их величины по степеням расстройтва S_1 и S_2 ; [-----] – ограничение нижнего предела первой степени расстройтва S_1 ; [- - -] – ограничение верхнего предела первой степени расстройтва S_1 и нижнего предела второй степени расстройтва S_2 ; [.....] – зона показателя P_{Δ} , которая не входит в пределы первой степени расстройтва S_1 , но дает возможность присвоения кривой статуса «не паспортизован»; 6 – номер кривой согласно таблице 1, фактические параметры и показатели которой имеют отклонения от допускаемых значений

При определении степени расстройств учитываются значения показателей, которые на диаграмме обозначены как зоны S_1 и S_2 . Кроме кривых, имеющих первую и (или) вторую степени расстройств, отмечены кривые, имеющие показатели ниже нижнего предела S_1 , но при этом отклонения их фактических параметров превышают допустимые значения, а именно:

- кривые № 1, 5, 6, 7 и 9 (на шкале $P_{пл}$) имеют отклонение $R_{ср}$ от $R_{пр}$ более 10 %;
- кривые № 6, 7 и 8 (на шкале $P_{ур}$) имеют отклонение $h_{ср}$ от $h_{пр}$ более 15 мм;
- кривые № 1, 2, 5, 6, 7, 8 и 9 (на шкалах P_{Δ} выделены зоной).

При анализе алгоритма получения показателей $P_{пл}$, $P_{ур}$ и P_{Δ} установлено следующее.

1. Отклонение $R_{ср}$ от $R_{пр}$ более 10 %, а именно 15, 16 и 17 %, не предполагает наличие расстройств даже первой степени, относя в то же время кривую согласно Методике к категории «расстроенная».

Так как величина показателя $P_{пл}$ зависит от R_{max} и R_{min} , а также от установленной скорости, при величине радиуса более 1200 м показатель $P_{пл}$ имеет отрицательные значения (кривые № 1, 6, 9, имеющие $R_{ср}$ соответственно 3500, 1620 и 1920 м), которые ниже нижнего предела S_1 , однако по абсолютной величине указанные значения будут относиться к первой степени расстройств. При величине радиуса менее 1200 м и отклонении $R_{ср}$ от $R_{пр}$ более 10 % (кривые № 5 и 7, имеющие $R_{ср}$ соответственно 1100 и 690 м) показатель $P_{пл}$ несмотря на «расстроенность» кривой может не иметь степень расстройств. Такое несоответствие обусловлено тем, что для определения степени расстройств и назначения статуса кривой учитываются разные факторы – соответственно соотношение R_{max} к R_{min} и $R_{ср}$ к $R_{пр}$.

2. Отклонение $h_{ср}$ от $h_{пр}$ более 15 мм (19 мм), а также наличие параметра i более 1 ‰ (определяется величиной $h_{н.р}$) не всегда предполагают выявление расстройств даже первой степени, при этом относя кривую, как и в первом случае, к категории «расстроенная».

При величине i от 1,18 до 2,06 ‰ (кривые № 6, 7, 8), в том числе при отклонении $h_{ср}$ от $h_{пр}$, равном 19 мм (кривая № 7), данные кривые по показателю $P_{ур}$ не относятся к первой степени, но при этом относятся к категории «расстроенная».

Это объясняется тем, что показатель $P_{ур}$ определяется исходя из разницы h_{max} к h_{min} , а статус кривой – $h_{ср}$ к $h_{пр}$.

3. Как и в предыдущих случаях, ряд кривых имеют показатель ΔL более 20 м (от 21 до 30 м), что позволяет отнести эти кривые к категории «расстроенная», по показателю P_{Δ} не имеют степень расстройств.

В данном случае и показатель P_{Δ} , и фактическая разность ΔL определяются по одним и тем же параметрам, но исходя из принципа расчета P_{Δ} и значения нижнего предела первой степени (P_{Δ} более 1,5) учитывает величину ΔL только более 30 м. Практически все исследуемые кривые имеют хотя бы в одной точке значение ΔL от 20 до 30 м, что не относит их к первой степени, но при этом относит к категории «расстроенная», так как существует определенный «коридор», не учтенный при определенной степени расстройств.

Аргументированные выводы параметрического анализа сведены в таблицу 5.

Согласно таблице 5 кривая № 10 не имеет отклонения фактических параметров свыше нормативных и показателей расстройств первой или второй степеней, что подтверждается присвоенным ей статусом «паспортизован». Кривые № 1, 3, 4, 8 и 9 имеют расстройств первой и (или) второй степеней, что подтверждается присвоением им статуса «не паспортизован». Однако такой же статус имеют кривые № 2, 5, 6 и 7, которые не имеют расстройств, относящихся к какой-либо из степеней, а данный статус присвоен им по наличию отклонений фактических параметров свыше нормативных.

В то же время согласно Методике кривая, имеющая указанные в таблице 5 отклонения, относится к «расстроенным», а данная категория предусматривает выполнение путевых работ по их переустройству.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Таблица 5 – Определение состояния кривой по итогам параметрического анализа

№, п/п	Наличие отклонений фактических параметров свыше нормативных	Наличие показателей 1-й степени S_1	Наличие показателей 2-й степени S_2	Степень расстройтва	Статус криволинейного участка	Примечание
1	R_{cp} от R_{np} ; ΔL (НПК ₁)	ΔL (КПК ₁); ΔL (КПК ₂)	ΔL (КПК ₂)	2	«Не паспортизован»	
2	ΔL (НПК ₁); ΔL (КПК ₁); ΔL (КПК ₂)	–	–	–	«Не паспортизован»	Без степени
3	–	ΔL (НПК ₁)	–	1	«Не паспортизован»	
4	–	–	ΔL (НПК ₁)	2	«Не паспортизован»	
5	R_{cp} от R_{np} ; ΔL (КПК ₁)	–	–	–	«Не паспортизован»	Без степени
6	R_{cp} от R_{np} ; i (ПК ₁); i (ПК ₂); ΔL (НПК ₁);	–	–	–	«Не паспортизован»	Без степени
7	R_{cp} от R_{np} ; h_{cp} от h_{np} ; i (ПК ₁); i (ПК ₂); ΔL (КПК ₂)	–	–	–	«Не паспортизован»	Без степени
8	i (ПК ₁); ΔL (НПК ₁)	ΔL (КПК ₁); ΔL (НПК ₂)	ΔL (КПК ₂)	2	«Не паспортизован»	
9	R_{cp} от R_{np} ; ΔL (НПК ₁)	ΔL (КПК ₂);	ΔL (КПК ₁)	2	«Не паспортизован»	
10	–	–	–	–	«Паспортизован»	

Таким образом, приведенные выше результаты параметрических данных исследуемых кривых согласно утвержденной БЖД Методике показывает, что образуется ряд криволинейных участков, терминология состояния которых требует уточнения, например:

- статус кривой «не паспортизован» без отклонений фактических параметров;
- статус кривой «не паспортизован» с отклонениями 1-й степени расстройтва;
- статус кривой «не паспортизован» с отклонениями 2-й степени расстройтва.

Согласно Методике установленная степень кривой не определяет дальнейшее ее применение для, например, очередности выполнения планово-предупредительной выправки или переустройства криволинейных участков пути, особенностей исполнения моделирования нового паспортного положения кривой, определения рациональных параметров кривых и т. д. исходя из этого, так как степень расстройтва показывает уровень отклонения положения криволинейного участка от проектного положения, пункты Методики в рамках определения статуса кривой, но с учетом фактических параметров требует некоторых уточнений и доработок.

Кроме того, так как качественная и количественная оценки идут параллельно, необходимо предусмотреть их комплексную оценку, основанную на фактических (R_{max} , R_{min} , R_{cp} , h_{max} , h_{min} , h_{cp} , a_{np} , Ψ и i_{cp}) и на проектных (R_{np} , h_{np}) значениях параметров кривых.

Список литературы

1. Дубровская, Т. А. Обоснование проектных решений при реконструкции железных дорог для скоростного движения пассажирских поездов в Республике Беларусь : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дубровская Татьяна Алексеевна ; Российский университет транспорта (МИИТ). – Москва, 2019. – 28 с. – Место защиты: РУТ (МИИТ). – Текст : непосредственный.

2. Добрынин, Л. С. Постановка пути в проектное положение при производстве ремонтных работ / Л. С. Добрынин, И. С. Чернецкая. – Текст : электронный // Молодая наука Сибири : электронный научный журнал. – 2020. – № 2(8) – URL: <http://mnv.irgups.ru> (дата обращения: 01.11.2020).

3. Романенко, В. В. Деформирование криволинейных участков железнодорожного участков железнодорожного пути под воздействием подвижного состава / В. В. Романенко, А. Б. Невзорова. – Текст : непосредственный // Механика. Исследования и инновации. – 2020. – № 13 (13). – С. 122 – 127.

4. Корженевич, И. П. Влияние плана пути на скорость и эксплуатационные расходы / И. П. Корженевич. – Текст : непосредственный // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2009. – № 26. – С. 71 – 74.
5. Методика по оценке фактических параметров устройства кривых участков пути мобильными диагностическими средствами для их паспортизации : официальное издание : утверждена приказом от 02.11.2020 № 838 НЗ : введена в действие 06.11.2020. – Минск, 2020. – 10 с. – Текст : непосредственный.
6. Информационно-аналитическая система комплексной диагностики и мониторинга состояния технических объектов железнодорожной инфраструктуры «Эксперт». – Текст : электронный // Инфотранс : сайт. – 2020. – URL: <http://www.infotrans-logistic.ru> (дата обращения: 28.10.2020).
7. Бучкин, В. А. Сравнительный анализ программных комплексов / В. А. Бучкин, Е. А. Рыжик, Е. П. Левченкова. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2013. – № 2. – С. 112 – 121.
8. Бучкин, В. А. Базовый функционал САПР железных дорог / В. А. Бучкин, Е. П. Левченкова, Е. А. Рыжик. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2013. – № 2 (37). – С. 59 – 63.
9. Кравчяня, И. Н. Применение методов математического моделирования при проектировании реконструкции железнодорожного пути / И. Н. Кравчяня, Т. А. Дубровская. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 2 (38). – С. 109 – 116.
10. СТП 09150.56.010-2005. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ : стандарт организации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом начальника Бел. ж. д. от 29.06.2006 № 221Н : введен впервые : дата введения 2018-07-01. – Минск : БЖД, 2006. – 284 с. – Текст : непосредственный.
11. Романенко, В. В. Организация работ при переустройстве кривых в дистанции пути / В. В. Романенко, В. Ф. Качан. – Текст : непосредственный // Проблемы безопасности на транспорте : материалы междунар. науч.-практ. конф. : в 5 ч. – Гомель : Белорусский государственный университет транспорта, 2020. – Ч. 4. – С. 55 – 57.

References

1. Dubrovskaya T. A. Obosnovanie proektnyh reshenij pri rekonstrukcii zheleznyh dorog dlya skorostnogo dvizheniya passazhirskih poezdov v Respublike Belarus' (Justification of design solutions for the reconstruction of railways for high-speed passenger train traffic in the Republic of Belarus). Ph. D. thesis abstract, Moscow, Russian University of Transport (MIIT), 2019, 28 p.
2. Dobrynin L. S. Setting the path to the design position in the production of repair works [Postanovka puti v proektnoe polozhenie pri proizvodstve remontnyh rabot]. *Molodaya nauka Sibiri: elektronnyj nauchnyj zhurnal – Molodaya nauka Sibiri: electronic scientific journal*, 2020. – no. 2 (8), Available at: URL: <http://mnv.irkups.ru> (accessed: 01 November 2020).
3. Romanenko V. V., Neuzorava A. B., Arod L. N. Deformation of curved sections of railway sections of railway track under the influence of rolling stock [Deformirovaniye krivolinyeynykh uchastkov zheleznodorozhnogo puti pod vozdeystviyem podvizhnogo sostava]. *Mekhanika. Issledovaniya I innovatsii – Mechanics. Innovation and research*, 2020, no. 13 (13), pp. 122 – 127.
4. Korzhenevich I. P. Influence of the road plan on speed and operational costs [Vliyanie plana puti na skorost' i ekspluatacionnye raskhody]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazariana – Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan*, 2009, no. 26, pp. 71 – 74.
5. *Metodika po ocenke fakticheskikh parametrov ustrojstva krivykh uchastkov puti mobil'ny-mi diagnosticheskimi sredstvami dlya ih pasportizacii : oficial'noe izdanie : utverzhde-na prikazom ot 02.11.2020 № 838 NZ : vvedena v dejstvie 06.11.2020* (Methodology for assessing the actual parameters of the device of curved sections of the track with mobile diagnostic tools for their

certification: official publication: approved by Order No. 838 of 02.11.2020: put into effect on 06.11.2020). Minsk, 2020, 10 p.

6. *Informacionno-analiticheskaya sistema kompleksnoj diagnostiki i monitoringa sostoya-niya tekhnicheskikh ob"ektov zheleznodorozhnoj infrastruktury «EKSPERT»* (Information and analytical system of complex diagnostics and monitoring of technical objects of railway infrastructure «EXPERT»), Available at: <http://www.infotrans-logic.ru> (accessed 28 October 2020).

7. Buchkin V. A., Ryzhik E. A., Levchenkova E. P. Comparative analysis of software complexes [Sravnitel'nyj analiz programmnyh kompleksov]. *Mir transporta – World Of Transport and Transportation*, 2013, no. 2, pp. 112 – 121.

8. Buchkin V. A., Levchenkova E. P., Ryzhik E. A. Basic functionality of railway CAD [Bazovyy funktsional SAPR zheleznih dorog]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2013, no. 2 (37), pp. 59 – 63.

9. Kravchenya I. N., Dubrovskaya T. A. Application of mathematical modeling methods in the design of railway track reconstruction [Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniya pri proektirovani rekonstrukcii zheleznodorozhnogo puti]. *Izvestiia Transsiba. – Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 2 (38), pp. 109 – 116.

10. *STP 09150.56.010_2005. Tekushee sodержanie jeleznodorozhnogo puti. Tehnicheskie trebovaniya i organizatsiya rabot: standart organizatsii* (STP 09150.56.010-2005. Current maintenance of the railway track. Technical requirements and organization of work: organization standard). Minsk, Belarusian Railway Publ., 2006, 284 p.

11. Romanenko V. V., Kachan V. F. Organization of work in the reconstruction of curves in the distance of the path [Organizatsiya rabot pri pereustrojstve krivykh v distantsii puti]. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v piati chastiakh* (Problems of transport safety: proceedings of the International Scientific and Practical Conference: in five parts). – Gomel, 2020, P. 4, pp. 55 – 57.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Романенко Виктория Владимировна

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

Кирова ул., д. 34, г. Гомель, 246031, Республика Беларусь.

Старший преподаватель кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов», БелГУТ.

Тел.: +37529 190-22-40.

E-mail: vromanenkk@mail.ru

Невзорова Алла Брониславовна

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

Кирова ул., д. 34, г. Гомель, 246031, Республика Беларусь.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Водоснабжение, химия и экология», БелГУТ.

Тел.: +37529 663-07-88.

E-mail: anevzorova@bsut.by

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Романенко, В. В. Оценка технического состояния кривых участков железнодорожного пути для их паспортизации / В. В. Романенко, А. Б. Невзорова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 104 – 113.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanenko Viktoriya Vladimirovna

Belarusian State University of Transport (BelSUT).

Kirova st, 34, Gomel, 246031, Republic of Belarus.

Senior Lecturer of the Department "Design, construction and operation of transport facilities" BelSUT.

Phone: +37529 190-22-40.

E-mail: vromanenkk@mail.ru

Nevezorova Alla Bronislavovna

Belarusian State University of Transport (BelSUT).

Kirova st, 34, Gomel, 246031, Republic of Belarus.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Water Supply, Chemistry and Ecology», BelSUT.

Phone: +37529 663-07-88.

E-mail: anevzorova@bsut.by

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Romanenko V. V., Nevezorova A. B. Assessment of technical condition of curved sections railways for their passportization. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 1 (45), pp. 104 – 113 (In Russian).

О. И. Верёвкина

Ростовский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО «РГУПС»),
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

АНАЛИЗ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ПОКАЗАТЕЛЯ КОЛИЧЕСТВА ОТКЛОНЕНИЙ ГЕОМЕТРИИ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ ОТ НОРМАТИВА ВТОРОЙ СТЕПЕНИ НА ИНФРАСТРУКТУРЕ ОАО «РЖД», НА СЕТЕВОМ И РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЯХ

Аннотация. Целью данной работы является построение модели прогноза количественного показателя предотказного состояния верхнего строения пути на основании статистического анализа сезонной динамики этого показателя. Прогнозирование предполагает выявление узких мест для своевременного принятия корректирующих мероприятий. Данный подход позволяет уточнить построение алгоритмов системы оценки функциональных рисков на инфраструктуре ОАО «РЖД» для управления техническим состоянием железнодорожного пути и безопасностью и рассматривается как элемент цифровизации оценки рисков области безопасности движения в Дирекции инфраструктуры на железнодорожном транспорте. Разработка ведется на основе принятых действующих нормативных документов и классификаторов факторов риска.

В работе применены такие методы, как: регрессионный анализ, валидация данных, моделирование на основе регрессионного анализа.

В результате проведенных исследований была выявлена зависимость и построена прогнозная модель динамики проявления количества отклонений геометрии рельсовой колеи (ГРК) второй степени. Данная модель основана на использовании фактических данных из автоматизированной системы Путь (АСУ П) ОАО «РЖД». Апробация подхода проводилась на базе Дирекции инфраструктуры Северо-Кавказской железной дороги. Выявленная зависимость позволяет дать достаточно точный прогноз состояния безопасности движения и развития отклонений ГРК второй степени для использования в практике, эффективного планирования материальных затрат на проведение планово-предупредительных работ и капитальных ремонтов на линейных предприятиях, на конкретной железной дороге, принятой для расчета, и на сети ОАО «РЖД».

Практическая значимость работы заключается в том, что построенная модель позволяет осуществлять прогнозирование интенсивности проявления фактора риска на объективной основе сезонных закономерностей, а также объемов управляющих воздействий по текущему содержанию верхнего строения пути. Наличие такого прогноза позволит установить зависимость между показателем динамики количества отклонений геометрии рельсовой колеи второй степени, включая сезонную динамику, и фактором риска, т. е. количеством отклонений ГРК третьей степени, используемым в оценке риска на инфраструктуре.

Результатом такого подхода является решение системы задач, влияющих на величины, отражающие уровень рисков, и, как следствие, эффективное управление финансовыми потоками для содержания инфраструктуры, сокращения и предотвращения случаев нарушения безопасности движения.

Ключевые слова: краткосрочный прогноз, алгоритмизация оценок, геометрия рельсовой колеи, анализ сезонной динамики, цикличность, управляющее воздействие, фактический уровень, прогнозные значения.

Olga I. Verevkina

Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, the Russian Federation

ANALYSIS OF THE SEASONAL DYNAMICS OF THE INDICATOR OF THE AMOUNT OF DEVIATIONS IN RAIL GAUGE GEOMETRY FROM THE SECOND DEGREE STANDARD ON THE INFRASTRUCTURE OF RUSSIAN RAILWAYS, AT THE NETWORK AND REGIONAL LEVELS

Abstract. Purpose. Constructing a model for predicting a quantitative indicator of the pre-discharge state of the upper structure of the track based on a statistical analysis of the seasonal dynamics of this indicator. Forecasting involves identifying bottlenecks for timely corrective action. This approach allows you to refine the construction of algorithms of the functional risk assessment system on the infrastructure of Russian Railways for managing the technical condition of the railway track and safety and is considered as an element of digitalization of the risk assessment of traffic safety in the Railway Infrastructure Directorate. The development is carried out on the basis of accepted existing regulatory documents and classifiers of risk factors operating for the infrastructure management at Russian Railways.

Methods. regression analysis, data validation, modeling based on regression analysis.

Results. Dependence was identified and a forecast model of the dynamics of the number of deviations of the 2nd degree rail gauge geometry (GRK) was built based on the use of actual data from the automated system Path (APCS P) of Russian Railways. Testing of the approach was carried out on the basis of the Directorate of Infrastructure of the North Caucasus Railway. The identified dependence allows you to give a fairly accurate forecast of the state of traffic safety and the development of GRK deviations on the 2nd degree for use in practice, effective planning of material costs for planned preventive work and overhaul at linear enterprises, on a specific railway adopted for calculation and on the network of Russian Railways.

Practical significance. The constructed model allows predicting the intensity of the risk factor on an objective basis of seasonal patterns, as well as the volume of control impacts on the current content of the upper track structure. The presence of such a forecast will make it possible to establish a relationship between the indicator of the dynamics of the number of deviations of the 2nd degree rail gauge geometry, including seasonal dynamics, and the risk factor, that is, the number of GRK deviations of the 3rd degree used in the risk assessment on the infrastructure.

The result of this approach is the solution of a system of tasks that affect the values that reflect the level of risks, and as a result, effective management of financial flows for the maintenance of infrastructure, reduction and prevention of traffic safety incidents.

Keywords: short-term forecasting, estimating, rail gauge geometry, patterns, seasonal dynamics analysis, cycling, control effect, actual level, model, repair volumes, forecast values.

На основании собранных и обработанных данных рассмотрена динамика показателя количества отклонений геометрии рельсовой колеи второй степени, включая сезонную динамику. Определен алгоритм краткосрочного прогноза значений показателя с учетом изменений в объемах планово-предупредительного ремонта. Необходимость такого прогноза определяется вопросами алгоритмизации оценок рисков в хозяйстве пути инфраструктуры ОАО «РЖД», так как зависящий от рассматриваемого показателя количества отклонений ГРК второй степени показатель количества отклонений ГРК третьей, четвертой степени является фактором риска и используется в Методике оценки функциональных рисков безопасности движения поездов в хозяйстве пути [1, 2].

Вопрос о накоплении неисправностей типа отклонений геометрии рельсовой колеи от норматива в зависимости от тоннажа и времени рассматривался в работах [3 – 5]. Изучение закономерностей поведения данного показателя необходимо для оценки состояния «восстанавливаемого ресурса» верхнего строения пути. Показатель для одного конкретного километра зависит от целого ряда величин:

- типа рельсов,
- времени, прошедшего с момента последнего ремонта;
- качества текущего содержания пути;
- пропущенного тоннажа.

В случае, когда изучаемой величиной является количество неисправностей второй степени в целом по ОАО «РЖД» и рассматриваются сезонные колебания, скорость роста количества отклонений ГРК зависит от двух основных факторов: месяца (квартала) и прироста (убыли) километража всех видов планово-предупредительного ремонта. Прогнозирование на кратковременный период количества ГРК второй степени связано с анализом сезонной динамики этого показателя.

Выбор и группировка данных для проведения анализа из автоматизированной системы АСУ П ОАО «РЖД».

Ряд значений количества отклонений ГРК второй степени по ОАО «РЖД» за три года (2013 – 2015 гг.) приведен в таблице 1. Графически поведение рядов значений данного показателя представлено на рисунке 1.

Оценка влияния сезонности на отклонения ГРК второй степени.

Обращает на себя внимание цикличность (периодичность) поведения показателя. В первую очередь это связано с тем, что несмотря на сезонные колебания этот показатель управляемый, и рост количества отклонений во втором квартале далее снижается посредством управляющего воздействия – выполнения всех видов ремонтов, влияющих на ГРК.

Оценим стандартные показатели динамики:

- абсолютный прирост (цепной и базисный);

- темп роста (цепной и базисный);
- темп прироста (цепной);
- абсолютное значение 1 % прироста.

Таблица 1 – Количество отклонений ГРК второй степени по ОАО «РЖД» за три года (2013 – 2015 гг.)

Месяц	Год		
	2013	2014	2015
01	739 986	677 477	771 722
02	744 908	714 517	741 763
03	751 369	779 885	793 236
04	956 486	960 403	980 747
05	1 026 697	976 020	1 008 499
06	949 330	973 942	972 640
07	911 970	931 849	932 598
08	921 441	912 600	912 371
09	901 531	896 903	865 857
10	845 974	845 347	832 311
11	748 514	754 495	771 739
12	661 431	726 126	745 723

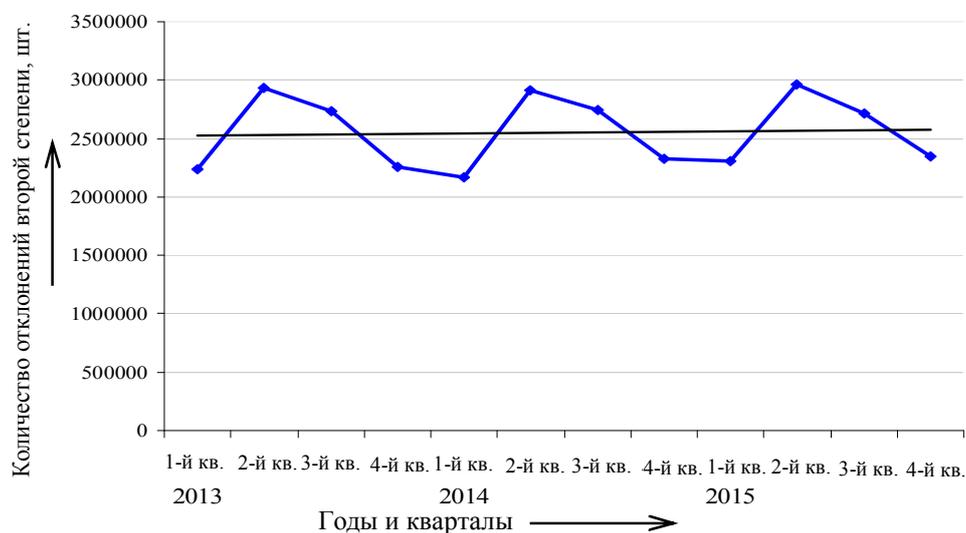


Рисунок 1 – Динамика сезонной интенсивности развития неисправностей второй степени поквартально за 2013 – 2015 гг.

Расчет абсолютного цепного и базисного приростов производится по формулам:

$$\Delta y_{\text{рц}} = y_i - y_{i-1}; \quad (1)$$

$$\Delta y_{\text{рб}} = y_i - y_0, \quad (2)$$

где $\Delta y_{\text{рц}}$ – значение цепного прироста;

$\Delta y_{\text{рб}}$ – значение базисного прироста;

y_i – значение показателя в момент времени i ;

y_{i-1} – значение показателя в момент времени $i - 1$;

y_0 – значение показателя в начальный момент времени.

Расчет цепного и базисного темпов роста производится по формулам:

$$T_{\text{рц}} = \frac{y_i}{y_{i-1}}; \quad (3)$$

$$T_{pb} = \frac{y_i}{y_0}, \quad (4)$$

где T_{pc} – значение цепного темпа роста;
 T_{pb} – значение базисного темпа роста.

Расчитанные значения абсолютного цепного и базисного прироста представлены в таблице 2.

Таблица – 2 Расчетные значения абсолютного, цепного и базисного прироста, цепного и базисного темпа роста

Год	Квартал	Количество отклонений ГРК второй степени	Абсолютный прирост		Темп роста, %		Темп прироста, %	Абсолютное значение 1 % прироста
			цепной	базисный	цепной	базисный	цепной	
2013	1-й кв.	2 236 263	–	–	–	–	–	–
	2-й кв.	2 932 513	696 250	696 250	131,13	131,13	31,13	22 362,63
	3-й кв.	2 734 942	–197 571	498 679	93,26	122,30	–6,74	29 325,13
	4-й кв.	2 255 919	–479 023	19 656	82,49	100,88	–17,51	27 349,42
2014	1-й кв.	2 171 879	–84 040	–64 384	96,27	97,12	–3,73	22 559,19
	2-й кв.	2 910 365	738 486	674 102	134,00	130,14	34,00	21 718,79
	3-й кв.	2 741 352	–169 013	505 089	94,19	122,59	–5,81	29 103,65
	4-й кв.	2 325 968	–415 384	89 705	84,85	104,01	–15,15	27 413,52

В графическом виде данные по темпам роста отклонений ГРК второй степени представлены на рисунке 2.

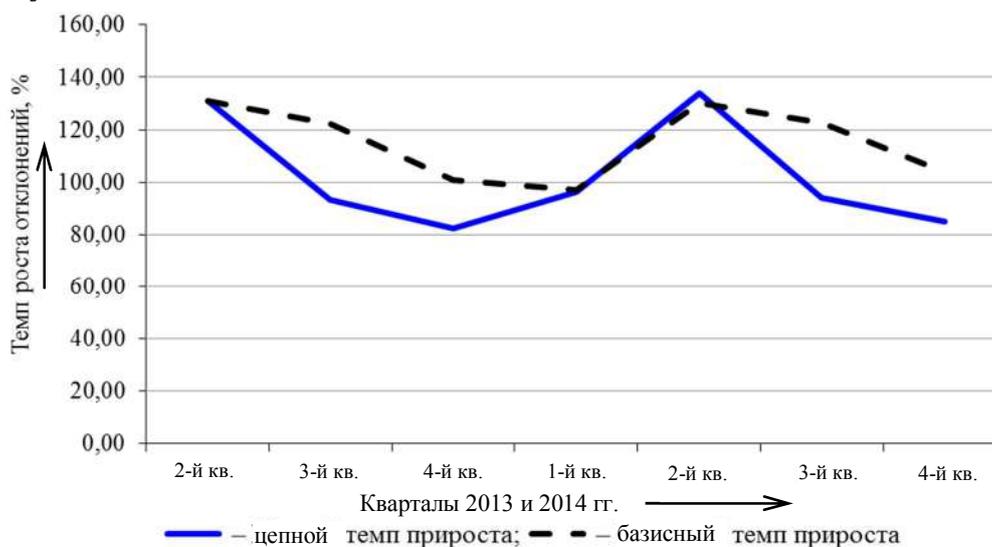


Рисунок 2 – График сезонных темпов роста отклонений ГРК второй степени за 2013 – 2014 гг.

Таблица 3 – Количество отклонений геометрии рельсовой колеи второй степени

Год	Квартал	Фактическое значение	Тренд	Индекс сезонности
2013	1-й	2 236 263	2 533 885	0,882
	2-й	2 932 513	2 535 246	1,157
	3-й	2 734 942	2 536 607	1,0782
	4-й	2 255 919	2 537 968	0,889
2014	1-й	2 171 879	2 539 329	0,856
	2-й	2 910 365	2 540 690	1,145
	3-й	2 741 352	2 542 051	1,078
	4-й	2 325 968	2 543 412	0,915

Индекс сезонности, представленный в таблице 3, показывает, во сколько раз фактический уровень динамического ряда на определенный момент времени больше среднего уровня

либо выровненного методом скользящей средней либо методом аналитического выравнивания уровня. При анализе сезонных колебаний динамического ряда рассматривают развитие по месяцам (кварталам, неделям и т. д.) одного или нескольких лет (кварталов, месяцев и т. д.). Метод определения индекса сезонности зависит от того, наблюдается наличие тренда в изучаемом ряду или тренд отсутствует [6 – 10].

Регрессионный анализ временного ряда количества отклонений ГРК второй степени.

Учитывая наличие сезонной составляющей, а также составляющей управляющего воздействия, временной ряд представляем в виде:

$$y_i = a + b \cdot i + c_k + u_k + e_k, \quad (5)$$

где y_i – значения ряда в квартал № k года j ;

$$i = (j - 1) + k, \quad (6)$$

где i – порядковый номер квартала во всем ряду (играет роль времени);

k – номер квартала внутри года (от 1 до 4);

j – порядковый номер года (например, для 2013 г. $j = 1$);

a, b – коэффициенты линейного тренда;

c_i – коэффициенты сезонных отклонений;

$$u_k = \pm 30 \cdot L_k, \quad (7)$$

где L_k – убыль (прирост) количества километров, ремонтируемых в квартале k ($k = 1, 2, 3, 4$), по сравнению с предыдущим годом;

e_k – случайный компонент.

Коэффициенты a, b, c_1, c_2, c_3, c_4 вычисляются методом наименьших квадратов по следующим формулам:

$$b = \frac{\overline{ty} - \bar{t}\bar{y}}{\overline{t^2} - \bar{t}^2}; \quad (8)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{t}; \quad (9)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i; \quad (10)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad (11)$$

$$\overline{ty} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i y_i, \quad (12)$$

где i – целочисленный индекс; n – количество кварталов всего ($n = 4 \cdot m$);

$$c_k = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{k \equiv i(\text{mod } 4)} - \hat{y}_{k \equiv i(\text{mod } 4)})}{m}, \quad (13)$$

где m – количество циклов (в данном случае лет);

$k \equiv i(\text{mod } 4)$ – равенство k и i по модулю 4 (т. е. выбираются значения однотипных сезонов);

y_k – значение временного ряда в точке k -й квартал;

\hat{y}_k – значение линейного тренда в точке k -й квартал.

Полученная модель учитывает изменение объема управляющих воздействий в различные периоды времени по сравнению с предыдущим аналогичным сезоном (компонент u_i).

В данном случае расчет методом наименьших квадратов по данным 2013 – 2014 гг. дает следующие значения коэффициентов:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = 2\,532\,524; \\ b = 1\,361,417; \\ c_1 = -356\,396,3; \\ c_2 = 384\,538,3; \\ c_3 = 198\,985,3; \\ c_4 = -227\,176; \\ e_t = 0. \end{array} \right. \quad (14)$$

График линейного тренда без учета сезонных колебаний представлен на рисунке 3.

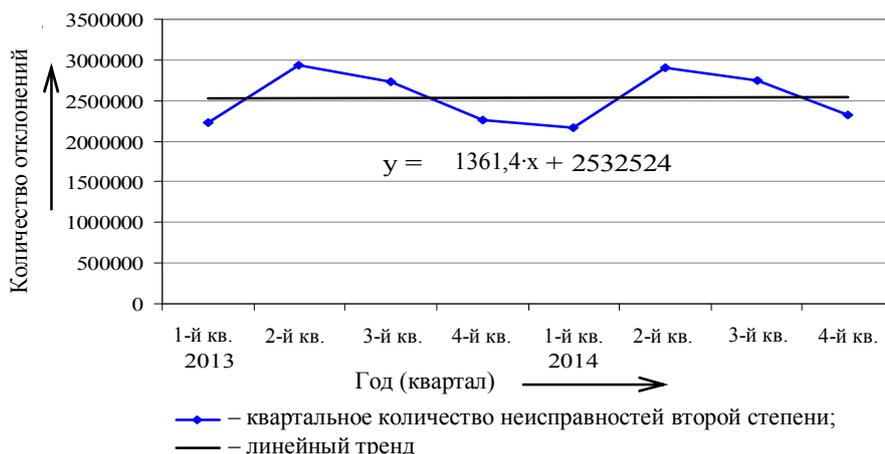


Рисунок 3 – График временного ряда и линейного тренда для отклонений второй степени

Поквартальное отклонение Δ от постоянного значения тренда (коэффициент a) в процентах от величины a рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \frac{b}{a}. \quad (15)$$

Используя значения (10), (11), получаем $\Delta = 0,053757\%$.

Это позволяет сделать вывод о том, что основные колебания показателя – сезонные (рисунок 4).

Расчет прогнозных значений для 2015 г. производится по формулам (5) – (13) с использованием значений (14). Сравнение расчетных предсказанных и фактических значений приведено на рисунке 4.

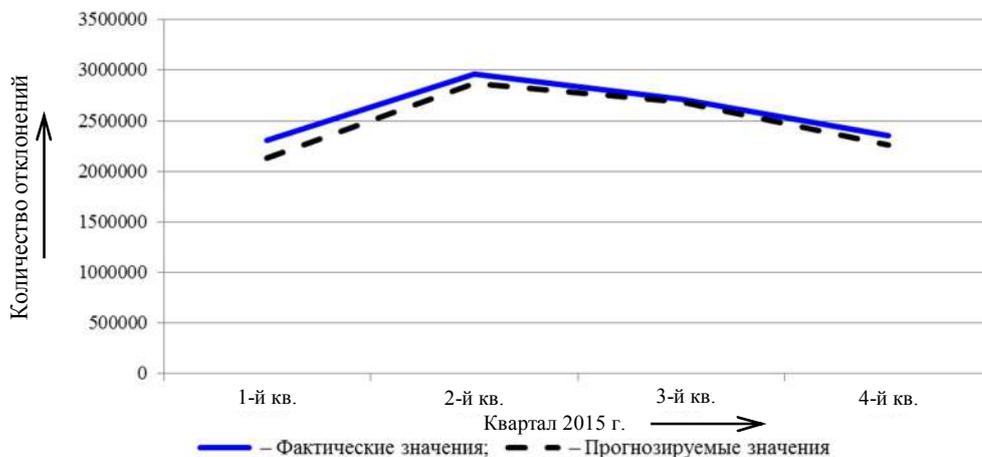


Рисунок 4 – Сравнение прогнозируемых по модели и фактических значений количества отклонений ГРК второй степени

В данном случае согласно сетевым данным по объемам ремонта увеличение объемов ремонта в 2015 г. по сравнению с 2014 г. составило 8 тыс. км, поэтому $u_i = 60\,000$, погрешность в норме, рассчитываемая по формуле

$$\|f\| = \max_i f_i, \quad (16)$$

составляет 3 %, а в норме, рассчитываемой по формуле

$$\|f\| = \sum_{i=1}^4 |f_i|, \quad (17)$$

где $f = (f_1, f_2, f_3, f_4)$ – вектор квартальных значений количества отклонений ГРК второй степени по сети;

f_i – количество отклонений ГРК второй степени в квартале i ;

$i = 1, 2, 3, 4$ – номер квартала,

погрешность составляет 13 %.

Значительная величина ошибки в данном случае связана с действием случайных (в том числе климатических) факторов.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1) Верификация прогнозной модели на уровне сети показала достаточную точность при использовании ее для прогнозирования как сезонных отклонений ГРК второй степени, так и общего уровня этого показателя. Модель может быть использована при анализе рисков безопасности движения поездов по фактору отклонений ГРК третьей, четвертой степени на сети.

2) Использование модели на региональном уровне, на уровне линейного предприятия требует индивидуальной статистики, соответствующей уровню, что не меняет способ формирования модели (формулы (5) – (12)), но коэффициенты будут другими – в зависимости от особенностей эксплуатации – региональными или технологическими.

3) В некоторых случаях (для некоторых линейных предприятий) в качестве «объясняющей» переменной для фактора риска (количество отклонений третьей степени) следует брать не количество отклонений второй степени, а количество отклонений второй степени, близкой к третьей степени. Статистика этого показателя также ведется в составе АСУ П.

Модель может быть использована при построении факторного анализа рисков безопасности движения поездов по фактору отклонений ГРК третьей, четвертой степени. Расчет рисков по предлагаемой модели позволит выполнять более точный прогноз выявления узких мест для своевременного и эффективного распределения средств на планово-предупредительные работы, более точное планирование затрат на капитальные ремонты.

Список литературы

1. Методика идентификации рисков в области функциональной безопасности движения поездов на инфраструктуре ОАО «РЖД» для управления пути и сооружений ; утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 01.12.2016 № 4246р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – Текст : непосредственный.

2. Методика оценки рисков в области функциональной безопасности движения на инфраструктуре ОАО «РЖД» для Управления пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры ; утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 01.12.2016 № 2439. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – Текст : непосредственный.

3. Симонюк, И. А. Модель работы верхнего строения железнодорожного пути с позиции понятия о процессе восстановления / И. А. Симонюк. – Текст : непосредственный // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : сб. научных трудов международной практической конференции. – Москва: Московский государственный университет путей сообщения, 2013. – С. 221 – 223.

4. Симонюк, И. А. Модель работы верхнего строения железнодорожного пути для прогнозирования технического состояния на этапе перспективного планирования / И. А. Симонюк. – Текст : непосредственный // Путь XXI века : сб. научных трудов международной науч.-метод. конференции. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2013. – С. 193 – 202.

5. Бельтюков, В. П. Оптимизация системы содержания верхнего строения железнодорожного пути / В. П. Бельтюков. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 2. – С. 112 – 120.

6. Кремер, Н. Ш. Математика для экономистов / Н. Ш. Кремер, Б. А. Путко, И. М. Тришин. – Москва : Высшее образование, 1997. – 646 с. – Текст : непосредственный.

7. Айвазян, С. А. Основы эконометрики / С. А. Айвазян. – Москва : Юнити, 2001. – Т. 2. – 431 с. – Текст : непосредственный.

8. Магнус, Я. Р. Эконометрика / Я. Р. Магнус, П. К. Катыхов, А. А. Персецкий. – Москва : Дело, 2000. – 248 с. – Текст : непосредственный.

9. Общая теория статистики : учебник / под ред. М. Г. Назарова. – Москва : Омега-Л, 2011. – 410 с. – Текст : непосредственный.

10. Орлов, А. И. Прикладная статистика / А. И. Орлов. – Москва : Экзамен, 2004. – 656 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Metodika identifikacii riskov v oblasti funkcional'noj bezopasnosti dvizheniya poezdov na infrastrukture OOO «RZHD» dlya upravleniya puti i sooruzhenij* (Procedure for identification of risks in the field of functional safety of train movement on the infrastructure of Russian Railways LLC for the management of tracks and structures). Moscow: JSC «Russian Railways» Publ., 2016.

2. *Metodika ocenki riskov v oblasti funkcional'noj bezopasnosti dvizheniya na infrastrukture OAO «RZHD» dlya Upravleniya puti i sooruzhenij Central'noj direkcii infrastruktury* (Procedure for risk assessment in the field of functional traffic safety on the infrastructure of Russian Railways for the Department of Route and Structures of the Central Directorate of Infrastructure). Moscow: JSC «Russian Railways» Publ., 2016.

3. Simonyuk I. A. Model of the work of the upper structure of the railway track from the perspective of the concept of the restoration process [Model' raboty verhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti s pozicii ponyatiya o processe vosstanovleniya]. *Sovremennyye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoj prakticheskoy konferencii* (Modern problems of the design, construction and operation of the railway track: a collection of scientific works of the international practical conference). – Moscow: Moscow State Transport University, 2013, pp. 221 – 223.

4. Simonyuk I. A. Model of work of the upper structure of the railway track for forecasting the technical condition at the stage of perspective planning [Model' raboty verhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti dlya prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya na etape perspektivnogo planirovaniya]. *Put' XXI veka: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii* (Path of the 21st century: a collection of scientific works of the international scientific and methodological conference). – St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2013, pp. 193 – 202.

5. Beltyukov V. P. Optimization of the system of maintenance of the upper structure of the railway track [Optimizatsiya sistemy soderzhaniya verhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2016, no. 2, pp. 112 – 120.

6. Kremer N. Sh., Putko B. A., Trishin I. M. *Matematika dlya ekonomistov* (Mathematics for economists). Moscow: Vysshee obrazovanie Publ., 646 p.

7. Ayvazyan S. A. *Osnovy ekonometriki. T. 2* (Fundamentals of econometrics. Vol. 2). Moscow: Unity Publ., 2001, 431 p.
8. Magnus Ya. R., Katyshev P. K., Persetsky A. A. *Ekonometrika* (Econometrica). Moscow: Delo Publ., 2000, 248 p.
9. *Obshchaya teoriya statistiki : uchebnik* (General theory of statistics : textbook), Ed. by M. G. Nazarov. Moscow: Omega-L Publ., 2011, 410 p.
10. Orlov A. I. *Prikladnaya statistika* (Applied statistics). Moscow: Exam Publ, 2004, 656 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Верёвкина Ольга Ивановна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения пл., д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», РГУПС.

Тел.: +7 (863) 272-64-44.

E-mail: ov18111966@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Verevkina Olga Ivanovna

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Operational management», RSTU.

Phone: +7 (863) 272-64-44.

E-mail: ov18111966@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Верёвкина, О. И. Анализ сезонной динамики показателя количества отклонений геометрии рельсовой колеи от норматива второй степени на инфраструктуре ОАО «РЖД», на сетевом и региональном уровнях / О. И. Верёвкина. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 114 – 122.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Verevkina O. I. Analysis of the seasonal dynamics of the indicator of the amount of deviations in rail gauge geometry from the second degree standard on the infrastructure of Russian Railways, at the network and regional levels. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 1 (45), pp. 114 – 122 (In Russian).

УДК 656.213:656.613.1

Ли Тэк Енг, Р. Г. Король

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

РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА ПУСАН ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСКОРЕЙСКИХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК

Аннотация. Интеграция железных дорог Южной и Северной Кореи позволит сформировать международный евразийский транспортный коридор и обеспечить транспортировку товаров, произведенных в Республике Корея, железнодорожным транспортом. Сегодня южнокорейские грузовладельцы из-за островного положения используют в основном морской транспорт. Организация перевозок по Транскорейской железной дороге с выходом на Транссибирскую магистраль и железные дороги Китая и Монголии даст преимущества грузоотправителям по стоимости и времени доставки грузов. Реализация проекта по воссоединению Транскорейской железнодорожной магистрали приведет к увеличению объемов перевозки грузов и контейнеров, в том числе в железнодорожно-морском сообщении. В Республике Корея основным транспортным узлом является порт Пусан, который обслуживается железнодорожным и автомобильным транспортом. Транспортный узел Пусан включает в себя два морских порта – новый и старый порты Пусан, железнодорожные станции, обслуживающие контейнерные терминалы порта, а также тыловые терминалы, на которые доставка контейнеров осуществляется автомобильным транспортом. Ежегодно доля железнодорожных перевозок по завозу и вывозу контейнеров на терминалы порта Пусан составляет менее 7 % и продолжает уменьшаться. Такая динамика связана с наличием инфраструктурных, экономических и технологических проблем взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в порту Пусан. Предметом данного исследования является анализ процессов взаимодействия различных видов транспорта в новом порту Пусан. Цель работы заключается в разработке мероприятий по увеличению пропускной способности железнодорожной составляющей транспортного узла Пусан для организации транскорейских перевозок в рамках евразийской транспортной

системы. В данной работе использованы теоретические методы исследования, включая системный анализ и синтез информации. В результате анализа технического оснащения, технологии работы и имеющейся железнодорожной инфраструктуры нового порта Пусан выявлено наличие «узких мест» в функционировании системы «железная дорога – морской порт», препятствующих эффективному процессу транспортировки контейнеров. В работе рассмотрены инфраструктурные, технологические и организационные мероприятия по увеличению перерабатывающей способности объектов транспортного узла Пусан. Реализация рассматриваемых мероприятий потребует время на изменения и перестройку системы взаимодействия транспорта в процессе перевалки контейнеров. Необходимо определить этапность инфраструктурных изменений на основе прогнозирования перспективных объемов перевозок, в том числе с помощью имитационного моделирования.

Ключевые слова: Транскорейская железная дорога, порт Пусан, транспортный узел.

Taek Y. Lee, Roman G. Korol

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

BUSAN TRANSPORT HUB DEVELOPMENT FOR TRANS-KOREAN RAILWAY TRANSPORTATION

Abstract. *The integration of the railways of South and North Korea will make it possible to form an international Eurasian transport corridor and ensure the transportation of goods produced in the Republic of Korea by rail. Today, South Korean cargo owners, due to the island situation, use mainly sea transport. The organization of transportation on the Trans-Korean Railway with access to the Trans-Siberian Railway and the railways of China and Mongolia will give advantages to shippers in terms of cost and time of cargo delivery. The implementation of the project on the reunification of the Trans-Korean Railway will lead to an increase in the volume of cargo and container transportation, including in rail-sea communication. In the Republic of Korea, the main transport hub is the port of Busan, which is served by rail and road transport. The Busan transport hub includes two seaports – the new and old Busan ports, railway stations serving the container terminals of the port, as well as rear terminals to which container delivery is carried out by road. Every year, the share of rail transport for the import and export of containers to the terminals of the port of Busan is less than 7 % and continues to decrease. This dynamic is associated with the presence of infrastructure, economic and technological problems of interaction between rail and sea transport in the port of Busan. The subject of this study is the analysis of the processes of interaction between different modes of transport in the new port of Busan. The purpose of the work is to develop measures to increase the capacity of the railway component of the Busan transport hub for the organization of trans-Korean transport within the framework of the Eurasian transport system. In this paper we used theoretical methods of research, including a systematic analysis and synthesis of information. As a result of the analysis of the technical equipment, operating technology and the existing railway infrastructure of the New Port of Busan, the presence of «bottlenecks» in the functioning of the «railway – seaport» system was revealed, which hinder the effective process of container transportation. The paper considers infrastructure, technological and organizational measures to increase the processing capacity of Busan transport hub facilities. The implementation of the measures under consideration will require time to change and restructure the system of interaction of transport in the process of container transshipment. It is necessary to determine the stages of infrastructure changes based on the forecast of future traffic volumes, including using simulation modeling.*

Keywords: TRANS-Korean railway, the port of Busan, transportation hub.

22 июня 2018 г. руководство компаний ОАО «Российские железные дороги» и Корейские железные дороги (Korail) заключили соглашение о сотрудничестве по реализации проекта интеграции Транссибирской железнодорожной магистрали и Транскорейской железной дороги. Проект развития Транскорейской железнодорожной магистрали существует более 20 лет и основным вопросом является модернизация и развитие транспортного комплекса Южной и Северной Кореи [1]. Республика Корея строит новые железнодорожные линии, усиливает имеющуюся транспортную инфраструктуру. Северокорейские власти согласно проекту должны соединить участок железной дороги Кюнгей протяженностью 15,3 км от станции Кэсон до границ Южной Кореи. Требуется модернизация железнодорожного полотна, верхнего строения пути и реконструкция искусственных сооружений по всей длине северокорейской железнодорожной линии Донхэ. Эта линия через станцию Туманган соединяется с Транссибирской железной дорогой и через станцию Намян имеет выход на Трансманычжурскую и Транскитайскую железные дороги, тем самым обеспечивая железнодорожный доступ к евразийским транспортным коридорам.

Южная Корея расположена на части полуострова, в силу исторических и политических разногласий с КНДР не имеет сухопутной связи с материковой частью Азии, поэтому морской транспорт является определяющим при формировании транспортно-логистических цепей доставки грузов. Реализация проекта строительства Транскорейской магистрали позволит интегрировать железнодорожную инфраструктуру стран Корейского полуострова в азиатско-тихоокеанскую транспортную сеть с прямым выходом на европейские рынки, что приведет к росту грузопотоков и трансформации системы организации движения железнодорожного транспорта.

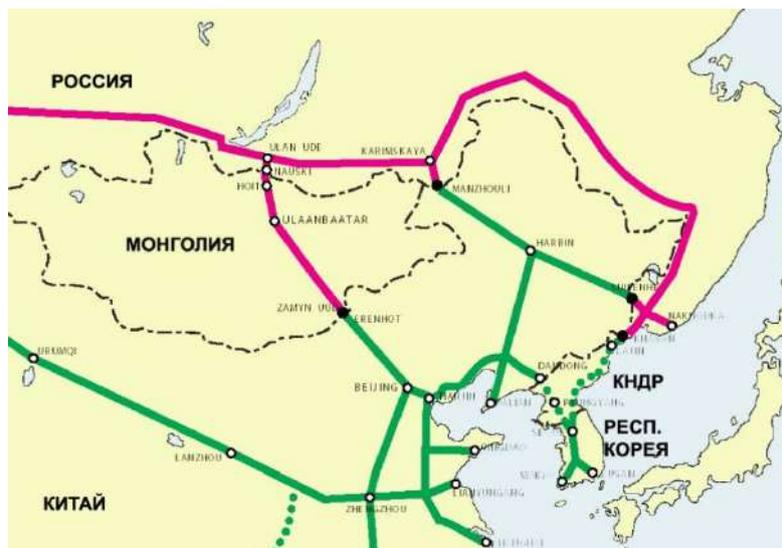


Рисунок 1 – Варианты соединения железнодорожной инфраструктуры Республики Корея с азиатско-тихоокеанской транспортной сетью

Объединение корейских и китайских железных дорог, а также выход через станцию Хасан на Транссибирскую магистраль позволят грузовладельцам, которые осуществляют отправку товаров в страны СНГ и Евросоюза, получить конкурентные преимущества по стоимости и по времени доставки грузов. Это могут быть не только грузоотправители из Республики Корея, но и из других стран Азиатско-Тихоокеанского региона, которые примут решение по транспортировке контейнеров через морские порты Кореи и далее по железнодорожной сети. Также возможна организация железнодорожного транзита контейнеров из северо-восточных районов Китая через порты Республики Корея с последующей перегрузкой на морские суда и доставкой их в южные районы Китая. Реализация данных логистических схем доставки приведет к увеличению объемов перевалки грузов и контейнеров в железнодорожно-морских транспортных узлах. Порт Пусан является наиболее крупным в Республике Корея и конкурентоспособным среди морских портов стран Азиатско-Тихоокеанского региона.

Порт Пусан Республики Корея в 2019 г. занял шестое место в мире по объему переработки контейнеров [2] и первое место среди стран, которые не относятся к «Большому Китаю» (Континентальный Китай, включая Гонконг, Макао, Тайвань и соседние острова, а также Сингапур и Малайзия). Транспортный узел Пусан включает в себя два морских порта – действующий порт Пусан и Новый порт Пусан, строительство которого было завершено в 2010 г., а также соответствующую железнодорожную инфраструктуру [1]. Новый порт Пусан предназначен только для переработки контейнеров. Значительная часть контейнерных перевозок из порта Пусан была передислоцирована в Новый порт Пусан, обработка которых в 2019 г. составила 68,3 % от общего контейнеропотока транспортного узла Пусан. В частности, на этапе планирования Новый порт Пусан расширил свою железнодорожную инфраструктуру для повышения эффективности взаимодействия порта и железной дороги. Несмотря на завершение строительства Нового порта Пусан в 2019 г. удельный вес завоза и

вывоза контейнеров железнодорожным транспортом в порт Пусан (включая Новый порт Пусан) составляет не более 7 % (таблица 1), так как значительный грузопоток поступает в порт Пусан автомобильным транспортом от мест производства продукции [2].

Таблица 1 – Завоз и вывоз контейнеров в порт Пусан по видам транспорта (тыс. TEU и %)

Вид транспорта	Год						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Всего	8938	9254	9363	9620	10215	10233	10354
Автотранспорт	8088 (90,5)	8465 (91,5)	8614 (92,0)	8969 (93,2)	9555 (93,5)	9552 (93,3)	9694 (93,6)
Железная дорога	846 (9,5)	789 (8,5)	749 (8,0)	651 (6,8)	631 (6,2)	681 (6,7)	660 (6,4)
Морской транспорт	4 (0,0)	–	–	–	29 (0,3)	–	–

Из данных таблицы 1 видно, что с 2013 г. удельный вес перевозок контейнеров железнодорожным транспортом снижается и за семь лет объемы железнодорожных перевозок сократились на треть – с 9,5 до 6,4 %. Такая отрицательная динамика характерна не только для порта Пусан, но и в целом для всей Республики Корея, что связано с наличием ряда проблем, в первую очередь с недостаточным развитием железнодорожной инфраструктуры и политикой логистических перевозок в стране, осуществляемых в основном автомобильным транспортом [3].

В странах с небольшой территорией, таких как Республика Корея, эффективна перевозка автомобильным транспортом, который имеет высокую доступность, мобильность и развитую сеть автомобильных дорог, которая охватывает даже отдаленные горные районы республики. Перспективным направлением развития железнодорожной инфраструктуры является открытие железнодорожного сообщения между Южной и Северной Кореей, что может привести к росту объемов перевалки и перевозки грузов, поэтому актуальным исследованием является решение вопросов технологического взаимодействия морского и железнодорожного транспорта в условиях увеличения грузо- и контейнеропотоков [4].

Инфраструктура. Новый порт Пусан включает в себя три причала на северном контейнерном терминале и два причала на южном контейнерном терминале, а также универсальный терминал. Каждый причал порта принадлежит определенной транспортной компании. Припортовая железнодорожная станция Нового порта Пусан расположена в 6 км к северу от Нового порта Пусан, станция осуществляет прием и отправку магистральных поездов, формирует передаточные поезда на станцию Букчолсонгжанг, которая расположена на северной погрузочно-разгрузочной площадке, и на станцию Намчолсонгжанг, которая находится на южной погрузочно-разгрузочной площадке (см. рисунок 1).



Рисунок 2 – Схема расположения станций в Новом порту Пусан

В состав грузового обустройства железнодорожной станции, обслуживающей грузовые районы Нового порта Пусан, входят контейнерная площадка, универсальный склад (3520 кв. м), грузовые площадки, а также перегружочный кран и автопогрузчик контейнеров. В настоящее время контейнерная площадка и склад тарно-штучных грузов, которые обустроены на железной дороге, в основном ориентированы на организацию перевозок автотранспортом [3]. Станция Нового порта Пусан принадлежит республиканской железной дороге и включает в себя такие пути: два главных, четыре приемоотправочных, четыре вытяжных и сорок два сортировочных (рисунок 3). Техническое развитие железнодорожной станции Нового порта Пусан позволяет принимать, отправлять и обрабатывать поступающие поезда, имея достаточный резерв пропускной способности.

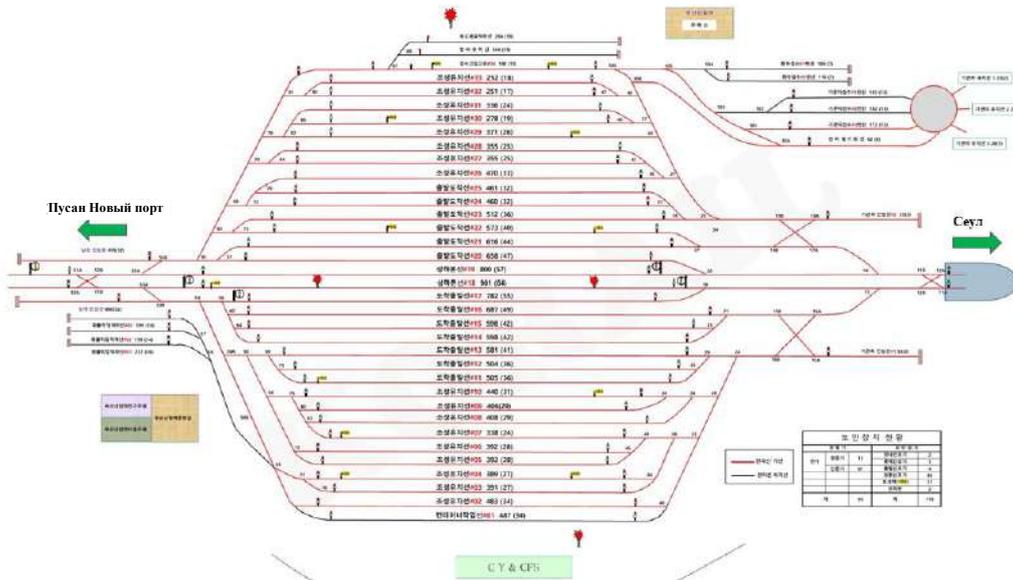


Рисунок 3 – Схема путевого развития станции, обслуживающей Новый порт Пусан

Передаточные поезда, прибывающие со станции Нового порта Пусан на станции Букчолсонгжанг (рисунок 4) и Намчолсонгжанг (рисунок 5), расформировываются с расстановкой вагонов на путях приемоотправочных парков.

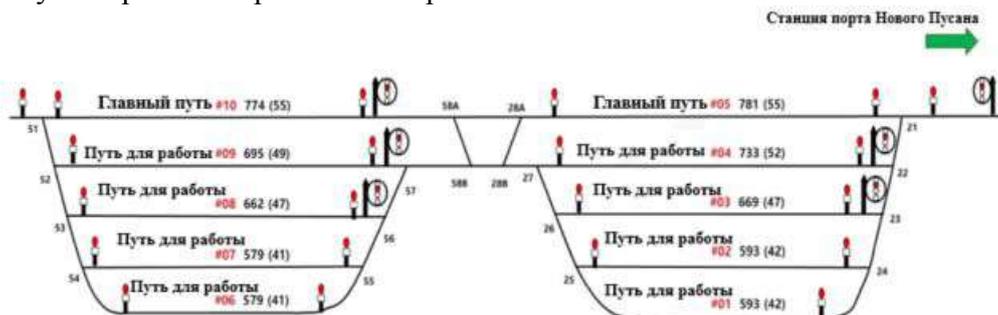


Рисунок 4 – Схема станции Букчолсонгжанг



Рисунок 5 – Схема станции Намчолсонгжанг

Контейнеры выгружаются на площадку для временного хранения или перегружаются по «прямому варианту» на внешний автотранспорт для доставки на причалы порта и загрузки судна. Порожние вагоны загружаются контейнерами и отправляются на станцию Нового порта Пусан [4].

Железнодорожная станция Букчолсонгжанг включает в себя десять железнодорожных путей, из которых два главных и восемь сортировочных путей. Длина путей составляет от 579 до 733 м, что делает возможным принять передаточный поезд составом от 41 до 52 вагонов [5].

Станция Намчолсонгжанг включает в себя главный путь и три сортировочных пути. Длины путей составляют 565 – 569 м, поэтому можно принимать поезда составом 40 вагонов. Железнодорожные станции Букчолсонгжанг и Намчолсонгжанг принадлежат различным владельцам железнодорожной инфраструктуры, что приводит к технологическим трудностям в процессе организации взаимодействия железнодорожного и морского транспорта.

Характеристика инфраструктуры станций Нового порта Пусан, Букчолсонгжанг и Намчолсонгжанг приведена в таблице 2 [6].

Таблица 2 – Характеристика логистической инфраструктуры на станциях Нового порта Пусан Букчолсонгжанг и Намчолсонгжанг

Станция	Общая площадь	Количество ж.-д. путей	Количество перерабатываемых контейнеров (год)	Суточная пропускная способность, ваг.	Наименование и количество погрузочно-разгрузочного оборудования
Новый порт Пусан	184365 м ²	52	–	–	Один ричстакер
Букчолсонгжанг	64020 м ²	10	573 000	960	Четыре козловых крана
Намчолсонгжанг	54950 м ²	4	240 000	628	Два козловых крана

Железнодорожная станция Нового порта Пусан является промежуточным звеном доставки контейнеров, конечным пунктом назначения являются станции Букчолсонгжанг и Намчолсонгжанг. Поэтому станция Нового порта Пусан имеет развитую железнодорожную инфраструктуру для выполнения работ по организации движения контейнерных поездов между Новым портом Пусан и другими городами.

Железнодорожный участок между станцией Нового порта Пусан и погрузочно-разгрузочными контейнерными терминалами порта не является электрифицированным, поэтому маневровый тепловоз выполняет перемещения составов на погрузочно-разгрузочные площадки станций Букчолсонгжанг и Намчолсонгжанг. Состояние движения поездов между станцией Нового порта Пусан и станциями Букчолсонгжанг и Намчолсонгжанг приведено в таблице 3 [6].

Таблица 3 – Система организации движения поездов в транспортном узле Пусан

Участок	Расстояние, км	Среднее время хода, мин	Средняя скорость движения поезда, км/ч	Суточное количество поездов (Сеул – порт Сеул)	Средний состав поезда, ваг.
Станция Новый порт Пусан – станция Букчолсонгжанг	5,8	6	60	15	33
Станция Новый порт Пусан – станция Намчолсонгжанг	7,7			7	

Средний состав передаточного поезда – 33 вагона, и на каждой платформе находятся два 20-футовых контейнера или один 40-футовый контейнер.

Представленная характеристика грузовых устройств и железнодорожной инфраструктуры для обслуживания причалов Нового порта Пусан показывает ограниченность пропускной способности системы «железная дорога – морской порт», что негативно сказывается на технологических процессах передачи контейнеров с одного транспорта на другой при транспор-

тировке, в свою очередь это приводит к оттоку крупных грузоотправителей с железнодорожного транспорта и переходу на доставку автомобильным транспортом. Автомобилизация и расширение городской агломерации южнокорейской республики достигают критических показателей [3], региональные власти заинтересованы в переориентации части перевозок с автотранспорта на железную дорогу.

В настоящее время существует три основных проблемы взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в узле Пусан.

1. Железнодорожные станции и причалы морского порта транспортного узла Пусан принадлежат разным транспортным компаниям, между ними возникает конкурентная среда, что приводит к неравномерной загрузке транспортной и грузовой инфраструктуры. Станция Намчолсонгжанг находится от станции, обслуживающей Новый порт Пусан, на два километра дальше, чем станция Букчолсонгжанг, что увеличивает транспортные расходы на 1020 вон (\$1) за доставку одного контейнера, а это снижает его востребованность у грузовладельцев [5].

2. Станция Букчолсонгжанг предназначена для обслуживания трех причалов Нового порта Пусан, но только на втором причале имеется погрузочно-разгрузочная железнодорожная площадка. Для завоза и вывоза контейнеров с первого и третьего причалов используется погрузочно-разгрузочная площадка второго причала, поэтому для перевозок контейнеров между терминалами используется грузовой автотранспорт [6].



Рисунок 6 – Схема расположения контейнерных причалов в Новом порту Пусан

3. Железнодорожная станция и каждый терминал на причалах Нового порта Пусан принадлежат разным компаниям, поэтому территории терминалов огорожены, для перемещения контейнеров используется не внутртерминальная техника, а внешний транспорт. Грузовой автотранспорт осуществляет перемещение контейнеров между терминалами, в том числе для погрузки и выгрузки на железнодорожный транспорт [5, 6].

Южная погрузочно-разгрузочная железнодорожная площадка (станция Намчолсонгжанг) находится за пределами причалов порта Пусан, поэтому для перемещения контейнеров между четвертым и пятым причалами также используется внешний транспорт. Процесс перемещения контейнеров внешним автотранспортом между грузовой площадкой железнодорожного транспорта и терминалами порта осложняет технологию переработки контейнеров, увеличивает время и затраты на транспортировку и, как следствие, отсутствует эффективное технологическое взаимодействие порта и железной дороги, что приводит к низкой заинтересованности грузовладельцев в использовании железнодорожного транспорта для перевозки контейнеров [7].

В условиях предстоящего увеличения объемов работы по перевалке грузов и контейнеров с железнодорожного на морской транспорт и обратно необходимо изменение существующей

ющей технологии взаимодействия транспорта в системе «станция – порт» с учетом приема и отправки контейнеров автомобильным транспортом, а также усиление железнодорожной и терминальной инфраструктуры порта [8]. Немаловажной проблемой является расположение транспортных узлов в крупных населенных пунктах республики, что существенно снижает возможности по развитию как железнодорожной, так и портовой инфраструктуры. Поэтому увеличение перерабатывающей способности логистической системы «станция – порт» является сложной многофакторной задачей [9], включающей в себя комплекс разнообразных мероприятий, представленный в таблице 4.

Таблица 4 – Возможные направления развития перерабатывающей способности объектов транспортного узла Пусан

Направление развития	Объект		
	Железнодорожная станция	Морской порт	Система «станция – порт»
Инфраструктурное	Строительство дополнительных путей	Расширение территории порта	Создание «сухого порта» [10]
	Приобретение или аренда дополнительных локомотивов для маневровой работы	Приобретение более производительной погрузочно-разгрузочной техники	Создание большего числа площадок железной дороги
Технологическое	Перераспределение работы станций в узле	Организация единого оператора терминалов порта	Организация узлового транспортно-логистического центра
	Увеличение количества контейнеров на подвижном составе	Привлечение большего числа автомобилей для перемещения контейнеров между площадкой железной дороги и терминалами порта, а также между терминалами	
Организационное	Изменение системы подачи-уборки вагонов	Применение единой тарифной политики на терминалах порта	Совместное планирование сменно-суточной работы

Развитие перерабатывающей способности логистической системы «станция – порт» зависит от местных условий и, как правило, на первом этапе рассматривается реализация мероприятий организационных и технологических, которые требуют меньших финансовых затрат, и только после исчерпания их возможностей происходит реализация инфраструктурных, более экономически затратных мероприятий [11, 12].

Рассматриваемые направления развития перерабатывающей способности транспортного узла Пусан требуют времени на изменения и перестройку системы взаимодействия участников процесса перевалки контейнеров, а также определения возможности и целесообразности инфраструктурных изменений, срока их реализации на основе прогнозирования перспективных объемов перевозок [13]. Чтобы определить этапность реализации рассматриваемых мероприятий, требуется разработать имитационную модель взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в транспортном узле Пусан в условиях роста контейнеропотока. Данная модель позволит определить предел пропускной способности железнодорожной инфраструктуры и резерв перерабатывающей способности технических средств морского порта.

Для исключения искусственной конкурентоспособности и дисбаланса в загрузке контейнерных терминалов нового порта Пусан необходимо принять организационные решения по унификации тарифа между станцией Нового порта Пусан и станциями Букчолсонгжанг и Намчолсонгжанг. Грузоотправители выбирают терминал для перевалки контейнеров в зависимости от стоимости доставки контейнера железнодорожным транспортом.

Станция Намчолсонгжанг находится за пределами терминалов Нового порта Пусан, терминалы и обслуживающие их железнодорожные станции принадлежат различным владельцам-операторам, перечисленные объекты огорожены, поэтому доставка контейнеров с грузовых площадок железной дороги на терминалы порта осуществляется внешним автотранспор-

том. Завоз и вывоз контейнеров железнодорожным транспортом осуществляется через одну площадку при обслуживании нескольких морских терминалов, необходимо строительство погрузочно-разгрузочных площадок на терминалах с соответствующей железнодорожной инфраструктурой.

Таким образом, в настоящее время для эффективного процесса перевалки контейнеров требуется интеграция системы терминалов порта и погрузочно-разгрузочных площадок, чтобы обеспечить свободный доступ транспорта от станции к каждому причалу Нового порта Пусан.

Республика Корея в основном сосредоточена на развитии внутренней логистики и до сих пор не имеет опыта международных железнодорожных перевозок. Реализация проекта Транскорейской железнодорожной магистрали может кардинально изменить транспортные схемы Северо-Восточной Азии, но этот проект зависит от решения политических проблем между Северной и Южной Кореей [14].

Южная Корея совместно с партнерами из КНДР и Российской Федерации намерена начать реализацию транспортно-логистического проекта «Хасан (РФ) – Туманган – Раджин» как один из этапов воссоздания Транскорейской железнодорожной магистрали [15]. В рамках данного проекта планируется осуществление железнодорожных перевозок российского угля на приграничную станцию Хасан Приморского края, далее в северокорейский порт Раджин и доставка морским транспортом в Южную Корею и Китай. Соединение Транскореи и Транссиба позволит отправлять контейнерные грузы из южнокорейского порта Пусан в Россию и далее в страны Европы за 17 – 20 сут, при этом доставка контейнеров морским транспортом составляет 45 сут. Ежегодно Южная Корея экспортирует более 600 тыс. контейнеров и переориентация части этого контейнеропотока на Транссиб является экономически эффективным проектом взаимодействием российских и корейских железных дорог [16, 17].

Список литературы

1. Ли, Т. Е. Значение транспортного узла Пусан для транспортного комплекса Республики Корея / Т. Е. Ли. – Текст : непосредственный // Экономика, инновации и научные исследования в транспортном комплексе региона: проблемы и перспективы развития : материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 185 – 189.
2. The Official Website of Busan Metropolitan City: Container statistics of Busan port, Available at: <https://english.busan.go.kr/bsport> (accessed 01 March 2021).
3. Ли, Т. Е. Современное состояние и перспективы развития автомобильного транспорта в Республике Корея / Т. Е. Ли, А. С. Балалаев. – Текст : непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2018. – № 1. – С. 52 – 58.
4. Ли, Т. Е. Исследование существующих грузопотоков транспортного узла Пусан / Т. Е. Ли, А. С. Балалаев. – Текст : непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2020. – № 1. – С. 37 – 42.
5. The Final report on research for establishment of master plan on rearrangement of railroad facilities in Busan and plan of development, 2014, pp. 56 – 57.
6. A study to establish a complex logistics network connecting port-continental railways (TKR, etc.), National Research Council for Economics, Humanities and Social sciences, 2018, 153 p.
7. Белов, А. А. Оценка эксплуатационных характеристик транспортного узла / А. А. Белов, А. Н. Ларин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 1 (21). – С. 102 – 112.
8. Фролов, В. Ф. Процедура выбора предпочтительного сценария развития перевозочно-го процесса / В. Ф. Фролов, В. А. Начигин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 109 – 115.

9. Король, Р. Г. Взаимодействие различных видов транспорта в транспортном узле при наличии терминала «сухой порт» (на примере Владивостокского транспортного узла) : специальность 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Король Роман Григорьевич ; Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II. – Москва, 2015. – 22 с. – Текст : непосредственный.

10. Король, Р. Г. Обоснование целесообразности создания «сухих портов» для эффективного функционирования дальневосточных транспортных узлов / Р. Г. Король, А. В. Дороничев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 1 (33). – С. 130 – 138.

11. Покровская, О. Д. Исследование эволюции транспортных узлов как логистических объектов / О. Д. Покровская. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 2 (30). – С. 146 – 158.

12. Лахметкина, Н. Ю. Логистические взаимодействия в системе «станция – морской порт» / Н. Ю. Лахметкина, И. В. Щелкунова, О. А. Фомичева. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2018. – № 2 (75). – Т. 16. – С. 178 – 187.

13. Ларина, И. В. Управление качеством работы транспортного узла с учетом эксплуатационных характеристик / И. В. Ларина, А. Н. Ларин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 1 (37). – С. 130 – 141.

14. Асаул, М. А. Некоторые аспекты реализации и развития транзитного потенциала в рамках Евразийского экономического союза / М. А. Асаул. – Текст : непосредственный // Экономика и управление. – 2016. – № 6 (128). – С. 4 – 7.

15. Нехорошков, В. П. Транссибирская – Транскорейская магистрали: перспективы развития цифрового формата проекта интеграции / В. П. Нехорошков, Ючжон Ким. – Текст : непосредственный // Вопросы новой экономики. – 2020. – № 2 (54). – С. 35 – 46.

16. Слесарева, В. Ю. Международный опыт развития транспортно-логистической системы на примере Республики Кореи / В. Ю. Слесарева. – Текст : непосредственный // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 12-9. – С. 1709 – 1712.

17. Кугуелова, В. О. Эффективное функционирование международных транспортных коридоров, проходящих по территории Российской Федерации / В. О. Кугуелова, Р. Г. Король. – Текст : непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2017. – Т. 1. – С. 182 – 186.

References

1. Lee T. E. The value of the transport hub of Busan for the transport complex of the Republic of Korea [Znachenie transportnogo uzla Pusan dlja transportnogo kompleksa Respubliki Koreja]. *Jekonomika, innovacii i nauchnye issledovanija v transportnom komplekse regiona: problemy i perspektivy razvitija: materialy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoj konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Economy, innovations and scientific research in the transport complex of the region: problems and prospects of development: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation.). — Khabarovsk, 2017, pp 185 – 189.

2. The Official Website of Busan Metropolitan City: Container statistics of Busan port, Available at: <https://english.busan.go.kr/bsport> (accessed 01 March 2021).

3. Lee T. E., Balalaeв A. S. Modern status and prospects for the development of automobile transport in the Republic of Korea [Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija avtomobil'nogo transporta v Respublike Koree]. *Nauchno-tehnicheskoe i jekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke – Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century*, 2018, no. 1, pp. 52 – 58.

4. Lee T. E., Balalaev A. S. Study of the existing freight traffic of the Busan transport hub [Исследование существующих грузопотоков транспортного узла Пусан]. *Nauchno-tehnicheskoe i jekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke – Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century*, 2020, no. 1, pp. 37 – 42.
5. The Final report on research for establishment of master plan on rearrangement of railroad facilities in Busan and plan of development, 2014, pp. 56 – 57.
6. A study to establish a complex logistics network connecting port-continental railways (TKR, etc.), National Research Council for Economics, Humanities and Social sciences, 2018, 153 p.
7. Belov A. A., Larin A. N. Assessment of operational characteristics of transport knot [Оценка эксплуатационных характеристик транспортного узла]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1 (21), pp. 102 – 112.
8. Frolov V. F., Nachigin V. A. Preferred selection procedure scenario development transportation process [Процедура выбора предпочтительного сценария развития перевозочного процесса]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 1 (17), pp. 109 – 115.
9. Korol R. G. *Vzaimodeistvie razlichnykh vidov transporta v transportnom uzle pri nalichii terminala «sukhoi port» (na primere Vladivostokskogo transportnogo uzla)* (The interaction of different modes of transport in transport in the presence of the terminal «dry port» (on the example of Vladivostok transport hub). Ph. D. thesis abstract. Moscow, MIIT, 2015, 22 p.
10. Korol R. G., Doronichev A. V. [Обоснование целесообразности создания «сухих портов» для эффективного функционирования дальневосточных транспортных узлов]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 1 (33), pp. 130 – 138.
11. Pokrovskaya O. D. The study of the evolution of transport hubs as logistics facilities [Исследование эволюции транспортных узлов как логистических объектов]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 2 (30), pp. 146 – 158.
12. Lakhmetkina N. Yu., Shchelkunova I. V., Fomicheva O. A. Logistics interaction within the system of rail station and sea port [Логистические взаимодействия в системе «станция – морской порт»]. *Mir transporta – World of Transport and Transportation*, 2018, no. 2 (75), vol. 16, pp. 178 – 187.
13. Larina I. V., Larin A. N. Manage quality of work of transport node given operating characteristic [Управление качеством работы транспортного узла с учетом эксплуатационных характеристик]. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 1 (37), pp. 130 – 141.
14. Asaul M. A. Aspects of the realization and development of transit capacity within the eurasian economic union. logistic map of transportation routes [Некоторые аспекты реализации и развития транзитного потенциала в рамках Евразийского экономического союза]. *Jekonomika i upravlenie – The Journal «Economics and Management»*, 2016, no. 6 (128), pp. 4 – 7.
15. Nekhoroshkov V. P., Kim Yuchzhong. Trans-Siberian and Trans-Korean railways: prospects for the development of a digital framework for their integration project [Транссибирская - Транскорейская магистрали: перспективы развития цифрового формата проекта интеграции]. *Voprosy novoj jekonomiki – The Journal Issues of new economy*, 2020, no. 2 (54), pp. 35 – 46.
16. Slesareva V. U. International experience in the development of transport and logistics system in the case of the Republic of Korea [Международный опыт развития транспортно-логистической системы на примере Республики Кореи]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij – The International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 12-9, pp. 1709 – 1712.
17. Kuguelova V. O., Korol R. G. Effective functioning of international transport corridors passing through the territory of the Russian Federation [Эффективное функционирование международных транспортных коридоров, проходящих по территории Российской Федерации]. *Nauchno-tehnicheskoe i jekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke – Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century*, 2017, no. 1, pp. 182 – 186.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ли Тэк Енг

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

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

Аспирант кафедры «Технология транспортных процессов и логистика», ДВГУПС.

Тел.: +7 (999) 794-40-51.

E-mail: emyhoo21@nate.com

Король Роман Григорьевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортных процессов и логистика», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ли, Т. Е. Развитие транспортного узла Пусан для организации транскорейских железнодорожных перевозок / Т. Е. Ли, Р. Г. Король. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 122 – 133.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lee Taek Young

Far Eastern State Transport University (FESTU).

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

Postgraduate student of the department «Technology of Transport Processes and Logistics», FESTU.

Phone: +7 (999) 794-40-51.

E-mail: emyhoo21@nate.com

Korol Roman Grigorievich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technology of Transport Processes and Logistics», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lee T. Y., Korol R. G. Busan transport hub development for trans-korean railway transportation. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 1 (45), pp. 122 – 133 (In Russian).

УДК 621.8.035

А. Ю. Финиченко, М. В. Глухова, С. В. Глухов

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Аннотация. В статье рассматривается вопрос применения и использования теплонасосных установок как низкопотенциального источника тепловой энергии для обеспечения потребителей тепловой энергией в системе отопления здания. На сегодняшний день одним из экологичных и экономичных альтернативных источников тепловой энергии является теплонасосная установка. Использование данных устройств позволит сократить выбросы CO₂. Перечислены основные преимущества и недостатки, появляющиеся при эксплуатации тепловых насосов. По результатам испытаний котлов, использующих органические виды топлива (уголь, мазут, природный газ), и низкопотенциальных источников тепла с электроприводом построены зависимости коэффициента трансформации тепла теплового насоса и КПД котлов, работающих на органических видах топлива, от затрат условного топлива на единицу отпущенной энергии. Определен коэффициент трансформации тепла теплонасосных установок в интервале изменения рабочих параметров $3,0 < \mu < 5,0$. Построен график зависимости коэффициента преобразования энергии от температуры теплоносителя в системе отопления и температуры окружающей среды. Предложена принципиальная схема присоединения теплонасосной установки в систему отопления здания. Проведены исследования в период с первого по 21 апреля 2021 г. в лабораторной аудитории учебного корпуса ОмГУПСа и зафиксированы показания основных параметров работы теплонасосной установки с тепловым насосом Vitocal 242-S. По полученным результатам основных параметров рассчитаны тепловая нагрузка на систему отопления помещения, температура теплоносителя в подающем трубопроводе, величина потребляемой электроэнергии тепловым насосом, коэффициент преобразования COP. Оценены оптимальные значения для данной теплонасосной установки при заданных режимах работы.

Ключевые слова: теплонасосная установка, тепловая энергия, экология, коэффициент преобразования.

Aleksandra U. Finichenko, Maria V. Glukhova, Sergey V. Glukhov

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

USE OF HEAT PUMP PLANTS TO PROVIDE CONSUMERS WITH THERMAL ENERGY

Abstract. The article deals with the application and use of heat pump installations as a low-potential source of heat energy to provide consumers with heat energy in the building heating system. Today, one of the most environmentally friendly and economical alternative sources of thermal energy is a heat pump unit. The use of these devices will reduce CO₂ emissions. The main advantages and disadvantages that appear during the operation of heat pumps are listed. Based on the results of tests of boilers using organic fuels (coal, fuel oil, natural gas) and low-potential heat sources with an electric drive, the dependences of the heat transformation coefficient of the heat pump and the efficiency of boilers operating on organic fuels on the cost of conventional fuel per unit of released energy are constructed. The coefficient of heat transformation of heat pump installations in the range of changes in operating parameters $3,0 < \mu < 5,0$ is determined. A graph of the dependence of the energy conversion coefficient on the temperature of the heat carrier in the heating system and the ambient temperature is constructed. A schematic diagram of the connection of a heat pump installation to the building heating system is proposed. Studies were conducted in the period from April 1 to April 21, 2021 in the laboratory auditorium of the educational building of OmGUPSa and the readings of the main parameters of the operation of the heat pump unit with the Vitocal 242-S heat pump were recorded. Based on the results of the main parameters, the following are calculated: the thermal load on the room heating system; the temperature of the coolant in the supply pipeline; the amount of electricity consumed by the heat pump; the conversion coefficient of the COP. The optimal values for this heat pump unit under the specified operating modes are estimated.

Keywords: heat pump unit, thermal energy, ecology, conversion factor.

Одним из основных источников загрязнения являются различного рода электростанции. Например, ТЭЦ средней мощности в течение часа выбрасывает в атмосферу около 7 млн м³ газа, содержащего в себе 2500 т углекислого газа, 40 т сернистого ангидрида, 10 т оксидов азота и др. Все это крайне негативно сказывается на экологии нашей планеты.

Альтернативные источники энергии позволяют сократить выброс вредных веществ в атмосферу или вовсе избежать их. Но не все такие источники имеют высокий коэффициент полезного действия: ветряные мельницы (самая мощная – до 1550 МВт, средние – 80 – 100 МВт), гидроэлектростанции (малые – 5 МВт, средние – до 25 МВт и крупные – от 25 МВт), различные геотермальные источники относительно экологичны (элементы и соединения можно использовать в химической промышленности) – от 3000 МВт в США и до 500 МВт в Японии), солнечные панели (как на принципе фотоэффекта, так и на разогреве воды), солнечные коллекторы (мощность зависит от рабочей площади, в среднем дневная сумма солнечного излучения составляет 4 – 6 кВт·ч/м²).

В настоящее время одним из экологичных и экономичных альтернативных источников тепловой энергии является теплонасосная установка (ТНУ). Использование данных устройств позволит сократить выбросы CO₂, а следовательно, и уменьшить парниковый эффект планеты. Средний КПД ТНУ составляет около 67 %, и у ТНУ нулевой выброс вредных веществ в атмосферу [1].

Рабочий процесс ТНУ состоит в следующем. Источник низкопотенциального тепла (грунт, грунтовые воды, воздух) передает тепло рабочему телу теплового насоса (незамерзающая жидкость с низкой температурой кипения), при этом охлаждаясь на несколько градусов. При циркуляции по контуру жидкость вновь получает тепло от низкопотенциального источника тепла и нагревается на несколько градусов, и цикл нагрева рабочего тела теплового насоса повторяется. Получив тепло, рабочее тело теплового насоса испаряется, так как имеет низкую температуру кипения. Полученный газ сжимается компрессором теплового насоса, при этом его температура значительно повышается. Далее нагретый газ отдает тепло потребителю (нагрев воды, воздуха, отопительные системы), его температура понижается, в результате чего он конденсируется. Так как давление газа все еще остается высоким, он имеет более высокую температуру конденсации. Далее путем дросселирования давление

конденсата понижается. На выходе жидкость имеет более низкую температуру, чем источник тепла, поэтому цикл повторяется [1, 2].

По результатам испытаний построены зависимости коэффициента трансформации тепла (μ) теплового насоса и КПД котлов, работающих на органических видах топлива (η_k), от затрат условного топлива на единицу отпущенной энергии (b) (рисунок 1).

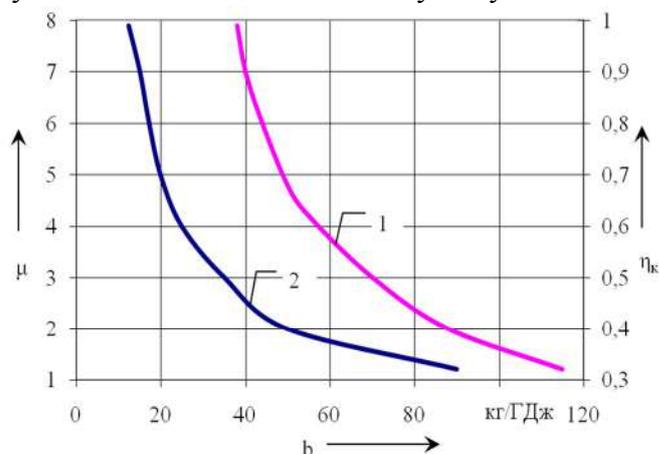


Рисунок 1 – Корреляция удельных затрат условного топлива: 1 – котлы, использующие органические виды топлива (уголь, мазут, природный газ); 2 – низкопотенциальные источники тепла с электроприводом ($\lambda = 0,1; \eta_{эл}^{ТЭС} = 0,37$)

Удельные затраты условного топлива на единицу отпущенной энергии b (см. рисунок 1) определяются по следующим выражениям [3]:

для котлов, использующих органические виды топлива (без учета вторичных затрат электроэнергии на работу дутьевых вентиляторов и шлакоудаления) –

$$b_k = \frac{1}{\eta_k \cdot q}; \quad (1)$$

для ТНУ с электроприводом –

$$b_{т.н} = \frac{1 + \lambda}{\mu \cdot q \cdot \eta_{эл}^{ТЭС}}; \quad (2)$$

где η_k – КПД котлоагрегата;

$q = 29,31$ МДж/кг – количество выделившейся теплоты при полном сгорании массовой единицы вещества;

$\eta_{эл}^{ТЭС}$ – КПД выработанной электроэнергии на ТЭС;

λ – составляющая потерь при передаче электроэнергии от источника до потребителя.

Коэффициент трансформации тепла (коэффициент преобразования энергии)

$$\mu = \frac{Q_{ТНУ}}{(N_{км} + N_{тр})}, \quad (3)$$

где $Q_{ТНУ}$ – выработка тепловой энергии от низкопотенциального источника потребителю, МДж;

$N_{км} + N_{тр}$ – общие затраты электроэнергии на работу компрессора и устройств, обеспечивающих подачу рабочего вещества цикла в испаритель ТНУ.

Как видно из рисунка 1, при коэффициенте трансформации тепла ТНУ в интервале изменения рабочих параметров $3,0 < \mu < 5,0$ затраты условного топлива много меньше, чем у котлов, работающих на твердом топливе. Это связано с тем, что основная часть тепловой энергии, выработанной ТНУ, составляет преобразованная на более высокий температурный уровень тепловая нагрузка некоторых местных альтернативных источников энергии, а также вторичных энергоресурсов (ВЭРов).

Однако тепловая энергетическая эффективность источников малой мощности не должна оцениваться как основной критерий экологической безопасности их использования.

График зависимости коэффициента преобразования энергии от температуры теплоносителя в системе отопления и температуры окружающей среды представлен на рисунке 2. Следует отметить, что при уменьшении необходимой температуры в системе отопления коэффициент преобразования (COP) увеличивается и может достигать значительных показателей, следовательно, будет повышаться эффективность установки. Также можно отметить, что коэффициент трансформации зависит от температуры низкопотенциального источника тепла. Так, например, применение грунтового контура в системе теплонасосной установки в

качестве низкопотенциального источника тепла является наиболее эффективным, так как грунт в отличие от воздуха имеет постоянную температуру выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Тепловой насос может работать при температуре источника (наружного воздуха) до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем чем ниже температура источника тепла, тем ниже эффективность ТНУ. Ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ТНУ работать не может. Это ограничивает применение ТНУ с воздушным контуром в России в зимнее время года. Наиболее эффективным будет применение ТНУ в районах с более высокой среднегодовой температурой.

С точки зрения рациональности наиболее эффективным способом реализации энергии ТНУ является теплый пол, так как он требует наименьшей температуры (около $35 - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$), тогда как фанкойл или радиатор требуют $50 - 55\text{ }^{\circ}\text{C}$. При направлении энергии на теплый пол коэффициент преобразования, или тепловой коэффициент, теплового насоса более высок, чем при использовании фанкойла.

Стоит отметить, что теплонасосная установка является дополнительным устройством, т. е. есть работает совместно с основным источником тепла. Для более эффективной работы основного источника тепла следует правильно выбрать внешний контур ТНУ согласно условиям среды проживания и задать наименьшую комфортную температуру. Положительными характеристиками теплонасосной установки являются ее экологичность и высокая экономичность, так как энергия затрачивается только на привод насоса, а теплота отбирается из восстанавливающихся естественным путем источников [3 – 5].

Для более корректного результата оценки установок по экологической безопасности необходимо учитывать определенные критерии оценки, такие как месторасположение источника выбросов вредных веществ при использовании традиционных видов сырья и используемые виды топлива. Необходимо учитывать также высоты дымовых труб и заселенность ближайших территорий, моральный и физический износ промышленных котлов.

В нашей стране внедрение тепловых насосов носит единичный характер. Тем не менее с каждым годом тепловые насосы занимают более значимые позиции в системах теплоснабжения, успешно конкурируя с традиционными источниками энергии. Сегодня тепловой насос – это готовый продукт, достаточно широко представленный на рынке. В комплект поставки помимо основных технологических блоков входит и контроллер, управляющий работой теплового насоса и системой отопления.

Учитывая отсутствие собственного производства теплонасосного оборудования, отвечающего современным техническим, эксплуатационным и экономическим показателям, и наличие лишь фрагментарного частного использования тепловых насосов, естественно возникает проблема нехватки собственного положительного опыта в данной области. Необходим опыт проектных организаций, касающийся отопления на базе тепловых насосов, подбора теплонасосного оборудования в соответствии с географическими, климатическими и экономическими особенностями конкретных территорий. Отсутствие научных исследований, подкрепленных практическим опытом использования тепловых насосов, не позволяет получить широкомасштабное внедрение тепловых насосов в отечественном топливно-энергетическом комплексе (ТЭК). На привлекательность тепловых насосов в регионе негативно влияют следующие факторы: технологии не адаптированы для климатических условий

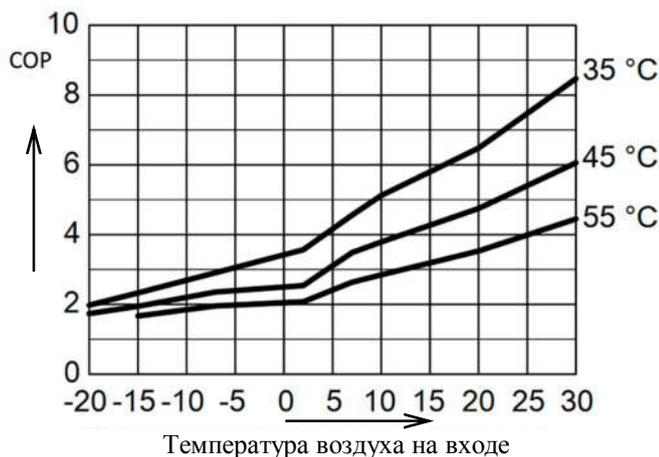


Рисунок 2 – График зависимости коэффициента преобразования энергии от необходимой температуры

Сибири; отсутствие серийных поставок теплонасосного оборудования; отсутствие опыта и конкуренции проектно-изыскательских, строительно-монтажных и пусконаладочных работ в области источников тепла на базе тепловых насосов; не развита система сервиса; невозможна компоновка теплового насоса с традиционной системой отопления.

Для определения коэффициента преобразования COP воздушного теплового насоса в период с 1-го по 21 апреля 2021 г. в лабораторной аудитории учебного корпуса ОмГУПС зафиксированы показания основных параметров работы теплонасосной установки с тепловым насосом Vitocal 242-S (рисунок 3).



Рисунок 3 – Лабораторная теплонасосная установка с тепловым насосом Vitocal 242-S

В результате получены и рассчитаны следующие показатели: тепловая нагрузка на систему отопления помещения, в котором установлен тепловой насос; температура теплоносителя в подающем трубопроводе (τ_1); величина потребляемой электроэнергии, фиксируемая двухтарифным электросчетчиком; коэффициент преобразования COP. Результаты расчета приведены в таблице 1, из данных которой видно, что тепловой насос работает с оптимальным коэффициентом преобразования, который находится в пределах 2,3 – 2,5.

Таблица 1 – Сводная таблица результатов исследования работы теплонасосной установки

Показатель потребления	1-е сутки		10-е сутки		20-е сутки		Среднее за период	
	день	ночь	день	ночь	день	ночь	день	ночь
Эл. энергия, кВт·ч	3,31	3,45	3,40	3,79	3,13	3,28	3,27	3,43
$t_{н. в.}, ^\circ\text{C}$	-5	-8	5	3	-2	-6	-0,67	-3,67
$\tau_1, ^\circ\text{C}$	40	38	36	35	39	38	38,33	37,00
Кол-во тепла $Q_{от}, \text{кВт}$	8	8	8	8	8	8	8	8
Коэффициент преобразования COP	2,42	2,32	2,35	2,11	2,56	2,44	2,44	2,33

Принципиальная схема работы теплонасосной установки, показанной на рисунке 3, в системе отопления здания представлена на рисунке 4. С помощью вентилятора 10 во внешний модуль 9 поступает воздух с температурой окружающей среды. В тепловом насосе 8 осуществляются перенос, трансформация и преобразование тепловой энергии рабочего тела. Нагретая до заданной температуры вода поступает в буферную емкость 5, из верхней части которой горячая вода подается в систему отопления здания, а затем она возвращается в нижнюю часть буферной емкости и далее поступает в тепловой насос для дальнейшего

нагрева. Смесительным краном 2 осуществляется регулирование температуры теплоносителя, поступающего в устройство для обогрева помещения – фанкойл 1.

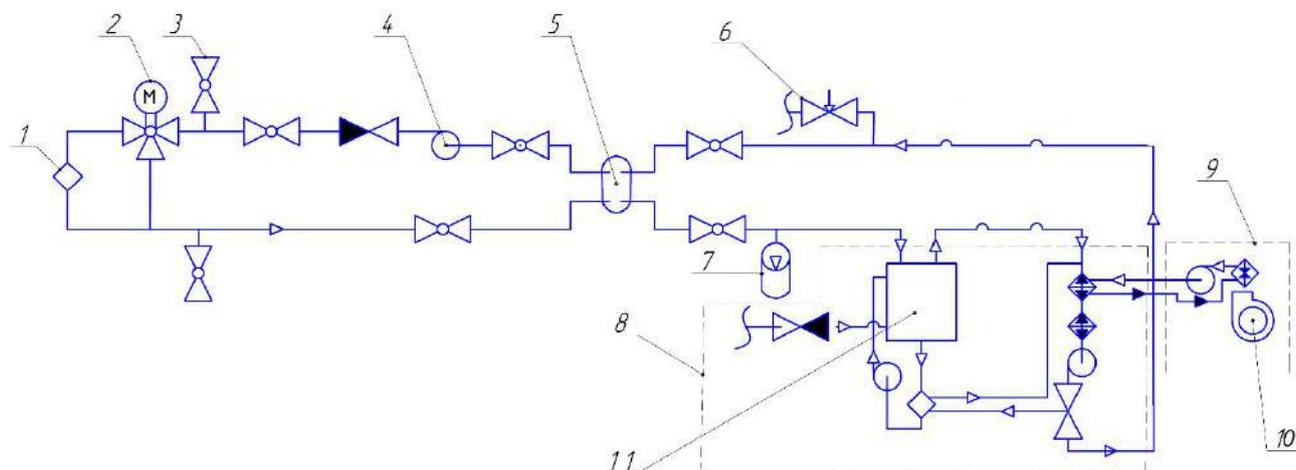


Рисунок 4 – Принципиальная схема работы теплонасосной установки в системе отопления здания:
 1 – фанкойл; 2 – кран смесительный трехходовой; 3 – кран шаровый; 4 – насос циркуляционный; 5 – емкость буферная; 6 – клапан термической разгрузки; 7 – расширительный бак; 8 – внешний модуль;
 9 – насосная станция; 10 – вентилятор; 11 – бойлер

В контуре ТНУ рабочим телом является низкокипящая жидкость. Выбор рабочего тела для эффективной работы теплонасосной установки имеет важное значение. Наиболее приемлем и с высокой производительностью применяется фреон R22, хорошо проявивший себя в теплонасосных установках невысокой мощности при оптимальных температурах конденсации. Возможность рассмотрения его работы ограничивается температурой конденсации в $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ и невысокой критической температуры $t_{кр} = 96,13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Наиболее эффективные преимущества применения фреонов – безвредность, химическая инертность, слабая воспламеняемость и малая взрывоопасность [6].

Для определения эффективности применения теплового насоса в системе отопления здания необходимо опираться на рабочие температуры воды в системе теплоснабжения. При температуре конденсации рабочего вещества R22 в $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ обеспечивается необходимый температурный перепад в $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, который оптимально оправдывает уровень разности температур от рабочего тела к теплоносителю для системы отопления.

Тепловой расчет одноступенчатого теплового насоса для обеспечения необходимой температуры здания сводится к определению основных параметров: количества циркулирующего холодильного агента, теплового потока в конденсаторе и холодопроизводительности ТНУ.

Важнейшим параметром, характеризующим работу ТНУ, является температура в отопительном контуре, отдаваемая конденсатором. Если установка отдает такое же количество тепла, какое отводится от теплоносителя, то температура воды в системе отопления будет постоянной. Однако теплоотток может изменяться, и если теплоотдача останется неизменной, то будет изменяться и температура в системе отопления. Следовательно, температуру в системе отопления надо регулировать, изменяя теплопроизводительность так, чтобы в любой момент соблюдалось равенство между теплопритоком и теплооттоком.

Температура отапливаемого объекта находится в прямой зависимости от температуры теплоносителя в системе отопления отапливаемого объекта. Поэтому температура теплоносителя является основным параметром, характеризующим работоспособность теплонасосной установки.

Важным вопросом рассмотрения применения ТНУ в качестве источника тепла является применение современных аппаратов отопительной системы, например, таких как фанкойл,

чиллер, теплый пол и т. п., температурные значения подаваемой и отводимой воды которых не превышают 50 °С. Типы рекомендованных отопительных систем представлены в таблице 2.

Таблица – 2 Температурные значения подаваемой и отводимой воды в отопительной системе

Тип отопительной системы и температурные значения подаваемой и отводимой воды	Температурный режим, °С	Значения COP
Системы с традиционными радиаторами	60 – 50	2,5
Системы напольного отопления	35 – 30	4,0
Вентиляционно-конвекторные системы	45 – 35	3,5

Как видно из данных таблицы 2, температурный режим подаваемой и отводимой воды в системе отопления здания имеет невысокие значения, что соответствует расчетным показателям теплоотдачи в конденсаторе ТНУ, а коэффициент преобразования энергии COP находится в допустимых значениях, при которых можно рассматривать данный источник низкопотенциальной энергии.

Тепловые насосы обладают определенными преимуществами по сравнению с традиционными способами выработки теплоты для отопления зданий различных назначений в холодных регионах нашей страны. В Омске выбросы промышленных предприятий, в том числе от ТЭЦ и котельных, оказывают значительное негативное воздействие на экологическую обстановку. Повсеместное внедрение тепловых насосов для теплоснабжения нашего региона в значительной мере помогло бы снизить вредное воздействие традиционных генераторов тепловой энергии на атмосферу города. Преимущества тепловых насосов приведены в работах [7, 8].

Экономичность. Тепловые насосы при правильном выборе источника низкопотенциальной энергии оказываются эффективнее, чем любые котлы. Применять их можно повсеместно. Источники энергии для тепловых насосов окружают человека повсюду: воздух, вода, грунт, вторичные стоки и многие другие виды теплоносителей существуют для использования в неограниченном количестве.

Экологичность. Установка не требует сжигания топлива, следовательно, отсутствуют вредные выбросы в окружающую среду. Хладагент, циркулирующий внутри системы, является безопасным и для человека, и для окружающей среды.

Универсальность. Тепловые насосы могут работать как в режиме отопления в зимний период, так и в режиме кондиционирования в летний.

Безопасность. Тепловой насос пожаро- и взрывобезопасен, так как в нем отсутствует теплоноситель, который нагревается до температур, способных вызывать воспламенение.

Недостатки теплонасосных систем – это высокая стоимость оборудования и монтажа для внешних контуров, а также низкая температура нагреваемой воды, идущей к потребителю.

Учитывая темпы малоэтажного строительства в субъектах РФ, можно сделать вывод о повышении применения ТНУ в системе теплоснабжения жилых зданий, что в первую очередь скажется на сокращении вредных выбросов в окружающую среду, а также на экономии использования традиционных видов топлива, таких как газ, уголь и мазут [9, 10].

Одним из основных преимуществ применения тепловых насосов ассоциация ЕНРА (Европейская ассоциация по тепловым насосам) видит в сокращении расхода традиционных (ископаемых) видов топлива, которое в свою очередь приводит к уменьшению выбросов CO₂ в атмосферу. По прогнозам специалистов ассоциации к 2050 г. 75 % отопления в ЕС будет организовано с использованием тепловых насосов.

Список литературы

1. Назмеев, Ю. Г. Теплоэнергетические системы и энергобалансы промышленных предприятий : учебное пособие / Ю. Г. Назмеев, И. А. Конахина. – Москва : Московский энергетический институт, 2002. – 407 с. – Текст : непосредственный.

2. Хайнрих, Г. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения / Г. Хайнрих, Х. Найорк, В. Нестлер; пер. с нем. Н. Л. Кораблевой, Е. Ш. Фельдмана; под ред. Б. К. Янвеля. – Москва : Стройиздат, 1985. – 351 с. – Текст : непосредственный.
3. Осадчий, Г. Б. Солнечная энергия, ее производные и технологии их использования (Введение в энергетику ВИЭ) / Г. Б. Осадчий. – Омск, 2010. – 572 с. – Текст : непосредственный.
4. Лебедев, В. М. Теплоэнергетика региона / В. М. Лебедев. – Омск, 1998. – 102 с. – Текст : непосредственный.
5. Буров, В. Д. Тепловые электрические станции : учебник / В. Д. Буров, Е. В. Дорохов [и др.]; под ред. В. М. Лавыгина, А. С. Седлова, С. В. Цанева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Московский энергетический институт, 2007. – 380 с. – Текст : непосредственный.
6. Вяхирева, Р. И. Экологические аспекты устойчивого развития теплоэнергетики России / Р. И. Вяхирева. – Москва : Ноосфера, 2000. – 76 с. – Текст : непосредственный.
7. Германович, В. Альтернативные источники энергии. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы. – Москва : Наука и техника, 2011. – 320 с. – Текст : непосредственный.
8. Немченко, Н. И. Теплонасосная установка – перспективный источник теплоснабжения поселка / Н. И. Немченко. – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2013. – № 10. – С. 51 – 54.
9. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии / Г. П. Васильев, Л. В. Хрустачев [и др.]. – Москва : Москомархитектура, 2001. – 66 с. – Текст : непосредственный.
10. Использование тепла сухого грунта при работе теплонасосной установки в условиях Сибири / С. Л. Елистратов, Н. Н. Мезенцева [и др.]. – Текст : непосредственный // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2015. – № 1 (16). – С. 90 – 94.

References

1. Nazmееv Y. G. *Teploenergeticheskie sistemy i energobalansy promyshlennykh predpriatii: uchebnoe posobie* (Thermal power systems and energy balances of industrial enterprises: a textbook). Moscow: MPEI Publ., 2002, 407 p.
2. Heinrich G., Nyork H., Nestler V. *Teploonasosnye ustanovki dlia otopleniia i goriachego vodosnabzheniia* (Heat pump units for heating and hot water supply). Moscow: Stroyizdat, 1985, 351 p.
3. Osadchiy G. B. *Solnechnaia energiia, ee proizvodnye i tekhnologii ikh ispol'zovaniia (Vvedenie v energetiku VIE)* (Solar energy, its derivatives and their use technologies (Introduction to renewable energy)). Omsk: PK Mashkeeva E. A. Publ., 2010, 572 p.
4. Lebedev V. M. *Teploenergetika regiona* (Thermal Power of the Region). Omsk: Design studio «Autograph» Publ., 1998, 102 p.
5. Burov V. D. *Teplovye elektricheskie stantsii: uchebnik* (Thermal power stations: textbook). Moscow: MPEI Publishing House, 2007, 380 p.
6. Vyakhireva R. I. *Ekologicheskie aspekty ustoichivogo razvitiia teploenergetiki Rossii* (Ecological aspects of sustainable development of power system of Russia). Moscow: Noosphere Publ., 2000, 76 p.
7. Germanovich V. *Al'ternativnye istochniki energii. Prakticheskie konstruksii po ispol'zovaniiu energii vetra, solntsa, vody, zemli, biomassy* (Alternative energy sources. Practical designs for the use of wind, solar, water, earth, biomass energy). Moscow: Science and Technology Publ., 2011, 320 p.

8. Nemchenko N. I. Heat pump plant – a promising source of heat supply to the village [Теплонасосная установка – перспективный источник теплоснабжения поселка]. *Promyshlennaiia energetika – Industrial Power Engineering*, 2013, no. 10, pp. 51 – 54.

9. Vasil'ev G. P., Khrustachev L. V., Rozin A. G., Abuev I. M., Gornov V. F., Orlov V. O., Vorob'ev N. V. *Rukovodstvo po primeneniuu teplovykh nasosov s ispol'zovaniem vtorichnykh energeticheskikh resursov i netraditsionnykh vozobnovliaemykh istochnikov energii* (Guidelines for the use of heat pumps using secondary energy resources and non-traditional renewable energy sources). Moscow: Moskomarkhitektury Publ., 2001, 66 p.

10. Elistratov S. L. Use of dry soil heat during operation of the heat pump plant in Siberia [Ispol'zovanie tepla sukhogo grunta pri rabote teplonasosnoi ustanovki v usloviakh Sibiri]. *Sovremennaiia nauka: issledovaniia, idei, rezul'taty, tekhnologii – Modern science: research, ideas, results, technologies*, 2015, no. 1 (16), pp. 90 – 94.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Финиченко Александра Юрьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 37-06-23.

E-mail: Finichenko@mail.ru

Глухова Мария Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 37-06-23.

E-mail: marta_omgups@mail.ru

Глухов Сергей Витальевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 37-06-23.

E-mail: svgluk@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Финиченко, А. Ю. Использование теплонасосных установок для обеспечения потребителей тепловой энергией / А. Ю. Финиченко, М. В. Глухова, С. В. Глухов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 133 – 141.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Finichenko Aleksandra Yurevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: Finichenko@mail.ru

Glukhova Maria Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: marta_omgups@mail.ru

Glukhov Sergey Vitalievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: svgluk@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Finichenko A. Yu., Glukhova M. V., Glukhov S. V., Use of heat pump plants to provide consumers with thermal energy. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 1 (45), pp. 133 – 141 (In Russian).

В. Е. Митрохин¹, Н. В. Зиновьев²

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

² Омский государственный технический университет, г. Омск, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАССИВНЫХ РЕТРАНСЛЯТОРОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАДИОСВЯЗИ В СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКЕ

Аннотация. Станционная радиосвязь является неотъемлемой частью технических средств, участвующих в организации безопасного перевозочного процесса. Увеличение мощности сигнала в местах со сложной электромагнитной обстановкой остается актуальным вопросом. Решением этого вопроса может послужить пассивный ретранслятор, поэтому целью данной работы является проверка возможности увеличения уровня мощности сигнала с помощью пассивного ретранслятора.

В статье приведен анализ пассивного ретранслятора, используемого в качестве устройства, которое позволяет повысить качество радиосвязи в местах со сложной электромагнитной обстановкой. Приведены отличия использования пассивного ретранслятора от активных станций ретрансляции.

Произведен анализ существующих методов расчета параметров пассивных ретрансляторов, на их основе произведены моделирование и расчет параметров пассивного ретранслятора для разработки и проведения исследования в реальных условиях на железнодорожной станции. Приведена конструкция, материалы изготовления пассивного ретранслятора, а также схема измерения в реальных условиях.

Исследование основано на теоретических расчетах, проверке работоспособности в реальных условиях и сравнении полученных результатов. В результате проведенного исследования установлено, что применение пассивного ретранслятора в сложной электромагнитной обстановке позволяет повысить уровень мощности сигнала, тем самым повысить устойчивость радиосвязи.

Отмечена необходимость доработки существующего метода расчета пассивного ретранслятора, поскольку приведенная методика использовалась при расчете пассивных ретрансляторов на большие расстояния. Предложен вариант крепления пассивных ретрансляторов без разработки и установки дополнительных новых сооружений и показана необходимость организовать в дальнейшем защиту от перенапряжений.

Полученные результаты будут полезны при разработке новых радиорелейных линий связи и модернизации существующих для мест со сложной электромагнитной обстановкой и пересеченной местности.

Ключевые слова: диверторная антенна, зона неуверенного приема, активный и пассивный ретрансляторы, экранирование.

Valery E. Mitrokhin¹, Nikolai V. Zinoviev²

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

²Omsk State Technical University, Omsk, the Russian Federation

THE USE OF PASSIVE REPEATERS TO IMPROVE RADIO COMMUNICATIONS IN COMPLEX ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT

Abstract. Station radio communication is an integral part of the technical means involved in the organization of a safe transportation process. Increasing the signal power in places with a complex electromagnetic environment remains an urgent issue. A passive repeater can serve as a solution to this issue, therefore the purpose of this work is to test the possibility of increasing the signal power level using a passive repeater.

The article provides an analysis of a passive repeater used as a device that improves the quality of radio communications in places with a difficult electromagnetic environment. The differences between the use of a passive repeater and active relay stations are given.

An analysis of the existing methods for calculating the parameters of passive repeaters was carried out, on their basis, modeling and calculation of the parameters of a passive repeater were carried out for the development and conduct of research in real conditions at a railway station. The design, materials of manufacture of the passive repeater, as well as the measurement scheme in real conditions are presented.

The study is based on theoretical calculations and performance checks in real conditions and comparison of the results obtained. As a result of the study, it was found that the use of a passive repeater in a complex electromagnetic environment makes it possible to increase the signal power level, thereby increasing the stability of radio communication.

It was noted that it is necessary to refine the existing method for calculating a passive repeater, since the above technique was used when calculating passive repeaters over long distances. A variant of fastening passive repeaters without the development and installation of additional new structures is proposed, the need to organize further protection against overvoltage is indicated.

The results obtained will be useful in the development of new radio relay communication lines and the modernization of existing ones for places with a difficult electromagnetic environment and rough terrain.

Keywords: *divertor antenna, zone of uncertain reception, active and passive repeaters, shielding.*

В сети связи ОАО «РЖД» неотъемлемой частью является оперативное и бесперебойное управление потоками подвижных составов. Это достигается устойчивой работой сети поездной радиосвязи (ПРС). Повышение качества связи и вычислительной техники ОАО «РЖД» затрагивает не только внедрение нового оборудования, систем и устройств, но и улучшение имеющихся, что приводит к уменьшению эксплуатационных расходов и повышению безопасности перевозочного процесса.

В настоящее время происходит увеличение длины подвижного состава (больше 100 вагонов), что превышает 1500 м, которые экранируют действие датчиков и переносных радиостанций. Радиорелейные линии приобретают все большее значение в системе связи. Поэтому работам, имеющим своей целью дальнейшее усовершенствование и повышение рентабельности радиорелейных линий, уделяется большое внимание. Основные направления этих работ следующие: уменьшение затрат на строительство и эксплуатацию линий, увеличение числа каналов при минимальных затратах, повышение надежности работы, увеличение помехозащищенности радиорелейных линий и уменьшение помех, создаваемых ими другим радиотехническим сооружениям. Указанные направления работ реализуются путем соответствующей модернизации приемопередающей аппаратуры – широкое внедрение полупроводников, применение интегральных схем, автоматизация промежуточных станций, рациональное использование сдвоенного приема, усовершенствование методов коррекции искажений, снижение уровня интерференционных шумов и т. д.

Одним из эффективных средств решения задач, перечисленных выше, а также ряда других задач является замена части ретрансляционных промежуточных станций радиорелейной линии пассивными приемопередающими станциями, так называемыми пассивными ретрансляторами. Пассивные ретрансляторы отличаются от активных станций ретрансляции тем, что на них отсутствует какая-либо приемопередающая аппаратура, а прием и передача сигналов осуществляются перенаправлением потоков энергии от антенн базовых станций. Применение пассивных ретрансляторов позволяет решать не только задачу строительства линий на сильно пересеченной местности, а также ряд других задач, из которых можно отметить следующие: применение на активных станциях очень низких опор для установки антенн, увеличение коэффициента усиления антенн, повышение помехозащищенности радиорелейных линий [1 – 5].

Пассивные ретрансляторы успешно применялись на магистральных участках радиорелейной связи в СССР и ближнего зарубежья. Основные работы по этому направлению отражены в книге Г. З. Айзенберга [1]. Недостатком использования описанных ретрансляторов является то, что ретрансляторы должны иметь большую площадь.

Целью данной работы является увеличение дальности связи при использовании пассивных ретрансляторов. Основная задача работы – разработка пассивного устройства, позволяющего повысить качество сигнала в точке неуверенного приема.

На рисунке 1 показаны активные станции, находящиеся в зоне прямой видимости. Мощность сигнала на входе аппаратуры пункта В рассчитывается по формуле [1]

$$P_B = P_A \frac{\lambda^2 G_A G_B \eta_A \eta_B}{(4\pi)^2 D^2}, \quad (1)$$

где P_A – мощность передатчика пункта А;

λ – длина волны;

G_A и G_B – коэффициенты усиления антенн А и В;
 η_A и η_B – коэффициенты полезного действия антенно-фидерных трактов станций А и В;
 D – расстояние между станциями А и В.

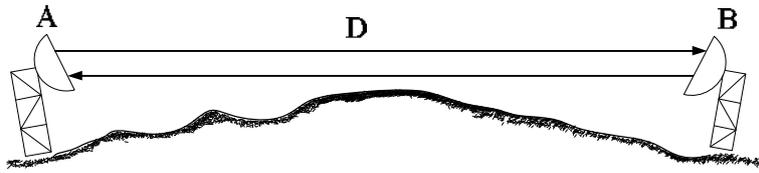


Рисунок 1 – Схема радиолинии активных станций в прямой видимости

Если активные станции А и В не находятся в прямой видимости, как показано на рисунке 2, то для осуществления связи между ними устанавливается пассивный ретранслятор P .

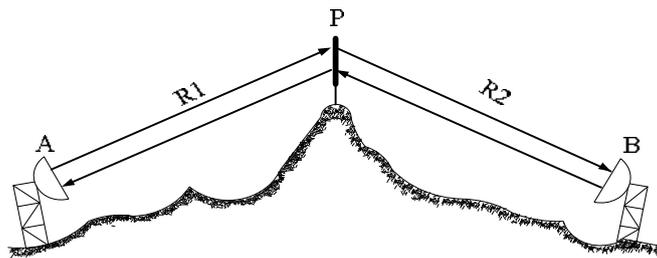


Рисунок 2 – Схема радиолинии с установленным пассивным ретранслятором P между активными станциями А и В

Для определенности будем считать, что ретранслятор P находится в ближней зоне обеих активных станций. Обозначим через R_1 и R_2 расстояния от пассивного ретранслятора до станций А и В соответственно.

Тогда на выходе P пассивного ретранслятора мощность сигнала рассчитывается так:

$$P_P = P_A \frac{\lambda^2 G_A G_P \eta_A}{(4\pi)^2 R_1^2}, \quad (2)$$

где G_P – коэффициент усиления пассивного ретранслятора.

Мощность сигнала P_B на входе аппаратуры станции В можно выразить через отраженную мощность P_P пассивного ретранслятора следующим образом:

$$P_B = P_P \frac{\lambda^2 G_P G_B \eta_B \eta_P}{(4\pi)^2 R_2^2}, \quad (3)$$

где P_P – отраженная мощность пассивного ретранслятора;

η_P – коэффициент полезного действия пассивного ретранслятора P .

Это выражение можно привести к виду:

$$P_B = P_A \frac{\lambda^4 G_A G_B G_P \eta_A \eta_B \eta_P}{(4\pi)^4 R_1^2 R_2^2} = P_A \frac{\lambda^2 G_A G_B \eta_A \eta_B}{(4\pi)^2 (R_1 + R_2)^2} V^2, \quad (4)$$

где $V = \frac{\lambda \sqrt{G_P \eta_P}}{4\pi R_1 R_2} (R_1 + R_2)$ – множитель ослабления.

Эффективная площадь поверхности антенны $F_{эфф}$ вычисляется по формуле [3]

$$F_{эфф} = \frac{P}{\Pi}, \quad (5)$$

где P – максимально возможная мощность, выделяемая в нагрузке;

Π – плотность потока мощности плоской волны в месте расположения антенны.

Во многих случаях оказывается целесообразным оценивать эффективность пассивного ретранслятора коэффициентом уменьшения сигнала γ [1]. Этот коэффициент определяется как отношение напряженности поля на пролете с пассивным ретранслятором к напряженности поля на открытом пролете стандартной протяженности $R_{ст}$ [1]:

$$\gamma = \frac{F_{эфф} R_{ст} \sqrt{\eta_p}}{\lambda R_1 R_2}. \quad (6)$$

Величина γ характеризует изменение уровня сигнала при использовании на трассе пассивного переизлучателя относительно типового для используемого радиорелейной системой уровня сигнала.

Если на пролете с пассивным переизлучателем допускается по тем или иным причинам определенное уменьшение уровня сигнала, необходимая величина эффективной поверхности ретранслятора $F_{эфф}$ рассчитывается так [1]:

$$F_{эфф} = \frac{\lambda R_1 R_2}{R_{ст} \sqrt{\eta_p}} \gamma. \quad (7)$$

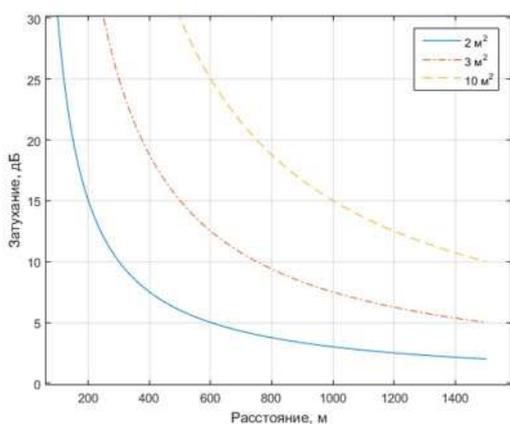


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента γ от длины пролета D_p при длине волны $\lambda = 1,963$ м при разных значениях $F_{эфф}$

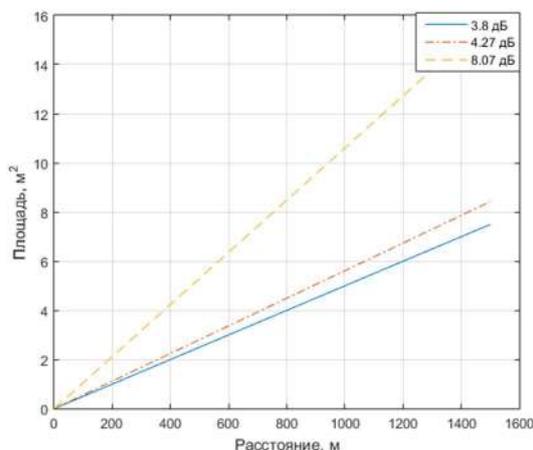


Рисунок 4 – График зависимости необходимой площади антенн ретранслятора от длины пролета D_p при длине волны $\lambda = 1,973$ м

По формуле (5) построим графики при различных значениях $F_{эфф}$. На рисунке 3 приведена зависимость коэффициента γ от длины пролета $D_p = R_1 + R_2$. Расчет производился для длины волны $\lambda = 1,963$ м, поскольку при проведении исследования на станции использовалась антенна, передающая на частоте 152,8 МГц, что соответствует 1,963 м.

Для наглядности расчет произведен для нескольких площадей пассивного ретранслятора. Расчет проводился для случая при $\eta_p = 1$, $R_{ст} = 1,5$ км.

В соответствии с графиком, изображенным на рисунке 3, можно сделать выводы о том, что на расстоянии 750 м с использованием пассивного ретранслятора с площадью 2 м² можно получить увеличение сигнала на 4 дБ.

На рисунке 4 приведена зависимость необходимой площади антенн ретранслятора от длины пролета D_p для значений γ , которые получились при проведении эксперимента (таблица на с. 147). Расчет производился при $\eta_p = 1$, $R_{ст} = 1,5$ км.

Для подтверждения теоретических расчетов было проведено исследование на железнодорожной станции с использованием маломощных антенн в условиях сильного экранирования в зонах

неуверенного приема. Ранее пассивные ретрансляторы использовались при больших расстояниях (более 20 км) от передатчика и приемника и имели внушительные размеры (десятки и сотни квадратных метров) [1, 7, 10]. Предлагается использовать ретранслятор для меньших расстояний (до 2 км) и меньшей площадью (до 10 м²).

Для проведения исследования был разработан пассивный ретранслятор, показанный на рисунке 5, площадью 2 м², собранный из алюминиевой сетки и алюминиевых уголков.

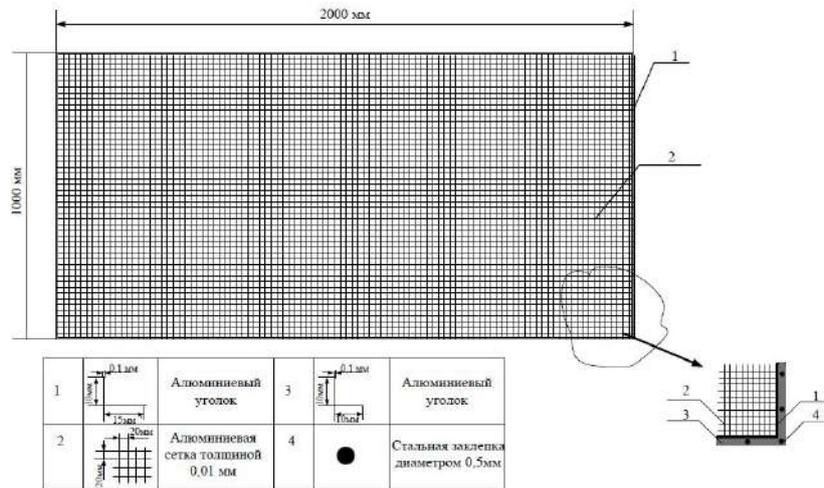


Рисунок 5 – Схема разработанного пассивного ретранслятора

Исследование проводилось на железнодорожной станции, где зоны неуверенного приема возникают при обслуживании подвижного состава, количество вагонов которого превышает 60, из-за установленных сооружений и конструкций вдоль железнодорожных путей, а также электромагнитного влияния от контактной сети, ЛЭП и т. д. Длина такого состава может достигать 1500 м, поэтому при теоретическом расчете было принято считать $R_{ст}$ равной 1500 м. Для проведения исследования использовались уже установленная диверторная антенна с частотой передачи сигнала 152,8 МГц, анализатор спектра, два пассивных ретранслятора, носимая радиостанция [8, 9]. Исследование проводилось на двух разных расстояниях: 20 и 750 м.

При исследовании пассивного ретранслятора на расстоянии 750 м от передающей антенны возникают условия неуверенного приема из-за зданий, деревьев и влияния внешних электромагнитных полей. На расстоянии 20 м проводились измерения от передающей антенны и носимой радиостанции, на расстоянии 750 м – от антенны. В качестве измерительного прибора использовался анализатор спектра, главные преимущества этого прибора состоят в том, что он работает в диапазоне частот от 9 кГц до 3 ГГц с полосой разрешения 1 Гц. Пассивные ретрансляторы поднимались на высоту 3 м. Схема измерения показана на рисунке 6.

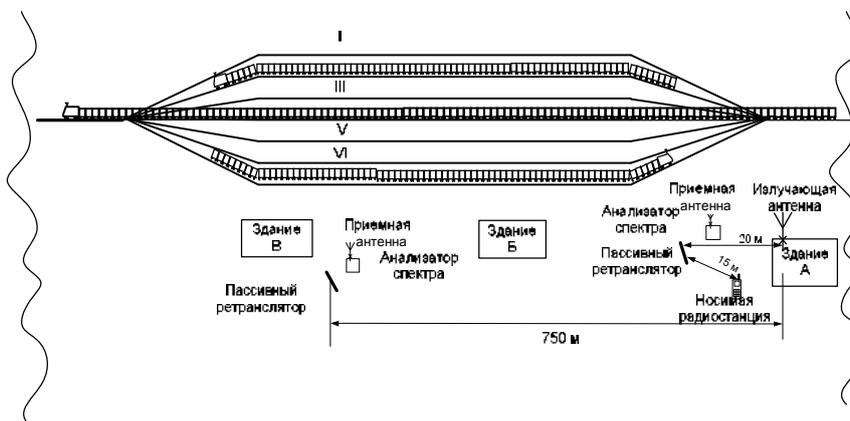


Рисунок 6 – Схема измерения уровней сигналов на антенне и носимой радиостанции с использованием разработанного пассивного ретранслятора

Результаты проведенных исследований пассивного ретранслятора на железнодорожной станции показаны в таблице.

Результаты измерения

Устройство	Расстояние, м	Уровень сигнала без пассивного ретранслятора, дБ	Уровень сигнала с пассивным ретранслятором, дБ	Разница, дБ
Антенна	20	-35,61	-30,71	4,9
	750	-72,14	-68,44	3,7
Носимая радиостанция	15	-14,08	-6,73	7,35

Практически значимыми и более точными являются результаты исследований, проведенных на расстоянии 750 м. Результаты исследования и теоретические расчеты, проведенные на расстоянии 20 м, имеют большой разброс полученных значений, поэтому оценить достоверность полученных результатов на данном этапе невозможно. Для получения достоверных результатов необходимо совершенствование методики расчета пассивных ретрансляторов при использовании их в ближней зоне.

По теоретическим расчетам при использовании пассивного ретранслятора площадью 2 м² на расстоянии 750 м получили увеличение сигнала на 4 дБ, а по практическому применению – 3,7 дБ, что показывает на довольно точный результат.

Таким образом, исследование показало, что пассивной ретранслятор помогает улучшить качество сигнала в сильно экранирующей местности, но для точности оценки необходимо доработать существующую методику расчета пассивных ретрансляторов и провести исследования еще раз. Помимо этого необходимо рассмотреть возможность крепления пассивных ретрансляторов на контактные опоры вдоль железнодорожных путей и защиту их от перенапряжения и ударов молнии.

Список литературы

1. Коротковолновые антенны / Г. З. Айзенберг, С. П. Белоусов [и др.]. – 2-е изд. – Москва : Радио и связь, 1985. – 536 с. – Текст : непосредственный.
2. Авторское свидетельство № 190435 СССР, МПК Н 04d. Пассивный излучатель для радиорелейной линии : № 460176/36-9 : заявлено 19.11.1954 : опубликовано 29.12.1966 / Айзенберг Г. З., Модель А. М. – 49 с. – Текст : непосредственный.
3. Айзенберг, Г. З. Пассивные ретрансляторы для радиорелейных линий / Г. З. Айзенберг, В. Г. Ямпольский. – Москва : Связь, 1973. – 208 с. – Текст : непосредственный.
4. Айзенберг, Г. З. Пассивные ретрансляции для радиорелейных линий связи (ч. 1) / Г. З. Айзенберг, В. Г. Ямпольский. – Текст : непосредственный // Радиотехника. – 1967. – Т. 22. – № 3. – С. 23 – 33.
5. Айзенберг, Г. З. Антенны УКВ / Г. З. Айзенберг. – Москва : Связьиздат, 1957. – 699 с. – Текст : непосредственный.
6. Аренберг, А. Г. Распространение дециметровых и сантиметровых волн / А. Г. Аренберг. – Москва : Советское радио, 1957. – 303 с. – Текст : непосредственный.
7. Гавриленко, В. Г. Передача информации по беспроводным сетям в условиях пересеченной местности / В. Г. Гавриленко, В. А. Яшнов. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2007. – 112 с. – Текст : непосредственный.
8. Чистяков, Н. И. Основы радиосвязи и радиорелейные линии / Н. И. Чистяков. – Москва : Связь, 1964. – 326 с. – Текст : непосредственный.
9. Марков, Г. Т. Антенны / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – Москва : Энергия, 1975. – 528 с. – Текст : непосредственный.

10. Михайлов, М. И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М. И. Михайлов, Л. Д. Разумов, С. А Соколов. – Москва : Связь, 1979. – 264 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Aizenberg G. Z., Belousov S. P., Zhurbenko E. M., Kliger G. A., Kurashov A. G. *Korotkovolnovye anteny* (HF antennas). Moscow: Radio i svjaz' Publ., 1985, 536 p.
2. Ajzenberg G. Z., Model' A. M. *Copyright certificate USSR № 190435*, 29.12.1966.
3. Ajzenberg G. Z., Iampol'skii V .G. *Passivny'e retranslyatory` dlya radiorelejny`x linij* (Passive repeaters for radio relay lines). Moscow: Sviaz' Publ., 1973, 208 p.
4. Ajzenberg G. Z. *Passivny'e retranslyacii dlya radiorelejny`x linij svyazi* (ch. 1) [Passive Relays for Radio Relay Communication Lines (pt. 1)]. *Radiotekhnika – Radio engineering*, 1967, vol. 22, no. 3, pp. 23 – 33.
5. Ajzenberg G. Z. *Antenny` UKV* (VHF antennas). Moscow: Svyazizdat, 1957, 699 p.
6. Arenberg A. G. *Rasprostranenie decimetrovy`x i santimetrovy`x voln* (Propagation of decimeter and centimeter waves). Moscow : Sovetskoe radio Publ., 1957, 303 p.
7. Gavrilenko V. G. *Peredacha informacii po besprovodny`m setyam v usloviyax peresechennoj mestnosti* (Transmission of information over wireless networks in rough terrain). Nizhny Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Publ., 2007, 112 p.
8. Chistyakov N. I. *Osnovy` radiosvyazi i radiorelejny`e linii* (Fundamentals of radio communications and radio relay lines). Moscow: Sviaz' Publ., 1964, 326 p.
9. Markov G. T., Sazonov D. M. *Antenny* (Antennas) Moscow : Energiia Publ., 1975, 528 p.
10. Mikhailov M. I. *E`lektromagnitny`e vliyaniya na sooruzheniya svyazi* (Electromagnetic effects on communication facilities). Moscow: Sviaz' Publ., 1969, 264 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Митрохин Валерий Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети».

Тел.: +7-903-926-74-70.

E-mail: mitrokhin@list.ru

Зиновьев Николай Викторович

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

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

Аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностирования», ОмГТУ.

Тел.: +7-962-040-06-67.

E-mail: winpac_55@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Митрохин, В. Е. Использование пассивных ретрансляторов для улучшения качества радиосвязи в сложной электромагнитной обстановке / В. Е. Митрохин, Н. В. Зиновьев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 142 – 148.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mitrokhin Valery Evgenievich

Omsk State Transport University (OSTU).

Marks av., d. 35, Omsk, 644046, Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor of the department «Telecommunication, radio systems and networks».

Phone: +7-903-926-74-70.

E-mail: mitrokhin@list.ru

Zinoviev Nikolai Viktorovich

Omsk State Technical University (OSTU).

Mira st., 11, Omsk, 644050, Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Radio engineering devices and diagnostic systems», OmSTU.

Phone: +7-962-040-06-67.

E-mail: winpac_55@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mitrokhin V. E., Zinoviev N. V. The use of passive repeaters to improve radio communications in complex electromagnetic environment. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 1 (45), pp. 142 – 148 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- совершенствование промышленных теплосистем, теплотехнического и теплового оборудования;
- электрические станции и электроэнергетические системы;
- энергетические системы и комплексы;
- автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подписи к рисункам и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 1 (45) 2021

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 03 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 25.06.2021.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 30.06.2021.

