

научно-технический

журнал ISSN 2220-4245

ИЗВЕСТИЯ

№ 2(50)

2022

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

EDITORIAL BOARD

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Пляскин А. К., Дроглов Д. Ю., Кушнирук А. С. Диагностика масляного голодания моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока электровозов серии ЭЭС5К «Ермак».....2
- Незевак В. Л., Дмитриев А. Д., Самолинов С. С. Анализ характеристик тяговой нагрузки на скоростных участках для определения условий работы устройств накопления электроэнергии.....12
- Аржанников Б. А., Паранин А. В. Расчет параметров и оценка возможности использования цепной компенсированной контактной подвески с рычагами для трехфазной системы тягового электроснабжения.....30
- Павлов В. М., Слатин А. И., Петин Д. А. Совершенствование малогабаритного устройства сбора диагностической информации для контроля работоспособности токоприемников электроподвижного состава.....44
- Третьяков Е. А., Авдиенко Е. Г. Повышение эффективности использования системы автоведения грузовых электровозов по данным текущих измерений бортовых систем и мгновенных тяговых расчетов.....55
- Лакин И. И., Мельников В. А. Математические методы проверки достоверности данных о надежности локомотивов, их эксплуатации и техническом обслуживании.....66
- Знаенко В. Н., Мельниченко О. В., Линьков А. О. Влияние конструкции силовых шин на токовую симметрию в ветвях плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах при их параллельном включении.....74
- Подгорная С. О., Сидорова Е. А., Давыдов А. И. Прогнозирование показателя энергетической эффективности локомотивов.....85
- Бозоров Р. Ш. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob» на встречные поезда.....96
- Галиев И. И., Ушак В. Н. Особенности взаимодействия экипажа и пути при движении электровоза ЭП2К в кривых малого радиуса.....108
- Овчаренко С. М., Ринг И. С., Овчаренко С. С. Исследование температурных режимов работы систем охлаждения тепловозов в процессе эксплуатации.....116
- Томилов В. В., Сидоров О. А., Утепбергенова С. М. Исследование распределения тягового тока вдоль полюса токоприемника подвижного состава в режиме движения.....124
- Шантаренко С. Г., Капустян М. Ф., Обрывалин А. В., Евсеев А. А. Эффективность управления техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов.....135

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

- Мухамедова З. Г., Осадчук В. Д., Тулаев А. У. Перспективы использования технологий блокчейн в организации перевозочного процесса и цепочке поставок.....142

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

А. К. Пляскин, Д. Ю. Дроголов, А. С. Кушнирук

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

ДИАГНОСТИКА МАСЛЯНОГО ГОЛОДАНИЯ МОТОРНО-ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ КОЛЕСНО-МОТОРНОГО БЛОКА ЭЛЕКТРОВЗОВ СЕРИИ ЗЭС5К «ЕРМАК»

Аннотация. Развитие систем диагностики сопровождается их широким внедрением в технические системы. Использование диагностики позволяет выявить дефекты узлов технических систем на ранней стадии их возникновения с целью заблаговременного и оперативного упреждения, повышения производительности работы, снижения времени простоя в ремонте, уменьшения материальных затрат на замену или глубокое восстановление. Железнодорожный транспорт также находится на стадии широкого внедрения диагностики в различные узлы и детали подвижного состава. Основным примером внедрения диагностических систем является локомотивный парк как более сложная техническая единица. Сегодня в локомотивном парке применяются аппаратно-программные диагностические комплексы, микропроцессорные системы диагностики, бортовые и путевые системы контроля, позволяющие охватить весь спектр диагностических данных основных технических узлов. Однако применение указанных выше систем нуждается в постоянном совершенствовании математической модели диагностирования. Одним из направлений совершенствования диагностических моделей является использование методов теории искусственного интеллекта – раздела искусственных нейронных сетей, которые по сравнению с классическими полиномиальными регрессионными моделями обладают свойством экстраполяционной точности и позволяют адаптивно прогнозировать значения диагностических параметров по данным, которые были за пределами выборки обучения искусственной нейронной сети. Данные характеристики позволяют заблаговременно и точно спрогнозировать развитие дефектов и возможных отказов с целью их устранения и получения экономического эффекта. В работе представлен пример разработки диагностической искусственной нейросетевой модели диагностики масляного голодания моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока грузового магистрального электровоза серии ЗЭС5К «Ермак». Данный узел имеет низкие показатели надежности, поэтому нуждается в применении непрерывных средств диагностики, которые на текущий момент времени отсутствуют.

Ключевые слова: диагностика, искусственные нейронные сети, электровозы, моторно-осевые подшипники, масляное голодание.

Artem K. Plyaskin, Denis Yu. Drogolov, Alexey S. Kushniruk
Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

DIAGNOSIS OF OIL STARVING OF MOTOR-AXLE BEARINGS OF THE WHEEL- MOTOR UNIT OF ELECTRIC LOCOMOTIVES SERIES 3ES5K "ERMAK"

Abstract. The development of the system is accompanied by the diagnostics of their achievement in the technical system. Using the possibility of identifying defects in nodal technical systems in the early stages of their occurrence in order to timely and promptly anticipate, the emergence of work productivity, identify simple repair time, identify material costs for replacement or deep restoration. Railway transport is also at the stage of a wide identification of various components and parts of the rolling stock. the appointment of diagnostic systems is a locomotive fleet, as a more identified technical unit. Today, the locomotive fleet uses hardware and software diagnostic complexes, microprocessor-based diagnostic systems, on-board and track monitoring systems that cover the entire range of diagnostic data of the main technical units. However, the use of the availability of systems requires constant improvement of the mathematical model of diagnosis. One of the options for choosing diagnostic models is the use of artificial intelligence research methods - sections of artificial neural networks, which, in comparison with the classical polynomial regression properties, are manifested by the properties of extrapolation accuracy and are applicable for predicting the values of diagnostic parameters according to the data that were due to the sampling of an artificial neural network. These characteristics make it possible to predict the development of defects and possible failures safely and accurately to obtain them and obtain an economic result. The paper presents an example of the development of a diagnostic artificial neural network model for diagnosing oil starvation of motor-axle bearings of the wheel-motor block of a cargo mainline electric locomotive of the 3ES5K «Ermak» series. This factor has a low level of reliability, so the use of continuous diagnostics is required, which requires the use of a point in time.

Keywords: diagnostics, artificial neural networks, electric locomotive, motor-axle bearings, oil starvation.

Диагностика является одним из перспективных направлений в сфере управления техническим состоянием локомотивного парка. Применение диагностических комплексов в локомотивном хозяйстве позволяет заблаговременно выявить дефекты технических узлов для их последующего устранения. Данные мероприятия способствуют повышению производительности локомотивов благодаря снижению случаев их отказов в пути следования, совершенствованию системы безопасности перевозочного процесса, улучшению показателей надежности тягового подвижного состава, уменьшению материальных затрат на устранение последствий отказов и развитию системы технического обслуживания и ремонта локомотивов [1].

В настоящее время большинство зарубежных стран используют комбинированную систему обслуживания и ремонта локомотивов [2], где преобладает использование бортовых непрерывно следящих систем технической диагностики, а большинство обслуживающих и ремонтных операций реализуются по необходимости проведения таковых на основании полученных диагностических данных. Такой подход обусловлен наличием значительного экономического эффекта от эксплуатации локомотивного парка с наименьшими материальными затратами на проведение обслуживания и ремонта локомотивов. При использовании комбинированной системы ремонта и обслуживания локомотивов снижение экономических потерь в первую очередь связано с отсутствием проведения фактически необоснованных обслуживающих и ремонтных операций, оперативностью выявления отказов в пути следования и заблаговременной подготовкой материально-технической базы ремонта с целью снижения простоя тяговых единиц.

На железнодорожном транспорте в Российской Федерации используется планово-предупредительная система обслуживания и ремонта локомотивов, где преобладает дискретная диагностика с реализацией ремонта и обслуживания через определенную наработку в соответствующем объеме. Планово-предупредительная система обслуживания и ремонта локомотивов в сравнении с комбинированной имеет низкую экономическую и функциональную эффективность. Это связано с наличием статичных интервалов проведения обслуживания и ремонта без обоснования их необходимости в зависимости от фактического технического состояния узлов. Такой подход характеризуется наличием нецелесообразных экономических потерь от выполнения обслуживающих или ремонтных работ, а также от простоев локомотивов.

Переход российского локомотивного комплекса на комбинированную систему обслуживания и ремонта берет свое начало с конца прошлого столетия и продолжается по текущий момент времени. Данный переход характеризуется поэтапным внедрением и совершенствованием бортовых систем контроля и диагностики, которые позволяют регистрировать диагностические параметры и вести анализ технического состояния локомотива. Принцип работы используемых микропроцессорных систем диагностики основан на дискретном измерении состояния отдельных узлов локомотивов. Такой подход не позволяет заблаговременно выявить и устранить развитие дефекта, а позволяет лишь определить работоспособность узла, что противоречит особенностям применения комбинированных и фактических систем обслуживания и ремонта.

Очевидным является тот факт, что дальнейшие шаги перехода на комбинированную и фактическую систему обслуживания и ремонта локомотивов будут связаны с развитием микропроцессорных систем диагностики. Однако для их реализации необходима математическая модель, способная к обработке больших диагностических данных и высокой точности определения диагноза.

Достижения науки и техники, в частности в разработке диагностических моделей, показали значительные возможности применения теории искусственного интеллекта – раздела искусственных нейронных сетей. Свою известность искусственные нейронные сети (ИНС) получили за универсальность, адаптивность применения и точность моделирования. Принцип работы ИНС основан на построении системы уравнений прогнозирования выходного диагно-

стического параметра в зависимости от значений входных влияющих воздействий и их весовых коэффициентов. Процесс обучения сети сводится к задаче минимизации функции ошибки между ответом ИНС и фактическим значением выходного диагностического параметра. Обучение осуществляется путем расчета значений весовых коэффициентов входных параметров по критерию наибольшей регрессии со значением выходного диагностического параметра. Моделирование ИНС осуществляется путем подстановки значений входных влияющих воздействий в соответствующее уравнение системы ИНС в зависимости от своего номинала. С учетом подстановки значений входных параметров осуществляется расчет выходного диагностического параметра, при сравнении которого со значением по выборке обучения делается вывод о качестве обучения ИНС [3].

Математическую модель диагностической ИНС можно представить в виде системы уравнений в формуле:

$$y_i = \begin{cases} \sum_{m=1}^n w_{1im} \cdot x_m + w_0, x_m = x_{1im}; \\ \sum_{m=1}^n w_{2im} \cdot x_m + w_0, x_m = x_{2im}; \\ \dots \\ \sum_{m=1}^n w_{kim} \cdot x_m + w_0, x_m = x_{kim}, \end{cases} \quad (1)$$

где y_i – значения i -х выходных диагностических прогнозируемых параметров;

m – порядковый номер входного диагностического параметра;

n – общее количество входных диагностических параметров;

k – количество искусственных нейронных связей;

w – весовой коэффициент k -й искусственной нейронной связи, связанный с изменением значений i -х выходных диагностических прогнозируемых параметров, соответствующего входного диагностического параметра x .

Структура диагностической ИНС представлена в графическом виде на рисунке 1.

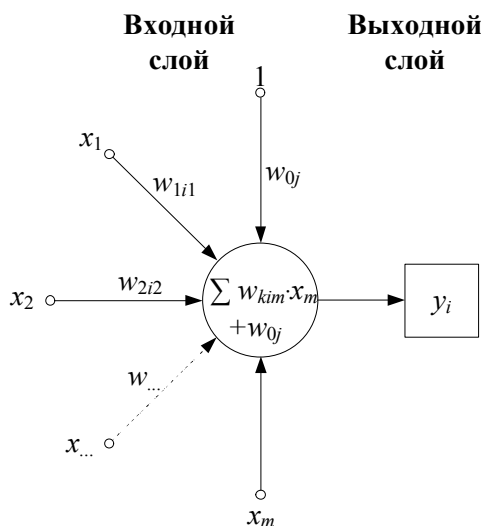


Рисунок 1 – Математическая структура простейшей диагностической ИНС

Представленная на рисунке 1 и описанная формулами (1) математическая модель ИНС, разработанная американским ученым Уорреном Мак-Каллоком [4], является простейшим линейным персептроном. Принцип моделирования данной структуры ИНС можно описать следующим образом:

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

1) при подаче входных сигналов x_m осуществляется подстановка их значений k в соответствующее уравнение системы ИНС в зависимости от интервала принадлежности значений входных параметров x_{kim} , при которых осуществлялось обучение;

2) производится вычисление сумм произведений значений входных сигналов x_m на их весовые коэффициенты w_{kim} , значения которых были получены в процессе обучения ИНС;

3) определяются значения выходных диагностических параметров y_i , которые являются прогнозными;

4) применяется алгоритм постановки диагноза путем сравнения прогнозных значений y_i с фактическими по отношению к выходному диагностическому параметру.

Исходя из описанного выше принципа моделирования ИНС можно сделать вывод о ее возможном применении в области диагностики деталей, узлов и элементов технических систем. Функционирование ИНС связано с возможностью контроля точности построения диагностической модели, цикличного совершенствования в случае определения ошибки прогнозирования, универсального применения для различных узлов с учетом изменения диагностических и влияющих параметров. Указанные преимущества позволяют заблаговременно и точно выявить развитие дефекта или отказа для его устранения и повышения уровней безопасности эксплуатации технических систем и экономической эффективности.

Рассмотрим возможность применения ИНС в системах диагностики конкретных узлов тягового подвижного состава на примере электровозного парка серии ЗЭС5К Дальневосточного полигона эксплуатации, который сегодня является одним из часто используемых на сети железных дорог России.

Надежность локомотивного парка напрямую связана с применением диагностических систем и моделей. В первую очередь это касается узлов и деталей, безотказность (показатель надежности) которых лимитирует нормы межремонтных пробегов по целевому относительно рассматриваемого узла или детали виду обслуживания или ремонта. В таких условиях количество unplanned ремонтов возрастает, а значит, снижаются уровень безопасности перевозочного процесса и производительность локомотивного парка. В последние годы безотказность локомотивного парка Дальневосточной железной дороги имеет отрицательную динамику, что подтверждается распределением отказов за один календарный год, представленным на рисунке 2.

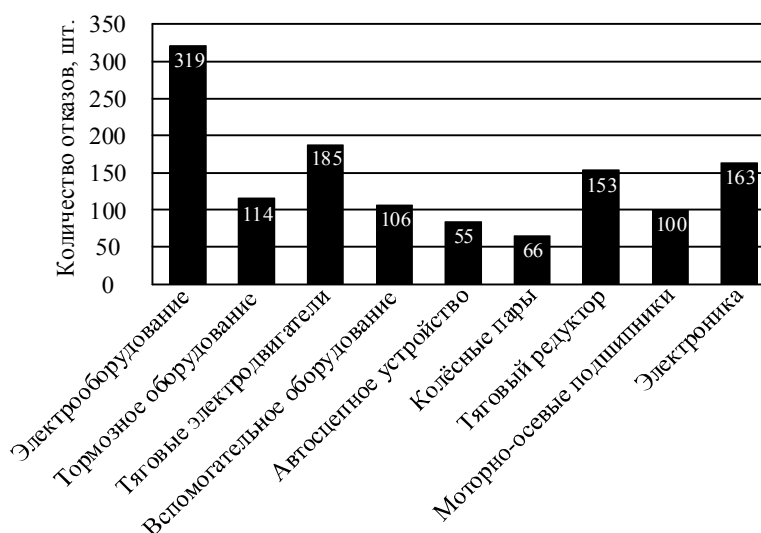


Рисунок 2 – Статистика отказов электровозов по причине выхода из строя их узлов и агрегатов

Большое количество отказов по электровозам приходится на электрооборудование. Данный факт связан со значительной номенклатурой данного вида оборудования, а именно с включением в его состав следующих устройств:

– крышевого оборудования (38 отказов);

- аппаратов защиты (140 отказов);
- контакторов силовой цепи (22 отказа);
- групповых переключателей (4 отказа);
- реле (10 отказов);
- резисторы (2 отказа);
- тяговые трансформаторы и преобразователи (16 отказов);
- аккумуляторные батареи (15 отказов);
- силовые цепи (27 отказов);
- низковольтные цепи (45 отказов).

Отдельно статистика отказов рассматриваемых элементов, входящих в состав электрооборудования, не принимает критических ситуаций относительно других рассматриваемых узлов и агрегатов. Аналогичная ситуация возникает и с электроникой, тормозным и вспомогательным оборудованием, тяговыми электродвигателями.

Отказы тягового редуктора обусловлены особенностями конструкции кожуха зубчатой передачи (140 отказов из 153) и в основном связаны с выявлением течи масла.

Остро стоит проблема отказов моторно-осевых подшипников (МОПов) колесно-моторного блока (КМБ) электровозов. Количество отказов по данному элементу насчитывает 100 шт. за год. Низкая безотказность МОПов КМБ связана с высокими нормами межремонтных пробегов по данному узлу по причине труднодоступности для проведения качественных диагностических операций (нормы межремонтных пробегов по объему ремонта ТР-3 для электровозов серии ЗЭС5К составляют 500 тыс. км пробега) [5]. Так как оптимизация норм в значительной мере экономически неэффективна, то необходимость разработки и применения бортовых следящих систем диагностики МОПов КМБ является актуальной задачей.

Для разработки ИНС диагностики МОПов КМБ необходимо определиться с прогнозируемым отказом или дефектом, входными влияющими воздействиями, выходными диагностическими параметрами, количеством слоев структуры ИНС, функциями активации (обучения) в рассматриваемых слоях и методом обучения.

Исходя из анализа отчетов о неплановых ремонтах локомотивов по причине выхода из строя МОПов КМБ основным фактором отказов является дефицит масла на поверхности трения между вкладышем подшипника и осью колесной пары. Данный дефект зачастую связан с перепробегами локомотива по ТО-2, где производится заправка МОПов, а также отказами тягового редуктора, связанными с разгерметизацией и забросом в систему смазки МОПов вязкого масла по отношению к осевому. Данный дефект называется масляным голоданием МОПов и обязателен для исследования в области диагностики.

Выявление данного дефекта возможно с применением линейных функций контроля, в том числе с использованием термодатчиков МОПов и датчиков уровней осевого масла. Однако данный способ в сравнении с применением ИНС диагностики МОПов КМБ не позволяет определить рассматриваемый дефект (масляное голодание) на ранней стадии его возникновения. Помимо этого, в процессе контроля температуры вкладышей МОПов КМБ или уровня осевого масла невозможно идентифицировать причину отказа и учесть влияние входных влияющих воздействий. Исходя из этого разработка диагностической модели осуществляется с использованием ИНС.

Входные влияющие воздействия определяются исходя из степени их влияния на выходной диагностический параметр, которое можно обосновать либо физическим происхождением, либо корреляционным анализом. В качестве выходного диагностического параметра в эксперименте и в исследовании в целом была принята температура вкладыша подшипника, соответственно в качестве входных влияющих воздействий – температура условий эксплуатации, скорость движения электровоза (частота вращения колесной пары) и его ускорение.

Количество слоев ИНС было принято исходя из применения классической прогнозной и диагностической ИНС, которая имеет один скрытый слой и две функции активации: сигмовидную и линейную. Сигмовидная функция активации обладает свойствами исключения

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

насыщения мощных по номинальному значению сигналов и усиления слабых по номиналу сигналов [6]. Это позволяет добиться адаптивности подстройки значений весовых коэффициентов при обучении для достижения наибольшей сходимости (регрессии и детерминации). В выходном слое использовалась линейная функция с целью проведения линейного регрессионного анализа. Для обучения сети был применен синтезированный метод Левенберга – Марквардта (синтез методов обучения ИНС наискорейшего спуска и Гаусса – Ньютона) [7], который оптимизирован по точности и скорости обучения). В качестве программного обеспечения для обучения ИНС был использован пакет *Neural Network* программы MATLAB [8]. Экспериментальные данные для обучения ИНС по масляному голоданию МОПов КМБ электровоза 3ЭС5К, зарегистрированные с периодом дискретизации t_d , равным 1 с, представлены на рисунке 3. Регистрация данных проводилась посредством термодатчиков вкладышей МОПов, датчика температуры наружного воздуха и датчика частоты вращения. С помощью микроконтроллера осуществлялись хранение и передача данных на диагностический сервер.

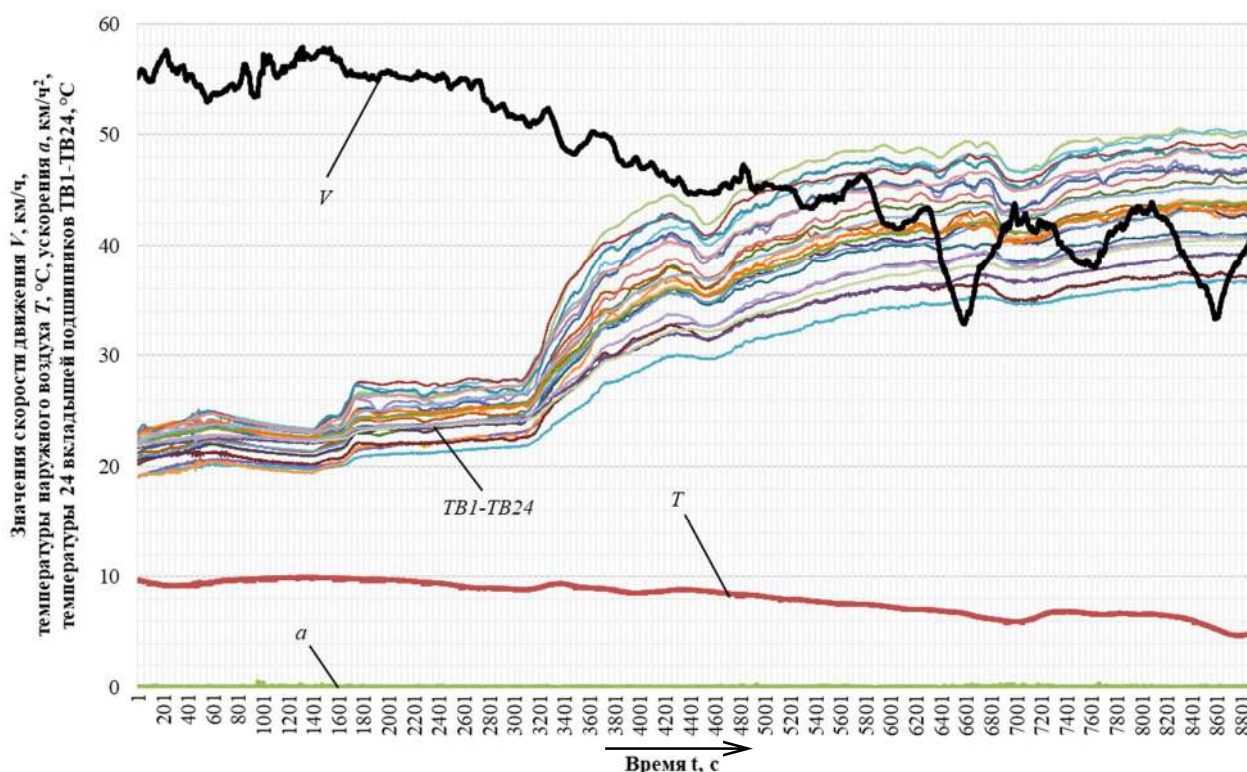


Рисунок 3 – Экспериментальные данные для обучения искусственной нейронной сети

Процесс обучения ИНС осуществлялся по 213840 точкам температуры вкладышей подшипников в количестве 24 шт. (6 тележек – 12 КМБ – 24 вкладыша МОПов) с учетом температуры воздуха, скорости движения и ускорения. При этом была реализована прогнозная постобработка данных с целью увеличения объема по плотности распределения. Для этого были составлены регрессионные уравнения изменения входных и выходных параметров и реализована их интервальная аппроксимация по оси ординат (ось изменения значений) в пределах эксплуатационных характеристик электровоза (до достижения значения конструкционной скорости в 110 км/ч) [9].

При проведении опытных вариантов обучения ИНС было получено оптимальное число нейронных связей в скрытом слое, равное 156. Процесс обучения ИНС в пакете *Neural Network* программы MATLAB представлен на рисунке 4.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

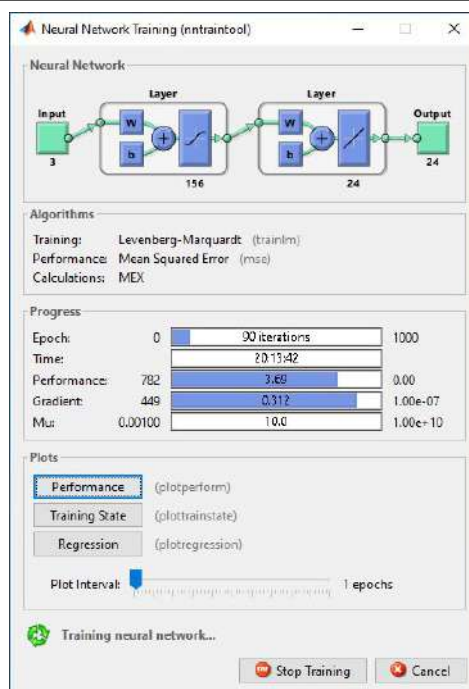


Рисунок 4 – Отражение процесса обучения нейросети в пакете Neural Network

По результатам обучения были получены показатели качества обучения ИНС, представленные в таблице.

Результаты обучения искусственной нейронной сети

Параметр	Значение параметра
Среднеквадратическое отклонение MSE	3,692
Коэффициент регрессии R	0,986
Коэффициент детерминации R^2	0,972

Был проведен линейный регрессионный анализ, на основании которого был достигнут коэффициент детерминации R^2 , равный 0,972 [10]. Результаты линейного регрессионного анализа представлены на рисунке 5.

На основании линейного регрессионного анализа можно сделать вывод о высокой точности прогноза рассматриваемого диагноза в условиях аппроксимации. Рассмотрим экстраполяционные возможности обученной ИНС путем ее моделирования по данным, которые не входили в выборку обучения. Экспериментальные диагностические данные, не входящие в выборку обучения, представлены на рисунке 6, а результаты моделирования ИНС по выборке, представленной на рисунке 6, приведены на рисунке 7.

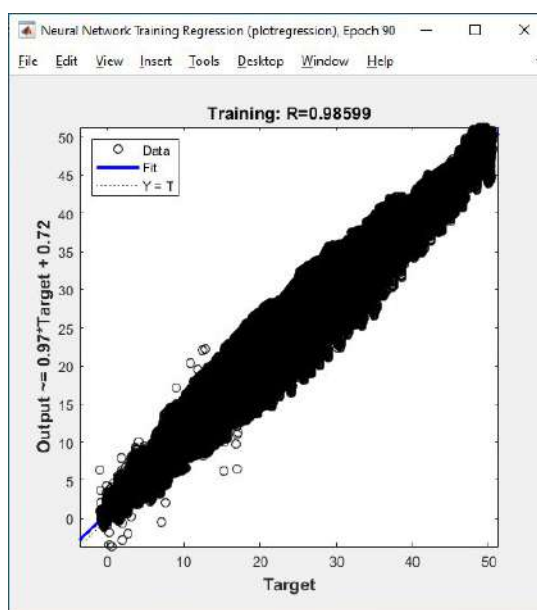


Рисунок 5 – Вид окна с представлением линейного регрессионного анализа

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

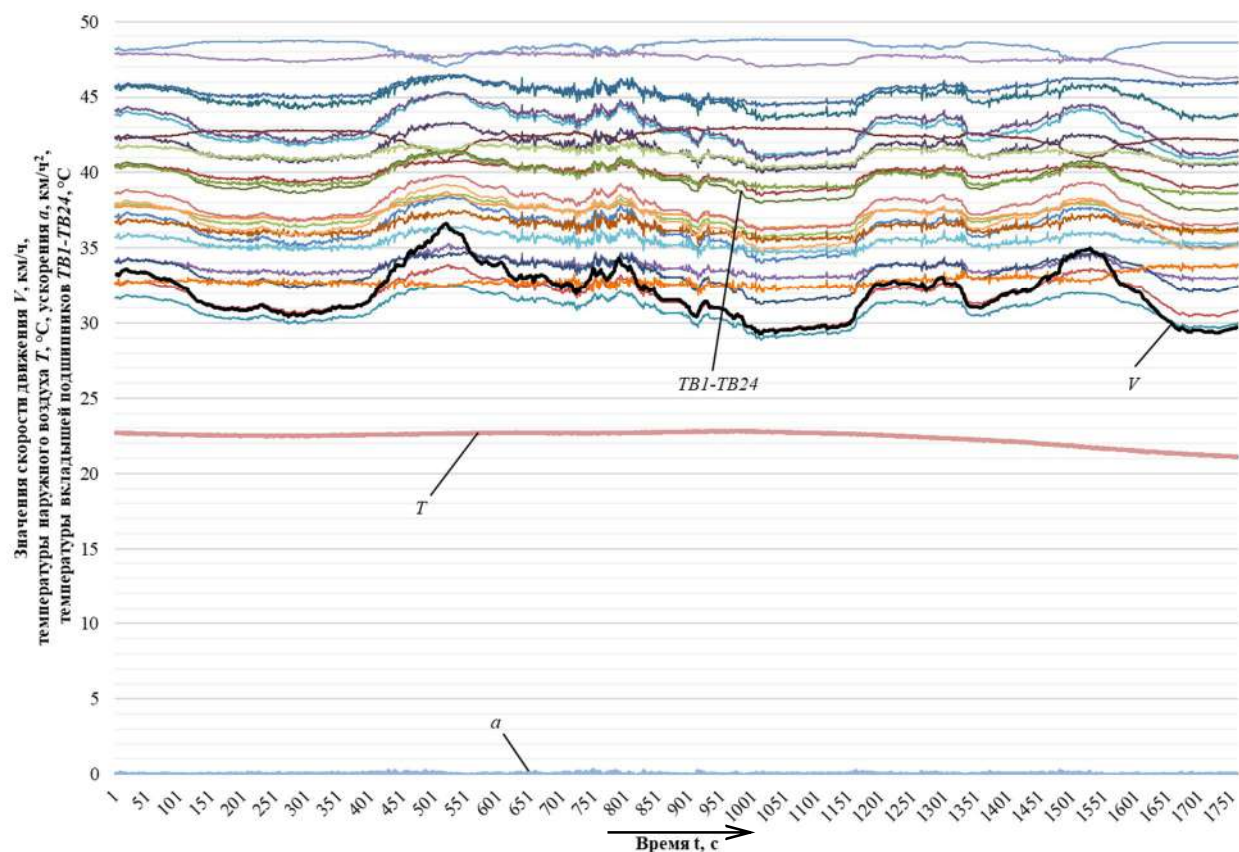


Рисунок 6 – Экспериментальные данные, не входящие в выборку обучения

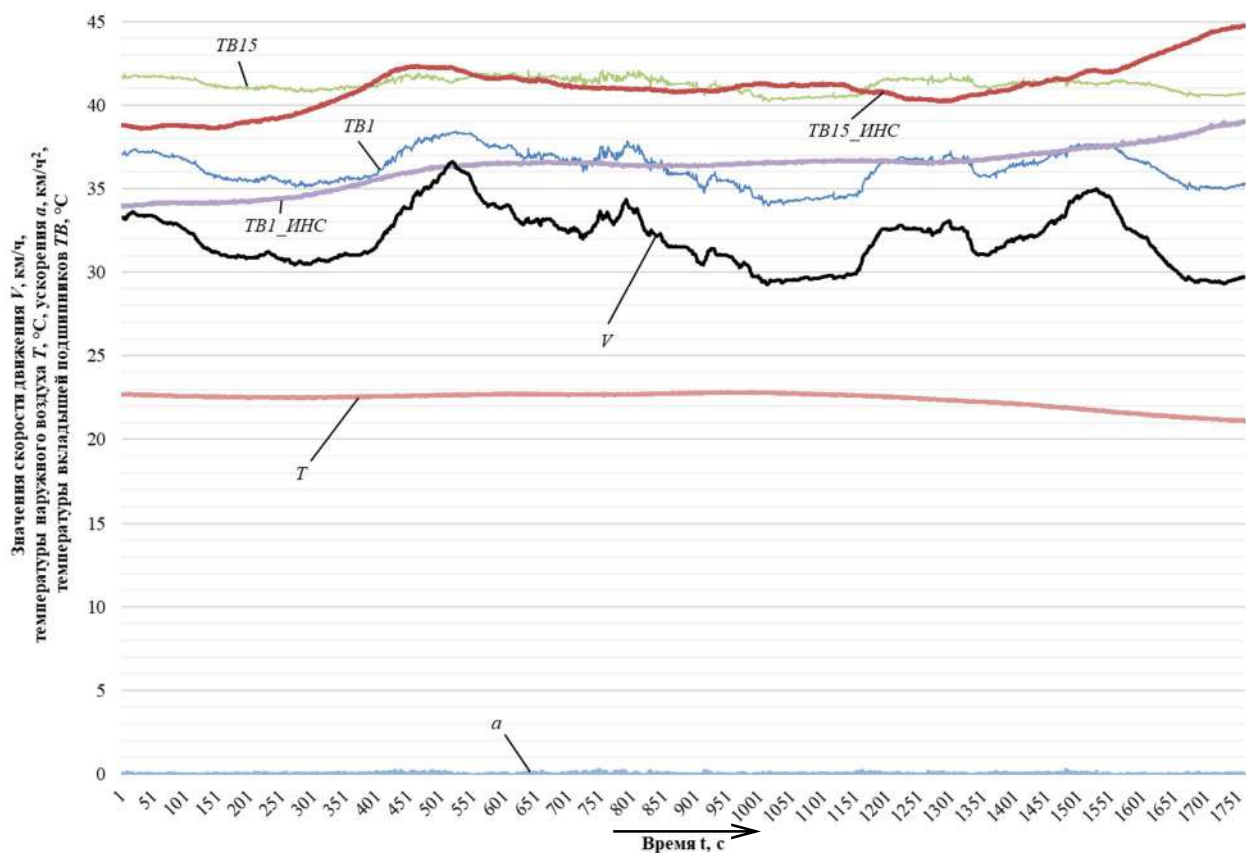


Рисунок 7 – Результаты моделирования искусственной нейронной сети по выборке, не входящей в процесс обучения

Исходя из рисунка 7 видно, что характеристика изменения температуры вкладыша, прогнозируемая сетью при масляном голодании МОПов, схожа с реальной, а отклонения не превышают 10 %. Это означает, что поставленная в исследовании цель достигнута и диагностическая модель способна к диагностике рассматриваемого дефекта даже в условиях экстраполяции.

На основании результатов моделирования разработанной ИНС прогнозирования масляного голодания моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока электровозов серии 3ЭС5К «Ермак» можно сделать вывод о возможности применения представленной модели в составе бортовых систем контроля и диагностики локомотивов. Представленная модель позволяет определить начальную стадию масляного голодания подшипников для его устранения путем ремонтных операций либо дозаправки подшипников в объеме планового обслуживания объема ТО-2 для исключения выхода из строя рассматриваемого узла и затрат на замену подшипников или на их глубокое восстановление.

Список литературы

1. Повышение эффективности технического обслуживания локомотивов / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, В. А. Кручек, М. А. Шрайбер. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 4 (33). – С. 93–97.
2. Пыжьянов, Н. И. На пути к качественному сервисному обслуживанию локомотивного парка (отечественный и зарубежный опыт) / Н. И. Пыжьянов. – Текст : электронный. // Научное ведение. – 2016. – № 3. – Т. 8. – С. 1–10.
3. Plyaskin A. K., Kushniruk A. S. Actual artificial-intelligence based system for assessment of the technical state of the rolling stock, *Advances in intelligent systems and computing*, 2020, vol. 1115, pp. 427-442.
4. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – Москва : Финансы и статистика, 2004. – 343 с. – Текст : непосредственный.
5. Пляскин, А. К. Модель оптимизации норм межремонтных пробегов локомотивов Дальневосточного полигона эксплуатации / А. К. Пляскин, В. А. Бутусова, А. С. Кушнирук. – Текст : непосредственный. // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2021. – № 4 (29). – С. 77–81.
6. Сидоренко, Д. Е. Функции активации в нейронных сетях / Д. Е. Сидоренко, И. В. Михеев. – Текст : непосредственный. // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: материалы II международной научно-практической конференции. – Балаково : Балаковский инженерно-технологический институт, 2019. – С. 247–251.
7. Измаилов, А. Ф. Метод Левенберга – Марквардта для задач безусловной оптимизации / А. Ф. Измаилов, А. С. Куренной, П. И. Стецюк. – Текст : непосредственный // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2019. – № 125. – Т. 24. – С. 60–74.
8. Шатравин, В. В. Моделирование полносвязной искусственной нейронной сети в среде MATLAB / В. В. Шатравин. – Текст : непосредственный // Инноватика-2019 : материалы XV международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск : ООО «СТТ», 2019. – С. 441–445.
9. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) // ru.scbist.com: сайт. – Текст : электронный. – URL: http://scbist.com/scb/uploaded/1_1371277080.pdf (дата обращения: 28.03.2022).
10. Харченко, М. А. Корреляционный анализ : учебное пособие / М. А. Харченко. – Воронеж : Воронежский государственный ун-т, 2008. – 31 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Kruchek V. A., Schraiber M. A. Improving the efficiency of locomotive maintenance. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya – Proceedings of the St. Petersburg State University of Communications*, 2012, no. 4 (33), pp. 93–97 (In Russian).
2. Pyzhyanov N. I. On the way to high-quality service maintenance of the locomotive fleet (domestic and foreign experience). *Naukovedenye – Science of Science*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 1–10 (In Russian).
3. Plyaskin A. K., Kushniruk A. S. Actual artificial-intelligence based system for assessment of the technical state of the rolling stock, *Advances in intelligent systems and computing*, 2020, vol. 1115, pp. 427–442.
4. Osovsky S. *Neyronnyye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural networks for information processing]. Moscow: Finance and statistics Publ., 2004, 343 p. (In Russian).
5. Plyaskin A. K., Butusova V. A., Kushniruk A. S. Optimization model of the norms of overhaul runs of locomotives of the Far East operating range. *Transport Aziatsko-Tikhoookeanskogo regiona – Asia-Pacific Transport*, 2021, no. 4 (29), pp. 77–81 (In Russian).
6. Sidorenko D. E., Mikheev I. V. [Activation functions in neural networks]. *Sovremennyye tekhnologii i avtomatizatsiya v tekhnike, upravlenii i obrazovanii: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii – Modern technologies and automation in engineering, management, and education: materials of the II International Scientific and Practical Conference*. Balakovo, 2019, pp. 247–251.
7. Izmailov A. F., Kurennoy A. S., Stetsyuk P. I. Levenberg-Marquardt Method for Unconstrained Optimization Problems. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki – Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and technical sciences*, 2019, vol. 24, no. 125, pp. 60–74 (In Russian).
8. Shatravin V. V. Modeling a fully connected artificial neural network in the Matlab environment. *Innovatika-2019: materialy XV mezhdunarodnoy shkoly-konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh – Innovation-2019: Materials of the XV International School-Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Tomsk, 2019, pp. 441–445 (In Russian).
9. *Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K)* [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K)], Available at: http://scbist.com/scb/uploaded/1_1371277080.pdf (accessed: 28.03.2022).
10. Kharchenko M. A. *Korrelyatsionnyy analiz* [Correlation analysis]. Voronezh: Voronezh State University Publ., 2008, 31 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пляскин Артем Константинович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт железных дорог», директор института дополнительного образования, ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-73-65.

E-mail: loc@festu.khv.ru

Дроголов Денис Юрьевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

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

Старший преподаватель кафедры «Транспорт железных дорог», ДВГУПС.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Plyaskin Artem Konstantinovich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Railway transport», Director of the Institute of Additional Education, FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-73-65.

E-mail: loc@festu.khv.ru

Drogolov Denis Yurievich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

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

Senior lecturer of the department «Railway transport», FESTU.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Тел.: +7 (4212) 40-76-58.
E-mail: chesser@ya.ru

Phone: +7 (4212) 40-76-58
E-mail: chesser@ya.ru

Кушнирук Алексей Сергеевич

Дальневосточный государственный университет
путей сообщения (ДВГУПС).

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

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

Тел.: +7 (4212) 40-76-50.

E-mail: alexey.kushniruk@mail.ru

Kushniruk Alexey Sergeevich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the de-
partment «Railway transport», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-76-50.

E-mail: alexey.kushniruk@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Пляскин, А. К. Диагностика масляного голодания
моторно-осевых подшипников колесно-моторного
блока электровозов серии 3ЭС5К «Ермак» / А. К. Пляс-
кин, Д. Ю. Дроголов, А. С. Кушнирук. – Текст : непосред-
ственный. // Известия Транссиба. – 2022. –
№ 2 (50). – С. 2 – 12.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Plyaskin A. K., Drogllov D. Yu, Kushniruk A. S.
Diagnosis of oil starving of motor-axle bearings of the
wheel-motor unit of electric locomotives series 3ES5K
«Ermak». Journal of Transsib Railway Studies, 2022,
no. 2 (50), pp. 2-12 (In Russian).

УДК 621.331

В. Л. Незевак, А. Д. Дмитриев, С. С. Самолинов

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

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ НА СКОРОСТНЫХ УЧАСТКАХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. Увеличение скоростей движения электроподвижного состава оказывает влияние на энергетические показатели работы системы тягового электроснабжения. Одним из технических решений задачи по выравниванию графика тяговой нагрузки для снижения потерь напряжения в контактной сети является применение систем накопления электроэнергии. В статье приведены результаты имитационного моделирования, позволяющие оценить изменение энергетических показателей электропоезда при увеличении скоростей движения для условий одиночного следования электропоезда по участку. По результатам тяговых расчетов показано влияние уровня напряжения на токоприемнике электропоезда на техническую скорость, отклонение которой для граничных значений напряжения в скоростном движении составляет около 1 %. Для выбранного участка скоростного движения и технических скоростей обоснован уровень напряжения для проведения тяговых расчетов. Получены зависимости изменения средних значений нагрузки и технической скорости при увеличении максимальной скорости движения до 250 км/ч. Определены статистические оценки для напряжения на токоприемнике электропоезда Velaro RUS. Показано влияние энергоемкости бортовой системы накопления при соответствующей зарядной характеристике на снижение максимальных токов. Получены зависимости для падения напряжения на токоприемниках электропоезда при увеличении скоростей движения. Выполнена оценка максимальной энергоемкости устройств накопления для наиболее тяжелых условий эксплуатации при одиночном следовании электропоезда по участку. Приведенные результаты позволяют определить перспективы совершенствования способа расчета энергетических показателей и применения систем накопления на участках скоростного движения в качестве бортовых систем и сравнить их эффективность со стационарными системами на основе имитационного моделирования, в котором реализуются различные алгоритмы управления.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, пост секционирования, электроподвижной состав, минимальный уровень напряжения, токоприемник, система накопления электро-
энергии, мощность, энергоемкость, степень заряженности, глубина разряда, зарядная характеристика.

Vladislav L. Nezevak, Alexander D. Dmitriev, Svyatoslav S. Samolinov

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

ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF THE TRACTION LOAD ON HIGH-SPEED SECTIONS TO DETERMINE THE OPERATING CONDITIONS OF POWER STORAGE DEVICES

Abstract. *An increase in the speeds of the electric rolling stock has an impact on the energy indicators of the operation of the traction power supply system. One of the technical solutions to the task of equalizing the traction load schedule to reduce voltage losses in the contact network is the use of electricity storage systems. The article presents the results of simulation modeling, which allow us to estimate the change in the energy indicators of an electric train with an increase in movement speeds for conditions of a single electric train following a section. According to the results of traction calculations, the influence of the voltage level on the electric train current collector on the technical speed is shown, the deviation of which for the typical voltage values in high-speed traffic is about 1%. For the selected section of rapid movement and technical speeds, the voltage level for traction calculations is justified. The dependences of the change in the average values of the load and the technical speed with an increase in the maximum speed up to 250 km/h are determined. Statistical estimates for the voltage on the pantograph of the Velaro RUS electric train are determined. The influence of the energy intensity of the onboard storage system with the corresponding charging characteristic on the reduction of maximum currents is shown. Dependences are obtained for the voltage drop on the electric train current collectors with an increase in movement speeds. The assessment of the maximum energy intensity of storage devices for the most severe operating conditions with a single electric train track on the site was carried out. These results allow us to determine the prospects for improving the method of calculating energy indicators and the use of accumulation systems in areas of rapid movement as on-board systems and compare their effectiveness with stationary systems based on simulation modeling, in which various control algorithms are implemented.*

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

Область применения устройств накопления электроэнергии в транспортных комплексах достаточно широка – от подвижного состава до стационарных и мобильных устройств, применяемых в системах электроснабжения. В настоящее время в России и за рубежом на транспорте устройства накопления электроэнергии нашли применение на маневровых локомотивах и моторвагонном подвижном составе, в метрополитене, на пригородных линиях. В качестве примера можно привести электропоезд Talent для пригородных перевозок в Германии [1], выполненный в модификации Talent 3 с литий-ионной аккумуляторной батареей, маневровый локомотив EMD Joule компании Progress Rail США с аналогичной батареей [2], гибридный маневровый локомотив CRRC Datong Co в Китае с литий-железофосфатными аккумуляторами и трамвай CRRC Zhuzhou Locomotive в Китае с суперконденсатором [3], электробусы компании Нефаз и маневровые локомотивы Синара ТЭМ9-Н [4] на литий-ионных аккумуляторах в России и многие другие. Относительно невысокие массо-габаритные характеристики современных систем накопления ограничивают область их применения на грузовых локомотивах и высокоскоростных поездах, несмотря на высокую техническую эффективность применения устройств накопления в качестве бортовых систем [5]. В настоящее время область применения ограничена бортовыми системами для маневровых локомотивов, электропоездов пригородного и городского транспорта, что связано с массогабаритными ограничениями и высокими требованиями к номинальной мощности и энергоемкости.

Массогабаритные характеристики не являются препятствием для применения устройств накопления в системе тягового электроснабжения, потенциальными местами размещения которых являются тяговые подстанции [6], линейные устройства [7] или другие точки подключения в границах межподстанционной зоны. Применение устройств накопления в системе тягового электроснабжения в условиях средней и высокой интенсивности перевозок и преобладания грузового движения экономически более целесообразно, чем размещение устройств на каждой единице электроподвижного состава, как это показано, например, в статье [8], и,

наоборот, для малодейственных участков с преобладанием пассажирского движения – экономически целесообразно.

Выбор параметров устройств накопления выполняется на основе характеристик тяговой нагрузки, которая в свою очередь зависит от характеристик электроподвижного состава [9, 10] и инфраструктуры, параметров графика движения и других характеристик систем электроснабжения [11, 12]. В связи с этим проекты по определению параметров систем накопления, как стационарных, так и передвижных или бортовых, опираются на анализ условий формирования тяговой нагрузки, а решение указанных задач позволяет получить обоснованную оценку проектных параметров. Указанная задача составной частью входит в проблематику вопросов по повышению пропускной и провозной способности на участках железных дорог, в том числе на скоростных и высокоскоростных, и энергетической эффективности систем тягового электроснабжения железнодорожного транспорта и является актуальной. В России скоростное движение электропоездов Velaro RUS [13] организовано на участке Санкт-Петербург – Москва – Нижний Новгород, характеристики которого приняты за основу при исследовании вопросов оценки применения бортовых систем накопления.

В работе ставятся следующие задачи. Оценить влияние напряжения на токоприемнике электропоезда Velaro RUS на техническую скорость при выполнении тяговых расчетов. Определить возможность использования тяговой нагрузки электроподвижного состава, полученной для номинального напряжения на токоприемнике, при расчетах энергетических показателей системы тягового электроснабжения для заданных диапазонов технических скоростей. Определить зависимость минимального напряжения на токоприемнике и нагрузки Velaro RUS в системе тягового электроснабжения постоянного тока от скорости движения. Получить зависимости изменения энергоемкости бортовых систем накопления для электропоездов Velaro RUS при решении задач выравнивания графика нагрузки от скорости движения.

Решение поставленных задач на основе имитационного моделирования позволяет определить динамику изменения во времени энергетических показателей системы тягового электроснабжения. В настоящей работе не исследуются переходные процессы, являющиеся неотъемлемой частью изменения режимов электропоезда и представляющие тему для отдельного изучения. Энергетические показатели оцениваются на основе множества решений схем в статическом режиме. С этой целью решение получено для одного из участков, на примере которого показаны искомые зависимости и характер изменения энергетических показателей системы тягового электроснабжения, выполнена оценка основных параметров бортовых систем накопления.

В качестве участка, для которого выполняется моделирование, выбран участок следования электропоезда Velaro RUS по маршруту Москва – Санкт-Петербург. Результаты моделирования получены при следовании электропоезда в четном и нечетном направлениях. Для удобства моделирования расчетный маршрут разбит на четыре участка, для каждого из которых получены результаты тяговых расчетов для электропоезда Velaro RUS при движении в четном и нечетном направлениях.

Для тяговых расчетов использованы следующие исходные данные и допущения. Основное удельное сопротивление движению для бесстыкового пути в режиме тяги w'_o и режиме вы бега w'_{ox} описывается выражением, Н/т:

$$w'_o = w'_{ox} = 7,16 + 0,049 \cdot V + 0,00114 \cdot V^2, \quad (1)$$

где V – скорость движения, км/ч.

Основные параметры поезда, принятые для проведения расчета: масса электропоезда – 651 т; мощность часового режима – 8,89 МВт; длина – 260 м; тип тягового двигателя асинхронный; мощность собственных нужд поезда – 1,14 МВт; ток собственных нужд – 380 А.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Спрявленные и приведенные профили пути на четырех участках расчетного маршрута различаются между собой, по классификации профилей относятся к I типу профиля.

Нормальная схема питания и секционирования контактной сети в границах межподстанционных зон расчетного участка реализует параллельный или узловый режим. Контактная сеть рассматриваемых участков на большей протяженности участка имеет формулу $2МФ100 + М120 + А-185$, на меньшей части в качестве контактного провода применяется БрФ-120, несущего троса – Бр-120, количество усиливающих проводов – один или два. На тяговых подстанциях участков в большинстве случаев применяются преобразовательные трансформаторы марки ТРДП номинальной мощностью 12,5 или 16,0 МВ·А с 12-пульсовыми схемами выпрямления последовательного или параллельного типа. Тяговые подстанции участка не оснащены инверторными преобразователями. Часть подстанций оборудована автоматикой подключения резервного преобразовательного агрегата в зависимости от уровня нагрузки или вольтодобавочными устройствами с напряжением холостого хода 600 В.

Определение тяговой нагрузки. Тяговые расчеты в нечетном направлении, выполненные в рабочем диапазоне изменения напряжения на токоприемнике в программном комплексе «Комплекс расчетов тягового электроснабжения», для существующих условий ограничения скорости позволяют получить следующие диапазоны технических скоростей:

- участок 1 (Тверь – Москва) – от 156,9 до 159,1 км/ч;
- участок 2 (Бологое – Тверь) – от 166,2 до 168,4 км/ч;
- участок 3 (Малая Вишера – Бологое) – от 182,5 до 184,0 км/ч;
- участок 4 (Санкт-Петербург – Малая Вишера) – от 161,0 до 163,1 км/ч.

Результаты расчетов позволяют получить зависимость изменения средних токов, мощности, технической скорости и времени хода в нечетном направлении от уровня напряжения на токоприемнике электропоезда Velaro RUS (рисунок 1).

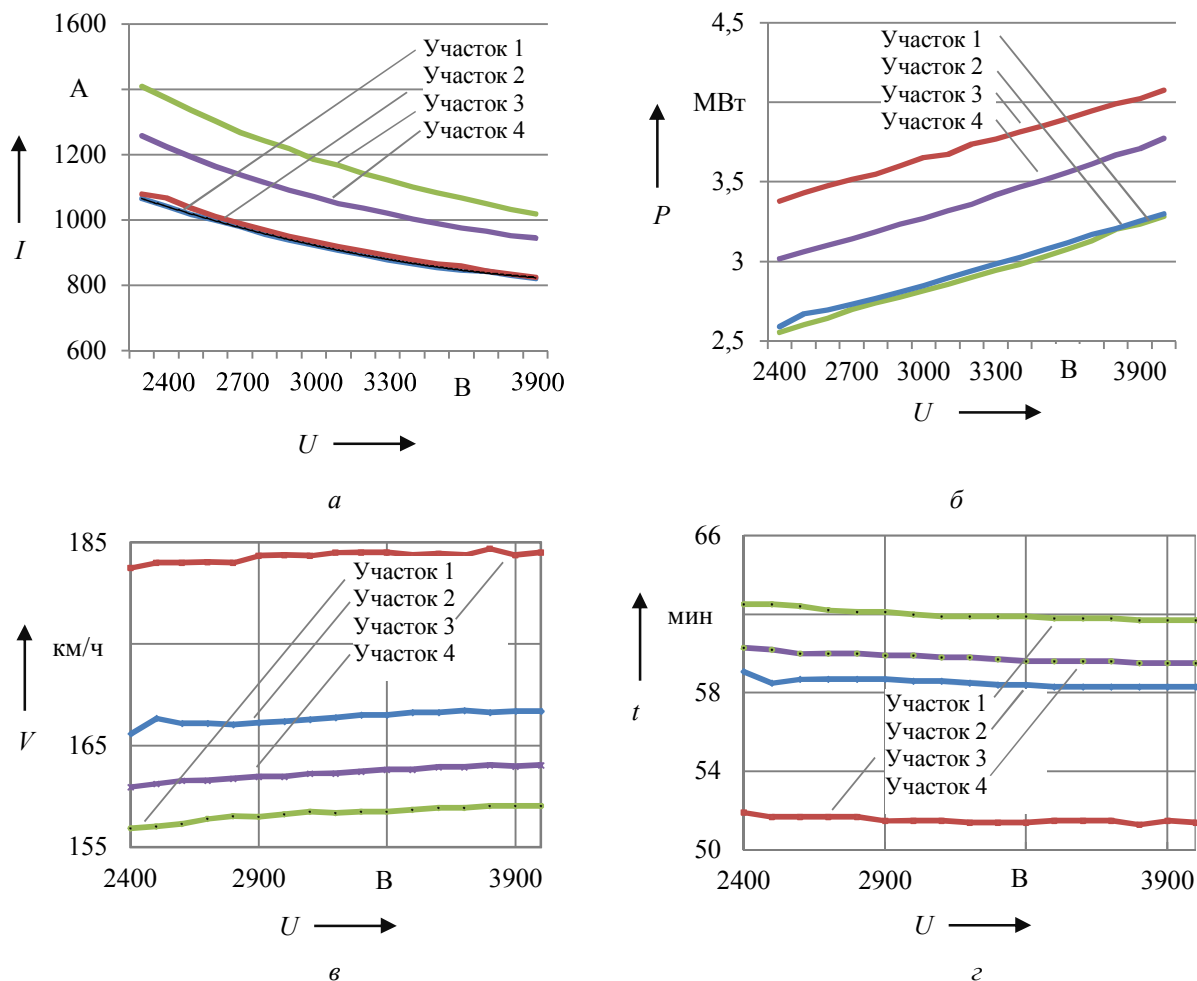


Рисунок 1 – Изменение средних токов (а), мощности (б), технической скорости (в) и времени хода (г) в зависимости от уровня напряжения на токоприемнике Velaro RUS в нечетном направлении

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Средние токи I электропоезда при изменении напряжения U в диапазоне от 2400 до 4000 В в нечетном направлении для рассматриваемых условий четырех участков описываются с помощью следующих регрессионных уравнений соответственно, А:

$$\begin{cases} I_1 = -0,151U + 1406,1; R^2 = 0,972; \\ I_2 = -0,160U + 1444,3; R^2 = 0,974; \\ I_3 = -0,240U + 1951,4; R^2 = 0,980; \\ I_4 = -0,192U + 1684,3; R^2 = 0,971, \end{cases} \quad (2)$$

где R^2 – коэффициент детерминации.

Средняя мощность P , потребляемая электропоездом на участках, описывается с помощью следующих выражений, МВт:

$$\begin{cases} P_1 = 0,448 \cdot 10^{-3} U + 1,479; R^2 = 0,997; \\ P_2 = 0,433 \cdot 10^{-3} U + 1,562; R^2 = 0,998; \\ P_3 = 0,431 \cdot 10^{-3} U + 2,352; R^2 = 0,999; \\ P_4 = 0,471 \cdot 10^{-3} U + 1,8729; R^2 = 0,998. \end{cases} \quad (3)$$

Средняя техническая скорость $V_{\text{тех}}$ электропоезда при следовании электропоезда по рассматриваемым участкам описывается с помощью таких выражений, км/ч:

$$\begin{cases} V_{\text{тех}1} = 1,3 \cdot 10^{-3} U + 154,1; R^2 = 0,9134; \\ V_{\text{тех}2} = 1,1 \cdot 10^{-3} U + 164,2; R^2 = 0,7976; \\ V_{\text{тех}3} = 0,8 \cdot 10^{-3} U + 180,9; R^2 = 0,6977; \\ V_{\text{тех}4} = 1,3 \cdot 10^{-3} U + 158,2; R^2 = 0,9654. \end{cases} \quad (4)$$

Проверка значимости уравнения регрессии выполняется на основе дисперсионного анализа путем сопоставления факторной (регрессии) и остаточной дисперсии. Отношение дисперсий позволяет определить для заданного уровня значимости F -критерий (Фишера) и сравнить его с табличным критерием:

$$F = \frac{Q_R}{Q_E} (n-2) = \frac{R^2}{1-R^2} (n-2) > F_{\alpha, m-1, n-m}, \quad (5)$$

где Q_R , Q_E – факторная и остаточная дисперсия;

n – объем выборки;

m – число параметров при факторных переменных.

В случае, если равенство (5) выполняется, нулевая гипотеза о статистической незначимости уравнения регрессии отвергается и рассматриваемое уравнение считается статистически значимым.

Рассматриваемые уравнения (2) – (4) относятся к уравнениям парной регрессии, для которых значение $m = 2$. Количество экспериментальных данных $n = 17$. Для уровня значимости $\alpha = 0,01$ значение F -критерия будет таким: $F_{0,01; 1; 15} = 2,9467$. Неравенство (5) выполняется для всех рассмотренных показателей и участков, нулевая гипотеза отвергается, уравнения регрессии признаются статистически значимыми. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Результаты проверки значимости уравнений для нечетного направления

Показатель	Участок	R^2	$F_{расч}$
Средний ток, А	1	0,972	256,7
	2	0,974	277,3
	3	0,98	363,8
	4	0,971	247,4
Средняя мощность, МВт	1	0,997	2488,8
	2	0,998	3738,8
	3	0,999	7488,8
	4	0,998	3738,8
Техническая скорость, км/ч	1	0,9134	75,5
	2	0,7976	26,2
	3	0,6977	14,2
	4	0,9654	205,6

Уравнения (2) – (4), полученные для нечетного направления, позволяют оценить приращение нагрузки в зависимости от напряжения на токоприемнике, наблюдаемое в диапазоне от $-0,151$ до $-0,240$ А/В, мощности – в диапазоне от $0,431$ до $0,471 \cdot 10^{-3}$ МВт/В и технической скорости – от $0,8$ до $1,3$ км/ч/1000 В.

Отклонение средних значений тока и мощности, полученных при выполнении тяговых расчетов для граничных значений напряжения на токоприемнике 2700 и 4000 В, от значений, полученных при номинальном напряжении 3000 В, достигают 16,3 и 16,5 % соответственно, а для технической скорости – не превышают 0,88 % (таблица 2). Указанное обстоятельство позволяет выбрать уровень напряжения на этапе тяговых расчетов, а нагрузку электропоезда уточнять на этапе электрических расчетов в зависимости от условий формирования электро-тяговой нагрузки.

Таблица 2 – Отклонение показателей для нечетного направления

Напряжение, В	Средний ток, %	Средняя мощность, %	Техническая скорость, %
Участок Москва – Тверь			
2700	6,5	-4,2	0,88
4000	-12,6	16,5	-0,51
Участок Тверь – Бологое			
2700	6,5	-4,1	0,72
4000	-13,1	15,8	-0,60
Участок Бологое – Малая Вишера			
2700	6,9	-3,8	0,71
4000	-16,3	11,6	-0,11
Участок Малая Вишера – Санкт-Петербург			
2700	6,7	-4,0	0,62
4000	-13,4	15,4	-0,68

Аналогичные результаты расчетов получены для электропоездов при следовании в четном направлении. Для расчетного диапазона напряжений на токоприемнике по результатам тяговых расчетов получены следующие диапазоны технических скоростей:

- участок 1 – от 157,9 до 159,2 км/ч;
- участок 2 – от 168,8 до 172,0 км/ч;
- участок 3 – от 184,0 до 185,3 км/ч;
- участок 4 – от 157,0 до 158,4 км/ч.

Результаты расчетов по определению зависимостей средних токов, мощности, технической скорости и времени хода в четном направлении от уровня напряжения на токоприемнике приведены на рисунке 2. При расчетах учтены существующие ограничения по скорости движения.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Средние токи электропоезда при изменении напряжения в диапазоне от 2400 до 4000 В для четырех участков линии описываются с помощью следующих выражений:

$$\begin{cases} I_1 = -0,159U + 1457,9; R^2 = 0,968; \\ I_2 = -0,180U + 1586,9; R^2 = 0,985; \\ I_3 = -0,201U + 1684,3; R^2 = 0,979; \\ I_4 = -0,144U + 1339,0; R^2 = 0,975. \end{cases} \quad (6)$$

Средняя мощность, потребляемая электропоездом на участках линии, описывается с помощью уравнений:

$$\begin{cases} P_1 = 0,453 \cdot 10^{-3} U + 1,550; R^2 = 0,997; \\ P_2 = 0,442 \cdot 10^{-3} U + 1,773; R^2 = 0,999; \\ P_3 = 0,413 \cdot 10^{-3} U + 1,966; R^2 = 0,998; \\ P_4 = 0,426 \cdot 10^{-3} U + 1,411; R^2 = 0,998. \end{cases} \quad (7)$$

Средняя техническая скорость электропоезда описывается с помощью следующих выражений:

$$\begin{cases} V_{\text{тех1}} = 0,9 \cdot 10^{-3} U + 155,56; R^2 = 0,9058; \\ V_{\text{тех2}} = 1,5 \cdot 10^{-3} U + 166,38; R^2 = 0,7296; \\ V_{\text{тех3}} = 0,8 \cdot 10^{-3} U + 182,68; R^2 = 0,7017; \\ V_{\text{тех4}} = 0,8 \cdot 10^{-3} U + 155,09; R^2 = 0,7985. \end{cases} \quad (8)$$

Результаты проверки значимости полученных уравнений регрессии показывают, что по F-критерию для уровня значимости $\alpha = 0,01$ нулевая гипотеза отвергается, уравнения считаются статистически значимыми (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты проверки значимости уравнений для четного направления

Показатель	Участок	R^2	$F_{\text{расч}}$
Средний ток, А	1	0,972	256,7
	2	0,974	277,3
	3	0,98	363,8
	4	0,971	247,4
Средняя мощность, МВт	1	0,997	2488,8
	2	0,998	3738,8
	3	0,999	7488,8
	4	0,998	3738,8
Техническая скорость, км/ч	1	0,9134	75,5
	2	0,7976	26,2
	3	0,6977	14,2
	4	0,9654	205,6

Уравнения (6) – (8) для рассмотренных величин позволяют в четном направлении оценить приращение тока в зависимости от напряжения, наблюдаемое в диапазоне от $-0,144$ до $-0,201$ А/В, мощности – в диапазоне от $0,413$ до $0,453 \cdot 10^{-3}$ МВт/В, технической скорости – от $0,8$ до $1,5 \cdot 10^{-3}$ км/ч/В.

Отклонение средних значений тока и мощности, полученных при выполнении тяговых расчетов для граничных значений напряжения на токоприемнике 2700 и 4000 В, от значений,

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

определенных при номинальном напряжении 3000 В. Для средних значений тока и мощности отклонения достигают 14,4 и 16,7 % соответственно, для технической скорости – не превышают 1,40 % (таблица 4).

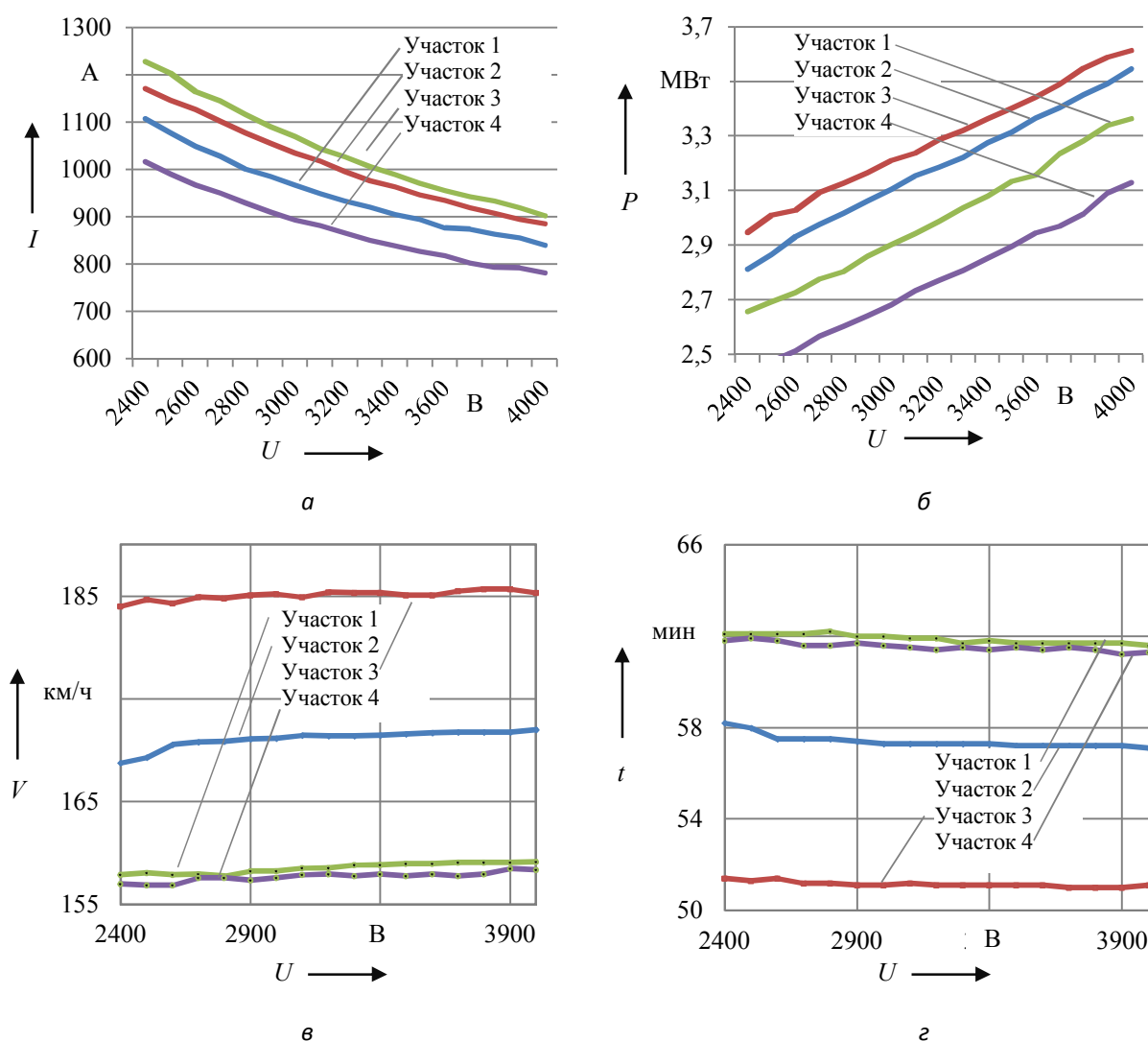


Рисунок 2 – Изменение средних токов (а), мощности (б), технической скорости (в) и времени хода (г) в зависимости от напряжения на токоприемнике Velaro RUS в четном направлении

Таблица 4 – Отклонение показателей для четного направления

Напряжение, В	Ср. ток, %	Ср. мощность, %	Техн. скорость, %
Участок Москва – Тверь			
2700	6,3	-4,4	0,25
4000	-13,1	15,9	-0,57
Участок Тверь – Бологое			
2700	6,5	-4,1	1,40
4000	-14,4	14,2	-0,47
Участок Бологое – Малая Вишера			
2700	7,1	-15,6	0,65
4000	-3,7	12,6	-0,05
Участок Малая Вишера – Санкт-Петербург			
2700	6,4	-12,5	0,38
4000	-4,2	16,7	-0,51

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Выбор напряжения на этапе тяговых расчетов основан на предполагаемом напряжении в контактной сети. В практике расчетов уровень напряжения принимается либо номинальный, либо уточняется на этапе электрических расчетов, после чего тяговый расчет повторяется. В связи с незначительным влиянием напряжения на техническую скорость в рассмотренном диапазоне скоростей уровень напряжения принимается исходя из допущения о равномерном распределении напряжения на токоприемнике во время поездки. Исходя из этого определяется отклонение технической скорости для граничных значений в диапазоне допустимых значений напряжения на токоприемнике. Указанная оценка получена на основе имитационного моделирования и приведена ниже на примере участка 1.

Среднее напряжение на токоприемнике Velaro RUS при следовании по участку 1 составляет в нечетном и четном направлениях 3443,7 и 3427,6 В соответственно. Отклонение значений технической скорости на каждом шаге расчетов i относительно границ диапазона – 2700 и 4000 В определяется по выражению:

$$\Delta V = \frac{V_{U_i} - V_{2700(4000)}}{V_{U_i}} \cdot 100, \quad (9)$$

где V_{U_i} – значение технической скорости, полученное для i -го значения напряжения на токоприемнике в диапазоне от 2700 до 4000 В;

$V_{2700(4000)}$ – значение технической скорости, полученное для напряжения на токоприемнике 2700 (4000) В.

Результаты расчетов для нечетного направления показывают, что минимальное отклонение технической скорости ΔV наблюдается в диапазоне напряжений 3100 – 3400 В, для четного направления – 3100 – 3200 В (рисунок 3). Кривая «сумма», рассчитанная как суммарное отклонение скорости, полученное для напряжений 2700 и 4000 В, от скорости при изменении напряжения в соответствующем диапазоне позволяет выбрать значение напряжения, при котором суммарное отклонение скорости будет близко к нулевым значениям, т. е. получено с минимальной погрешностью. Исходя из полученных значений для снижения отклонения технической скорости в условиях изменения напряжения в дальнейшем принимается напряжение по правой границе диапазона на уровне 3200 В как наиболее близкое к среднему значению диапазона.

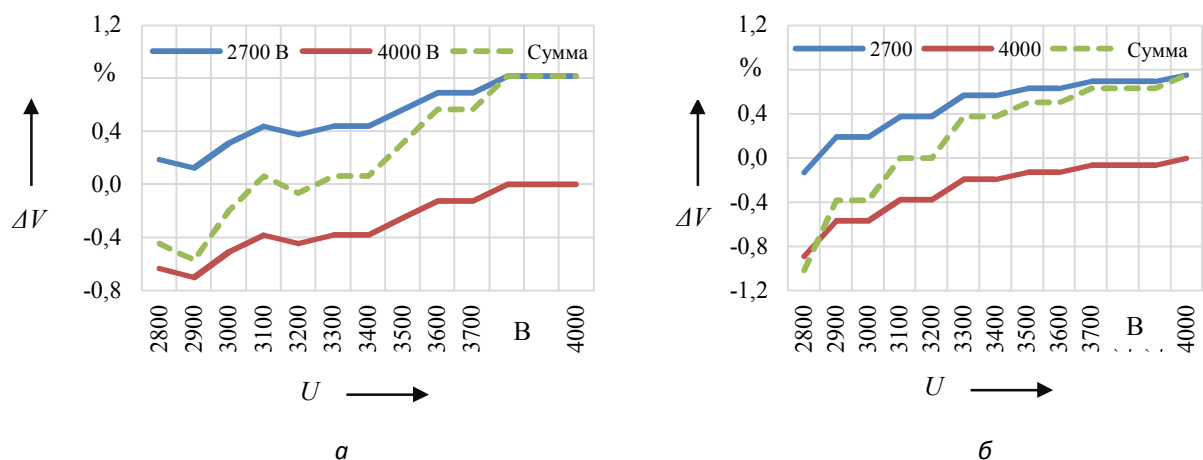


Рисунок 3 – Отклонение технической скорости в нечетном (а) и четном (б) направлениях следования для Velaro RUS для граничных значений напряжения 2700 и 4000 В

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Результаты электрических расчетов, полученные для одиночного следования в границах межподстанционных зон поездов Velaro RUS в диапазоне скоростей от 50 до 250 км/ч, позволяют оценить энергетические характеристики при изменении скорости на участке и характер изменения напряжения.

На примере участка 1 показано влияние максимальной скорости движения на средние значения тока и мощности электропоезда отдельно для режимов тяги и рекуперативного торможения (рисунки 4 и 5 соответственно).

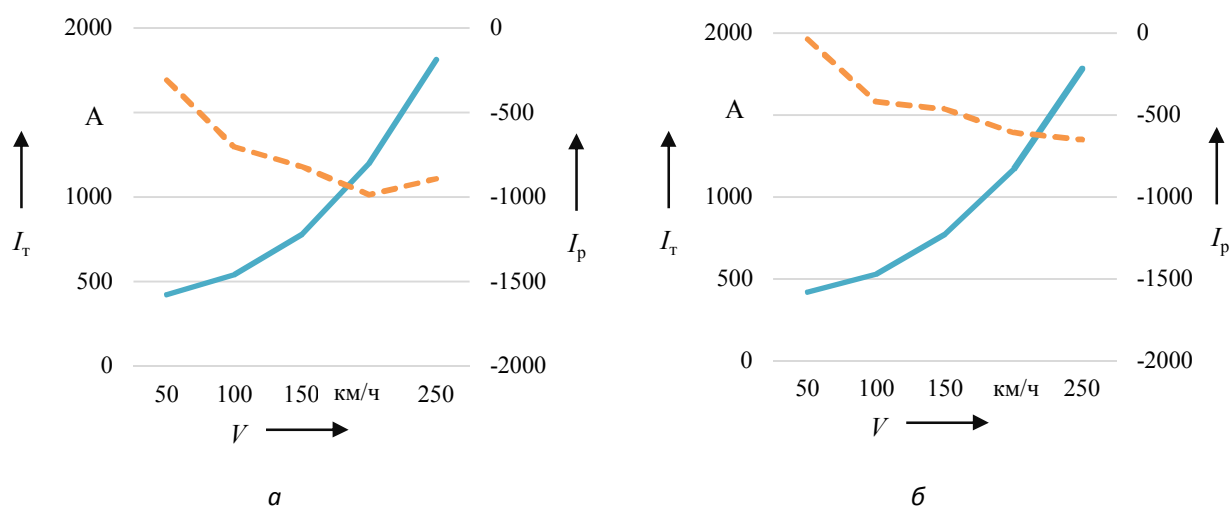


Рисунок 4 – Изменение среднего тока электропоезда Velaro RUS по режимам работы: в нечетном (а) и четном (б) направлениях (для режимов тяги и рекуперации) (— режим тяги; - - - режим рекуперации)

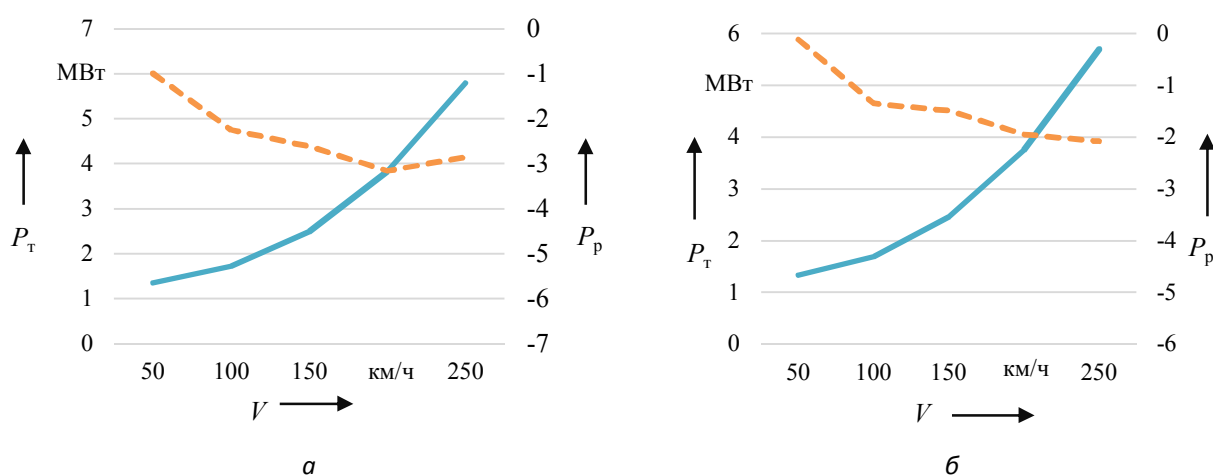


Рисунок 5 – Изменение средней мощности электропоезда Velaro RUS по режимам работы: в нечетном (а) и четном (б) направлениях (— режим тяги; - - - режим рекуперации)

Плотность вероятности тока электропоезда, полученная для максимальных скоростей в диапазоне от 50 до 250 км/ч в четном и нечетном направлениях, показывает, что с увеличением скорости наблюдаются соответствующий рост нагрузки и изменение ее распределения для режимов тяги и рекуперативного торможения: для максимальной скорости 50 км/ч наиболее наблюдаемым является диапазон от 0 до 500 А (более 80 %); при скорости 250 км/ч распределение плотности вероятности в обоих режимах становится близким к равномерному (рисунок 6).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

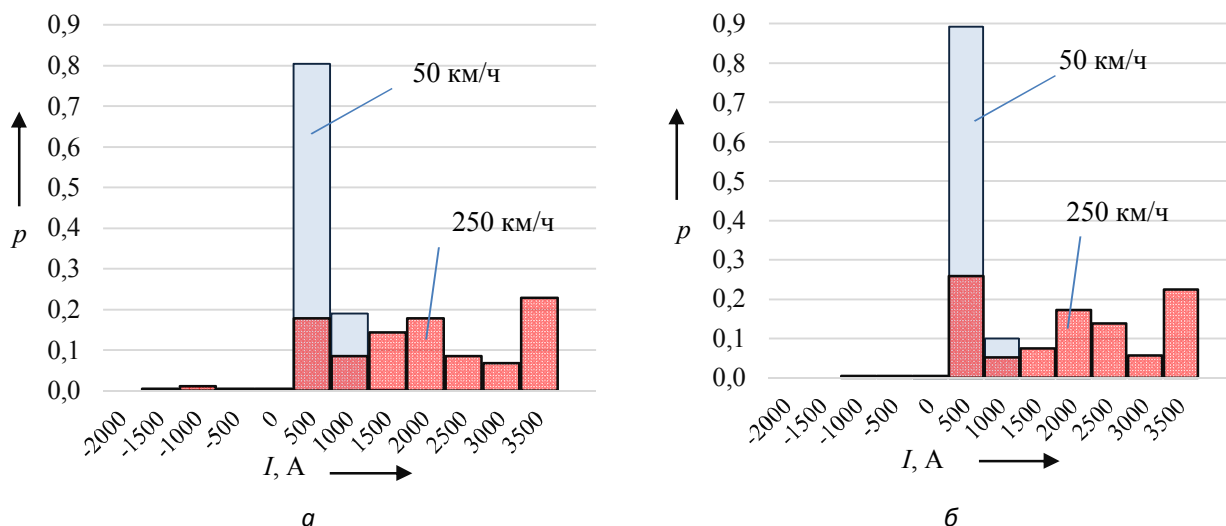


Рисунок 6 – Плотность вероятности тока электропоезда Velaro RUS: в нечетном (а) и четном (б) направлениях

Характер изменения плотности вероятности для режимов тяги и рекуперативного торможения обусловлен режимом ведения поезда, для которого характерно применение торможения перед станциями назначения (в конце маршрута). Изменение тока в пути следования электропоезда для нечетного и четного направлений приведено на рисунке 7.

Имитационное моделирование взаимодействия электропоезда и системы тягового электропитания позволяет получить характер изменения напряжения на токоприемнике и оценить максимальное снижение напряжения. Результаты расчетов для существующих технических скоростей (около 160 км/ч) уровня напряжения на токоприемнике приведены на примере участка 1 на рисунке 8.

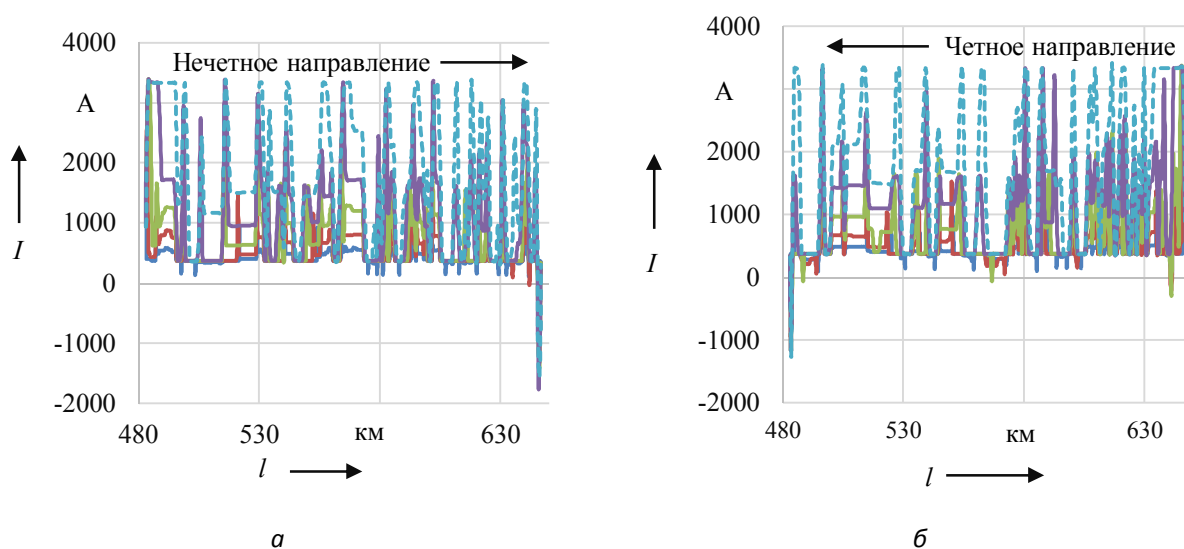


Рисунок 7 – Нагрузка электропоезда Velaro RUS для максимальных скоростей в диапазоне 50 – 250 км/ч в нечетном (а) и четном (б) направлениях
(— 50 км/ч; — 100 км/ч; — 150 км/ч; — 200 км/ч; - - 250 км/ч)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

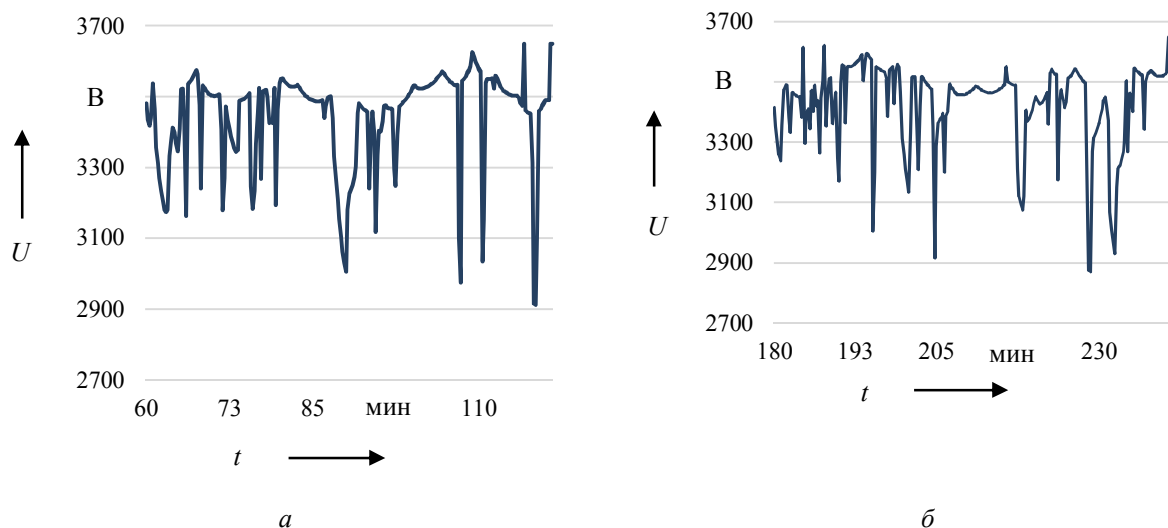


Рисунок 8 – Напряжение на токоприемнике Velaro RUS в нечетном (а) и четном (б) направлениях

С учетом принятого напряжения холостого хода на уровне 3600 В снижение напряжения на токоприемнике при одиночном следовании достигает около 700 В или 20 % от указанного уровня. При решении задачи выравнивания графика нагрузки рассматривается применение бортовых систем накопления электроэнергии на электропоездах Velaro RUS.

Одним из показателей эффективного применения систем накопления является график степени заряженности, сбалансированность которого позволяет обеспечить выравнивание графика нагрузки за счет приема энергии рекуперации и заряда от тяговых подстанций. Для оценки степени сбалансированности необходимо оценить возможность выравнивания графика нагрузки в зависимости от пороговых напряжений U_p для режимов работы и от степени компенсации максимальных токов.

Результаты расчетов для рассматриваемых условий позволяют оценить объем энергии, требующийся для снижения максимальных токов ΔI при различных значениях порогового напряжения разряда. При повышении порогового напряжения увеличивается объем энергии W , необходимый для выравнивания графика. Объем энергии рекуперации W_p , полученный по результатам тяговых расчетов, различается в четном и нечетном направлениях и ограничивает возможности по снижению пиковых значений нагрузки в зависимости от пороговых напряжений, как это показано на рисунке 9.

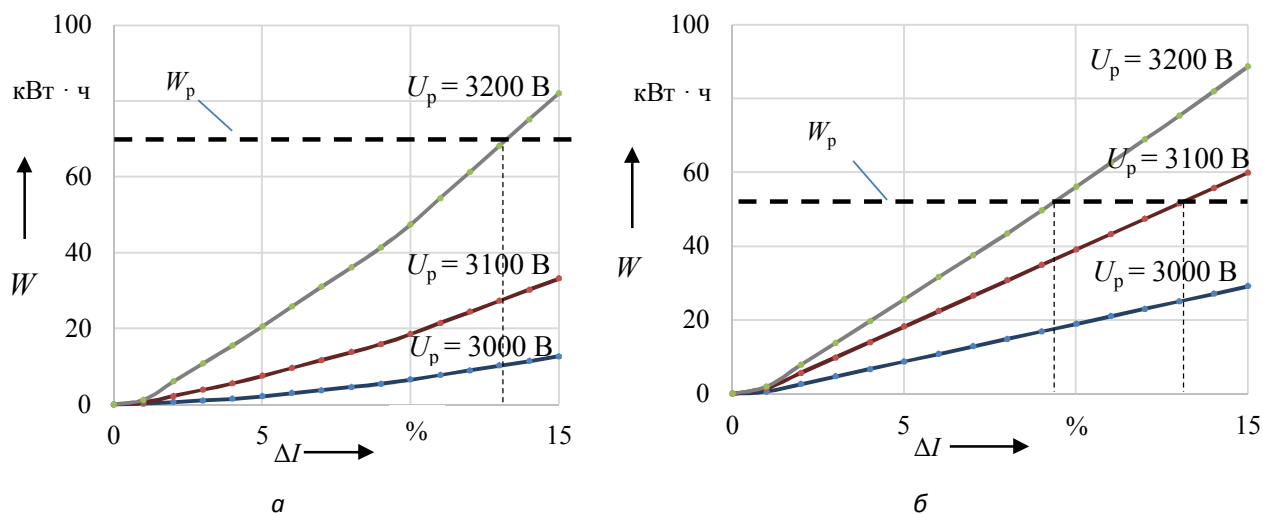


Рисунок 9 – Объем энергии рекуперации в зависимости от ограничения нагрузки Velaro RUS в нечетном (а) и четном (б) направлениях

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Средняя степень заряженности системы накопления с номинальной энергоемкостью 100 кВт · ч при выравнивании графика изменяется в диапазоне от 30 до 90 %, при этом глубина разряда достигает 90 % (рисунок 10).

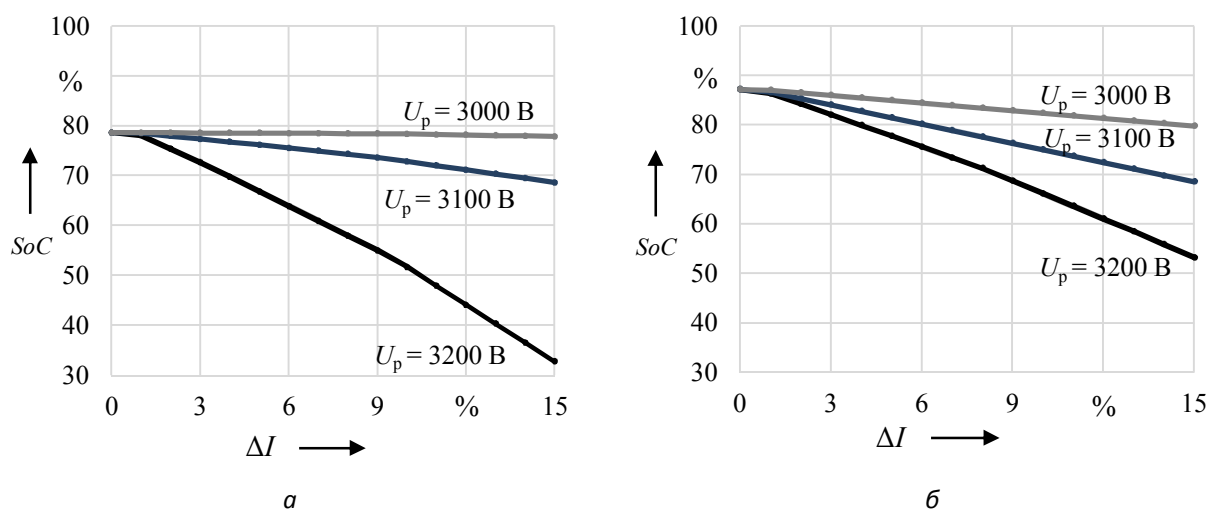


Рисунок 10 – Степень заряженности системы накопления Velaro RUS в нечетном (а) и четном (б) направлениях

По результатам расчетов, выполненных для одного из рассмотренных участков, при увеличении максимальной скорости движения электропоезда минимальное напряжение на токоприемнике (ТКП) снижается с градиентом $-2,5$ В/км/ч в нечетном и $-2,6$ В/км/ч в четном направлении. Для постов секционирования (ПС1 – ПС3), на который наблюдается наибольшее снижение напряжения, градиент изменения не превышает -1 В/км/ч (рисунок 11). При снятии ограничений на энергоемкость (на рисунках 12 и 13 – до 100 кВт · ч) для указанного диапазона скоростей при решении задачи по выравниванию нагрузки электропоезда (при ограничении на нагрузки свыше 15 до 50 % от максимального уровня) максимальная энергоемкость бортовой системы накопления возрастает и составит 600 кВт · ч для нечетного и 435 кВт · ч для четного направления соответственно (см. рисунок 12). Указанные уровни максимальной энергоемкости получены для начальной степени заряженности 75 % и глубины разряда бортовой системы 100 %. В случае реализации заряда в пути следования при повышении напряжения на токоприемнике до уровня напряжения холостого хода на тяговых подстанциях требующийся уровень энергоемкости и глубина разряда сокращаются. Средняя степень заряженности бортовых систем при изменении пороговых значений напряжения разряда в диапазоне от 3000 до 3600 В для наиболее тяжелых условий (отсутствие заряда) изменяется в зависимости от максимальной скорости движения в диапазоне от 75 (начальная степень заряженности) до 0 % (см. рисунок 13).

Полученные результаты определения энергоемкости корреспондируют результатам других расчетов. Так, уровень требующейся энергоемкости для электропоезда Velaro RUS ниже, чем для гибридного электропоезда со скоростью движения до 120 км/ч (технические требования к гибриднему электропоезду приводятся в источнике [14]).

Отличия в энергоемкости обусловлены различными задачами, стоящими перед устройствами накопления, а также мощностью и скоростью движения электропоездов. Для максимальной скорости 120 км/ч расчетная энергоемкость в указанных расчетах для электропоезда составила 850 кВт · ч. В качестве аккумуляторов были выбраны литий-титанатные аккумуляторы электрохимической системы LTO-66160H. Емкость каждого аккумулятора 40 А · ч при номинальном напряжении 2,4 В, ток заряда – 400 А, ток разряда – 800 А. По данным изготовителя нормативное количество циклов «заряд-разряд» должно составить 30 000, а нормативный срок службы аккумулятора – 25 лет. Аналогичные электрохимические системы могут применяться и для рассмотренных электропоездов.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

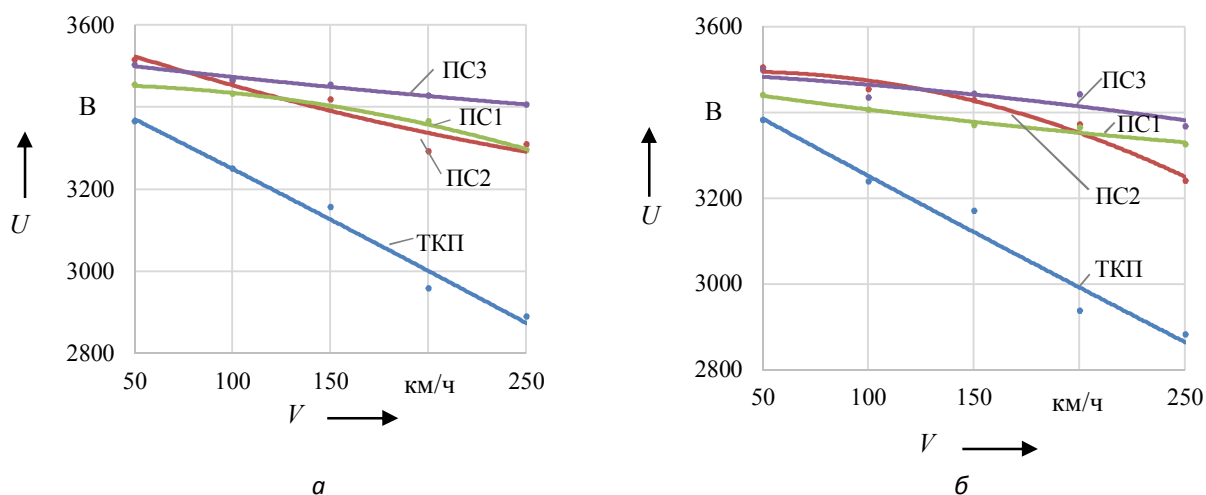


Рисунок 11 – Минимальное напряжение на токоприемнике Velaro RUS в нечетном (а) и четном (б) направлениях

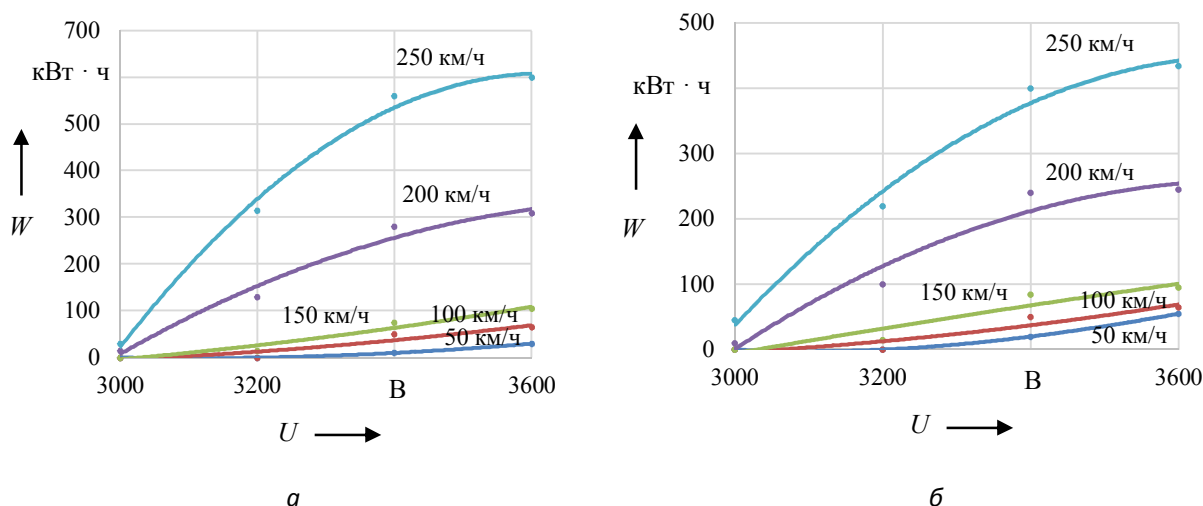


Рисунок 12 – Максимальная энергоемкость бортовой системы накопления Velaro RUS при ограничении максимального тока на 50 % в нечетном (а) и четном (б) направлениях

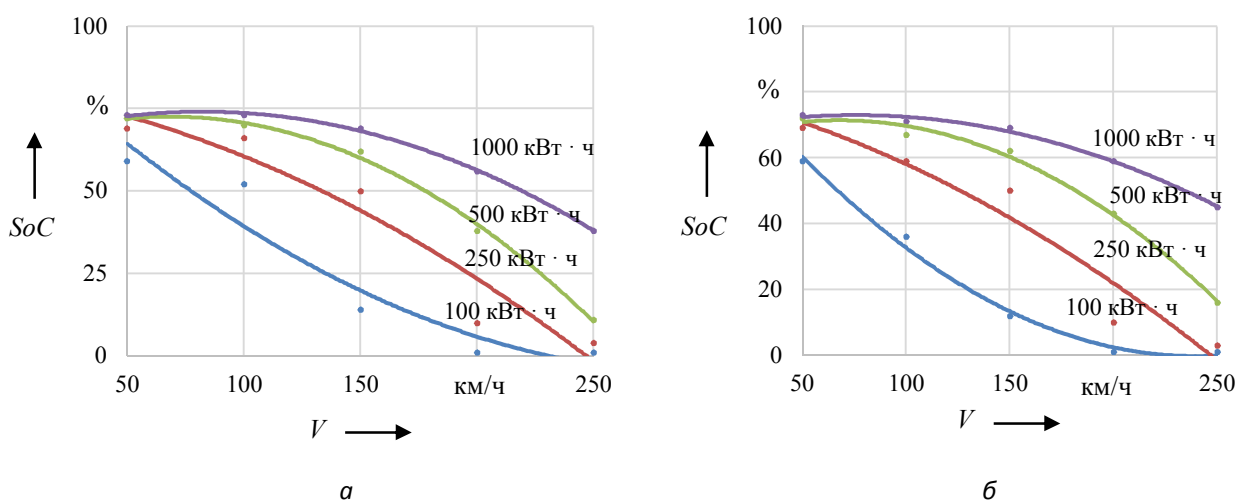


Рисунок 13 – Средняя степень заряженности Velaro RUS при ограничении максимального тока на 50 % в нечетном (а) и четном (б) направлениях

Сравнение результатов по оценке энергоемкости с результатами, полученными ранее для двухпутных и однопутных участков железных дорог [15 – 17], и сравнение энергоемкости для стационарных и бортовых систем накопления [18, 19] показывают, что полученные значения энергоемкости ниже, чем для систем тягового электроснабжения и бортовых систем грузовых электровозов.

Указанное различие обусловлено задачами, решаемыми устройствами накопления в тяговой энергетике. В рассматриваемом случае энергоемкость определена для решения задачи выравнивания графика тяговой нагрузки электропоезда, во втором – для решения задач стабилизации напряжения в контактной сети и повышения эффективности рекуперативного торможения.

Изменение напряжения на токоприемнике Velaro RUS при следовании по четырем рассмотренным участкам обращения при выполнении тяговых расчетов приводит к изменению технической скорости в диапазоне от 0,8 до 1,5 км/ч/1000 В. Результаты расчетов показывают, что отклонение технической скорости при изменении напряжения составляет около 1 %. Указанное обстоятельство позволяет использовать полученные результаты для совершенствования способа расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения, использующего данные тяговых расчетов.

Оценка влияния уровня напряжения на расчеты технической скорости для участков обращения позволяет выбрать расчетный уровень напряжения на основе минимальной погрешности в расчетах. На основании результатов расчетов для Velaro RUS в границах рассматриваемых участков обоснован уровень напряжения на токоприемнике 3200 В, принятый для расчетов энергетических показателей.

Выполнена оценка изменения средних тока и мощности электропоезда в зависимости от максимальной скорости движения на участке. Получено распределение плотности вероятности нагрузки на токоприемнике в одиночном следовании в границах межподстанционной зоны.

При решении задачи по выравниванию графика нагрузки в режиме тяги получено, что энергоемкость на уровне $100 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ обеспечивает снижение максимальных токов и сбалансированный график степени заряженности за счет использования энергии рекуперации электропоезда.

Градиент снижения напряжения на токоприемнике при увеличении скорости движения до максимального значения оценивается на уровне 2,5 В на 1 км/ч. При выравнивании графика нагрузки путем снижения токов нагрузки на 50 % от максимальных значений требующаяся максимальная энергоемкость при отсутствии заряда в течение поездки составляет $600 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Указанный уровень энергоемкости обеспечивает среднюю степень заряженности при движении с максимальной скоростью не ниже 10 %.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о технической эффективности применения бортовых систем накопления в скоростном движении и для последующего сравнения со стационарными системами перейти к исследованиям их эффективности в условиях смешанного движения, а также имитационному моделированию работы систем накопления с различной электротяговой нагрузкой по различным алгоритмам управления.

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

Список литературы

1. Fischer J.W. (2013). Talent 2 electric trainset – Class 442 of Deutsche Bahn. № 137. – 92–98.
2. PHL to Test Progress Rail EMD. Freight, Locomotives, Mechanical, News, Switching & Terminal. November 13, 2020. URL: <https://www.railwayage.com/mechanical/locomotives/phl-to-test-progress-rail-emd-joule/> (дата обращения: 28.02.2022).
3. Tram Powered by Ultra-Capacitor (CNQG). – URL: <https://www.crrcgc.cc/zjensj/g19506/s35642/t288622.aspx> (дата обращения: 28.02.2022).

4. Модуль электрооборудования для тепловоза с гибридной силовой установкой ТЭМ-9Н // snzmomentum.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.snzmomentum.ru/gibrid> (дата обращения: 28.02.2022).
5. Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава / В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, А. В. Агунов, А. В. Третьяков. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2018. – № 10. – С. 55–59.
6. Модель совмещенной тяговой подстанции метрополитена с учетом тяговой нагрузки и потребителей собственных нужд / Л. М. Клячко, М. В. Шевлюгин, М. Н. Белов, А. Е. Голицына. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 22–25.
7. Незевак, В. Л. Моделирование режимов нагрузки на шинах постов секционирования при работе в системе тягового электроснабжения накопителей электроэнергии / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4(68). – С. 159–170.
8. Незевак, В. Л. Сравнение вариантов применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 9. – С. 17–23.
9. Экспериментальное исследование автономного хода электроподвижного состава метрополитена / М. В. Шевлюгин, К. С. Желтов, Д. С. Плетнев, М. Д. Глущенко. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 19–21.
10. Моделирование бортовых систем хранения энергии для гибридного тягового привода / О. С. Валинский, Т. С. Титова, В. В. Никитин, А. М. Евстафьев. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2020. – № 10. – С. 14–18.
11. Шевлюгин, М. В. О применении накопителей энергии в системе электроснабжения мегаполиса на примере Москвы / М. В. Шевлюгин, А. Н. Стадников, А. С. Юдин. – Текст : непосредственный // Электропитание. – 2020. – № 1. – С. 7–31.
12. Модель совмещенной тяговой подстанции метрополитена с учетом тяговой нагрузки и потребителей собственных нужд / Л. М. Клячко, М. В. Шевлюгин, М. Н. Белов, А. Е. Голицына. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 22–25.
13. Ширияев, А. В. Общие сведения об электропоезде Velaro Rus «Сапсан» / А. В. Ширияев, А. Ю. Слизов. – Текст : непосредственный // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2010. – № 2. – С. 213–223.
14. Гибридный поезд. Как будет работать российский локомотив на аккумуляторах // gudok.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://gudok.ru/content/science_education/1598983/ (дата обращения: 01.04.2022).
15. Незевак, В. Л. О сравнении энергетических параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81. – № 1. – С. 38–52.
16. Незевак, В. Л. Условия работы системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении постоянного тока однопутных участков железных дорог / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – Т. 80. – № 4. – С. 216–224.
17. Незевак, В. Л. Определение мощности и энергоемкости систем накопления электроэнергии для улучшения эксплуатационных показателей тягового электроснабжения / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 9–25.
18. Валинский, О. С. К вопросу определения емкости накопителя энергии для тягового подвижного состава железных дорог / О. С. Валинский, А. М. Евстафьев, В. В. Никитин. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2021. – № 2. – С. 8–11.

19. Незевак, В. Л. Сравнение вариантов применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 9. – С. 17–23. – DOI 10.36535/023619142020094.

References

1. Fischer J.W. (2013). Talent 2 electric trainset – Class 442 of Deutsche Bahn. № 137. – 92–98.
2. PHL to Test Progress Rail EMD. Freight, Locomotives, Mechanical, News, Switching & Terminal. November 13, 2020. Available at: <https://www.railwayage.com/mechanical/locomotives/phl-to-test-progress-rail-emd-joule/> (accessed: 28.02.2022).
3. Tram Powered by Ultra-Capacitor (CNQG). Available at: <https://www.crrcgc.cc/zjensj/g19506/s35642/t288622.aspx> (accessed: 28.02.2022).
4. Modul' elektrooborudovaniya dlya teplovoza s gibridnoj silovoj ustanovkoj TEM-9N. Available at: <https://www.snmomentum.ru/gibrid> (accessed: 28.02.2022).
5. Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Agunov A. V., Tret'yakov A. V. Possibilities of rational use of braking energy of electric rolling stock. *Elektrotekhnika – Electrical engineering*, 2018, no. 10, pp.55-59 (In Russian).
6. Klyachko L.M., Shevlyugin M.V., Belov M.N., Golicyna A.E. A model of a combined traction substation of the metro, taking into account the traction load and consumers' own needs. *Elektrotekhnika – Electrical engineering*, 2021, no. 9, pp. 22-25 (In Russian).
7. Nezevak V.L. Modeling of load modes on the tires of partitioning posts when working in the traction power supply system of electric power storage devices. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta pu-tej soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State University of Railways*, 2017, no. 4 (68), pp. 159-170 (In Russian).
8. Nezevak V.L. Comparison of options for the use of electric power storage devices in a traction power supply system and on an electric rolling stock. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informacionnyy sbornik – Transport: science, technology, management. Scientific information collection nickname*, 2020, no. 9, pp. 17-23 (In Russian).
9. Shevlyugin M.V., Zheltov K.S., Pletnev D.S., Glushchenko M.D. Experimental study of autonomous running of electric rolling stock of the metro. *Elektrotekhnika – Electrical engineering*, 2021, no. 9, pp. 19-21 (In Russian).
10. Valinskij O.S., Titova T.S., Nikitin V.V., Evstafev A.M. Simulation of on-board energy storage systems for hybrid traction drive. *Elektrotekhnika – Electrical engineering*, 2020, no. 10, pp. 14-18 (In Russian).
11. Shevlyugin M.V., Stadnikov A.N., Yudin A.S. About the use of energy storage devices in the power supply system of a megalopolis on the example of Moscow. *Elektropitanie – Power supply*, 2020, no. 1, pp. 7-31 (In Russian).
12. Klyachko L.M., Shevlyugin M.V., Belov M.N., Golicyna A.E. A model of a combined traction substation of the metro, taking into account the traction load and consumers' own needs. *Elektrotekhnika – Electrical engineering*, 2021, no. 9, pp. 22-25 (In Russian).
13. Shiryaev A.V., Slizov A.Yu. General information about the Velaro Rus «Sapsan» electric train. *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrozostroyeniya – Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Engineering*, 2010, no. 2, pp. 213-223 (In Russian).
14. *Gibridnyy poezd. Kak budet rabotat' rossijskij lokomotiv na akkumulyatorah* [Hybrid train. How will a Russian locomotive run on batteries]. Available at: https://gudok.ru/content/science_education/1598983/ (accessed: 01.04.2022).
15. Nezevak V.L. Comparison of energy parameters of electric power storage systems for DC and AC traction power supply systems. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*, 2022, vol. 81, no. 1, pp. 38-52 (In Russian).

16. Nezevak V.L. Operating conditions of the electric power storage system in DC traction power supply of single-track sections of railways. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*, 2021, vol. 80, no. 4, pp. 216-224 (In Russian).

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

18. Valinskij O.S., Evstafev A.M., Nikitin V.V. On the issue of determining the capacity of the energy storage for traction rolling stock of railways. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2021, no. 2, pp. 8-11 (In Russian).

19. Nezevak V.L. Comparison of options for the use of electric power storage devices in a traction power supply system and on an electric rolling stock. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyj informacionnyj sbornik – Transport: science, technology, management. Scientific information collection nickname*, 2020, no. 9, pp. 17-23 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nezevakwl@mail.ru.

Дмитриев Александр Дмитриевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7-908-117-96-71.

E-mail: alexandrorado@mail.ru

Самолинов Святослав Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7-908-117-96-71.

E-mail: samolinov97@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Незевак, В. Л. Анализ характеристик тяговой нагрузки на скоростных участках для определения условий работы устройств накопления электроэнергии / В. Л. Незевак, А. Д. Дмитриев, С. С. Самолинов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 12 – 29.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: nezevakwl@mail.ru.

Dmitriev Alexander Dmitrievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: alexandrorado@mail.ru

Samolinov Svyatoslav Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: +7-999-470-59-93.

E-mail: samolinov97@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nezevak V.L., Dmitriev A.D., Samolinov S.S. Analysis of the characteristics of the traction load on high-speed sections to determine the operating conditions of power storage devices. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 12-29 (In Russian).

Б. А. Аржанников, А. В. Паранин

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

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦЕПНОЙ КОМПЕНСИРОВАННОЙ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ С РЫЧАГАМИ ДЛЯ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. Рассмотрен вариант применения цепной контактной компенсированной подвески с рычагами и боковым токосъемом для трехфазной системы тягового электроснабжения (ТСТЭ). Две разнофазные контактные подвески располагаются с разных сторон от оси пути. Электроподвижной состав должен иметь два токоприемника, которые давят на контактный провод от оси пути в противоположные стороны. Произведено описание конструкции контактной подвески в целом и основных узлов, в частности крепление стержней, что позволяет обеспечить вертикальный зигзаг и ограничить поперечное перемещение контактного провода. В точках у опор рычаги соединены с консолями и имеют узел для создания угловой жесткости. Кроме этого поворот данных рычагов ограничен в сторону к оси пути и в противоположную сторону. Этим самым предотвращается возможность схлестывания разнофазных контактных проводов. В соответствии с указанной конструкцией была разработана математическая модель данной контактной подвески на основе метода конечных элементов, обеспечивающая расчет в статике и динамике с учетом токоприемника. Для описания токоприемника используется распространенная трехмассовая модель. На основе анализа результатов, полученных с помощью данной модели, определено влияние конструктивных параметров подвески, поперечного ветра и скорости движения токоприемника на качество токосъема, установлены границы применимости рассматриваемой подвески в зависимости от величины данных параметров. Определено, что в отличие от обычной контактной подвески с вертикальным токосъемом для подвесок с боковым токосъемом значительное влияние на качество токосъема оказывает боковой ветер. Именно скорость ветра является основным фактором, ограничивающим возможность применения подвески с боковым токосъемом.

Ключевые слова: трехфазная система тягового электроснабжения, цепная компенсированная контактная подвеска, контактный провод, несущий трос, рычаг, шарнирный зажим, полз токоприемника, вертикальный зигзаг, рабочая область, численное моделирование, качество токосъема, длина пролета.

Boris A. Arzhannikov, Alexander V. Paranin

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

CALCULATION OF PARAMETERS AND EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF USING CHAIN COMPENSATED CONTACT SUSPENSION WITH LEVER FOR A THREE-PHASE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Abstract. A variant of application of a contact compensated chain suspension with levers and lateral current collection for a three-phase traction power supply system (TSTE) is considered. Two different-phase contact suspensions are located on different sides of the track axis. The electric rolling stock must have two current collectors that press on the contact wire from the track axis in opposite directions. The description of the design of the contact suspension as a whole and the main components, in particular, the fastening of the rods, which makes it possible to provide a vertical zigzag and limit the transverse movement of the contact wire, is made. At points at the supports, the levers are connected to the consoles and have a knot to create angular rigidity. In addition, the rotation of these levers is limited towards the axis of the path and in the opposite direction. This prevents the possibility of lashing of different-phase contact wires. In accordance with this design, a mathematical model of this contact suspension was developed based on the finite element method, which provides calculation in statics and dynamics, taking into account the current collector. To describe the pantograph, a common three-mass model is used. Based on the analysis of the results obtained using this model, the influence of the design parameters of the suspension, cross wind and the speed of the pantograph movement on the quality of the current collection is determined, the limits of applicability of the suspension under consideration, depending on the value of these parameters, are established. It has been determined that, in contrast to a conventional contact suspension with a vertical current collection, for suspensions with a lateral current collection, a side wind has a significant effect on the quality of the current collection. It is the wind speed that is the main factor limiting the possibility of using a suspension with lateral current collection.

Keywords: three-phase traction power supply system, compensated chain contact suspension, contact wire, carrying cable, lever, articulated clamp, pantograph skid, vertical zigzag, working area, numerical simulation, current collection quality, span length.

Существующая однофазная система электрической тяги напряжением 25 кВ обладает рядом известных недостатков, многие из которых связаны с тем, что тяговая нагрузка является однофазной, а питающее напряжение трехфазным. В работе [1] предлагается вариант трехфазной системы электрической тяги (ТСТЭ), которая имеет лучшие технико-энергетические характеристики по сравнению с однофазной, является симметричной системой, не требует нейтральных вставок. Две разнофазные контактные подвески расположены над путями, а третьей фазой является рельс. Линейное напряжение между всеми фазами 25 кВ. Существенной проблемой в данном случае является необходимость разработки такой разнофазной контактной подвески и оценка возможности ее принципиальной работоспособности, подбор параметров.

С учетом соблюдения существующих габаритов на железной дороге и допустимых расстояний по условиям изоляции в настоящее время рассматривается контактная подвеска с боковым токосъемом. Две разнофазные контактные подвески располагаются над крышей подвижного состава с обеих сторон от оси пути. На крыше электроподвижного состава (ЭПС) предполагается наличие двух токоприемников. Каждый из них снимает тяговый ток со своей контактной подвески. Нажатие каждого из двух токоприемников направлено вбок от оси пути в сторону своей контактной подвески. Полосы токоприемников при боковом токосъеме ориентированы вертикально.

В работе [2] был проанализирован вариант простой контактной подвески с поршневыми точками подвеса у опор. В данной статье исследуется уже цепная компенсированная подвеска с рычагами между контактным проводом (КП) и несущим тросом (НТ).

Описание конструкции. Для ТСТЭ [1] возможно рассмотреть вариант цепной контактной подвески с НТ и КП отдельно для каждой из двух фаз. Учитывая необходимость обеспечения бокового токосъема для крепления контактного провода, целесообразно использовать изогнутые рычаги, верхние концы которых соединяются через струны с несущим тросом. Изгиб рычага подобран таким образом, чтобы предотвратить касание его полосом токоприемника (рисунок 1).

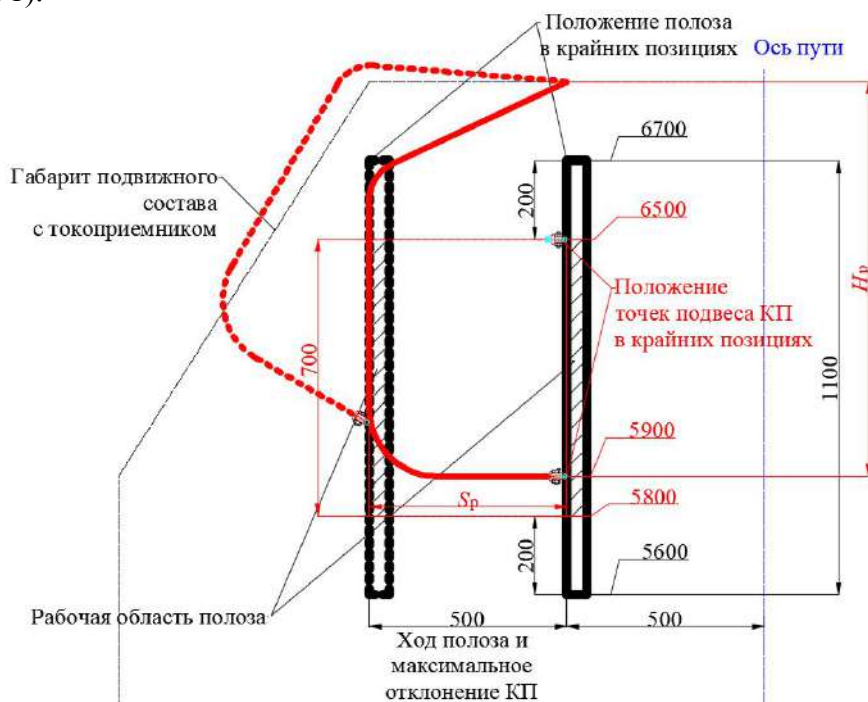


Рисунок 1 – Размеры рабочей области полоза токоприемника, его расположение в поперечной плоскости и высота точек подвеса КП

Из рисунка 1 видно, что ход полоза и положение в крайних позициях совпадают с аналогичными параметрами для контактной простой подвески с поршневými точками подвеса. Предлагается механически ограничить движение полоза за пределы крайних позиций, а полз не должен находиться к оси пути ближе, чем 500 мм, и не далее, чем 1000 мм.

На всей рабочей области полоза система подвижных рам должна обеспечивать стабильность статической составляющей контактного нажатия величиной 70 Н. Для рассматриваемого случая ход полоза и соответственно, рабочий ход системы подвижных рам составляет 500 мм, что примерно в три раза меньше, чем у существующих токоприемников, поэтому система подвижных рам токоприемника, соответствующего рисунку 1, может иметь гораздо меньшие размеры и массу. Систему подвижных рам токоприемника необходимо разместить между двумя разнофазными КП, находящимися на расстоянии 1 м друг от друга. Два токоприемника будут находиться в непосредственной близости друг от друга и давить на КП от оси пути каждый в свою сторону. Этим предотвращается возможность перекрытия воздушного промежутка между КП одной фазы и токоприемником, который снимает ток с КП другой фазы. По этой причине опасно использовать только один токоприемник бокового токосъема, размещенный между двух разнофазных КП.

Контактную подвеску предлагается делать компенсированной с целью поддержания постоянной высоты и натяжения КП в каждой точке при изменении температуры проводов. Вертикальный зигзаг КП для цепной подвески с рычагами реализуется так же, как и для простой подвески с поршневými точками подвеса. Высота подвеса КП и НТ относительно уровня головки рельса (УГР) постепенно меняется на каждой опоре. За несколько пролетов точка подвеса КП перемещается от крайнего нижнего до крайнего верхнего положения. Конструктивная высота подвески h_0 , а также размеры рычагов КП во всех пролетах одинаковые. Высота рычага H_p и длина бокового изгиба S_p , а также радиусы скруглений (см. рисунок 1), форма и размеры поперечного сечения, материал необходимо подбирать исходя из предотвращения возможности касания полоза, обеспечения качества токосъема, механической прочности и жесткости самих рычагов.

Сверху рычаг через шарнирный зажим крепится к струне, которая соединяется с НТ (рисунок 2). Дополнительно в шарнирном зажиме необходимо предусмотреть путь протекания тока при движении конструкции. Это позволит исключить электрохимический (дуговой) износ его сочленения и надежно передавать ток из НТ в КП. За счет регулировки длины струн можно добиться более равномерной траектории КП по высоте над УГР в пролете по сравнению с простой подвеской. Нужно отметить, что при боковом токосъеме равномерность траектории КП по высоте не имеет такого большого значения, как при вертикальном токосъеме.

Для рассмотренной конструкции контактной подвески отклонение КП поперек оси пути под действием ветра ограничивается только горизонтальной

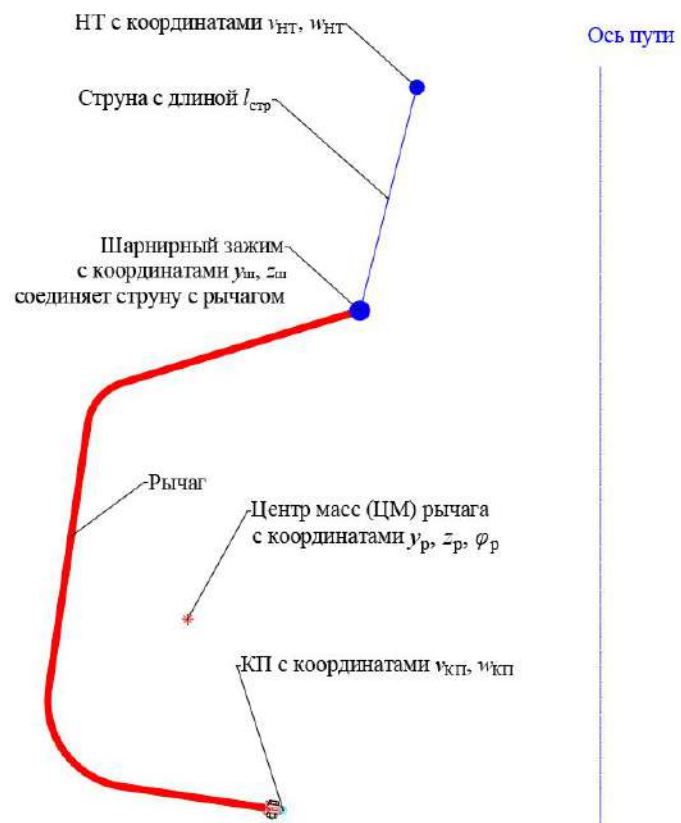


Рисунок 2 – Схема соединения рычага с проводами и координатами элементов



Рисунок 3 – Схема крепления рычагов к консоли для ограничения подвижности КП поперек оси пути

проекцией реакции рычагов, закрепленных с помощью струн на НТ. Следует учитывать, что под действием ветра возможно выдувание КП за рабочий диапазон хода полоза, который составляет всего 500 мм. К примеру, при указанных выше параметрах подвески и скорости ветра поперек пути 20 м/с контактный провод уже выдувается почти на всем расчетном участке за пределы рабочего хода полоза. В этом случае при проходе токоприемника будет постоянно гореть дуга, что недопустимо.

Для уменьшения возможности движения КП поперек оси пути предлагаются рычаги, расположенные у опор, крепить их нужно непосредственно к консоли и ограничивать допустимые углы поворота рычага в обе стороны. Дополнительно целесообразно предусмотреть угловую жесткость при повороте данных рычагов. Схематично предлагаемое решение показано на рисунке 3.

Поскольку предлагаемая конструкция подвески существенно отличается от стандартной используемой цепной контактной подвески с вертикальным токо съемом, то многие существующие нормы и технические требования [3, 4] не применимы. Поэтому для проверки пригодности к эксплуатации предлагаемой подвески и оценки технических требований к ней разработана математическая модель, произведены расчеты с разными параметрами и проанализированы результаты.

Математическая модель. Для расчета геометрических и механических характеристик контактной подвески и качества токо съема разработана математическая модель. Контактный провод и несущий трос представлены как гибкие нити дифференциальными уравнениями [2, уравнение (3)], приведенными в описании математической модели простой контактной подвески с поршневými точками подвеса. Поля перемещений контактного провода по осям x , y и z обозначены соответственно u , v и w с индексами КП для контактного провода и НТ для несущего троса. Рычаги КП представлены как абсолютно твердые тела, струны описаны как пружины, работающие только на растяжение.

Движение рычагов контактного провода возможно в плоскостях, перпендикулярных оси пути и содержащих координаты его центра масс y_p , z_p , угол поворота φ_p в данной плоскости, шарнирного зажима задан координатами $y_{ш}$, $z_{ш}$ (см. рисунок 2). Для каждого рычага и шарнирного зажима составляется система уравнений равновесия в виде суммы проекций сил по оси Y и Z , а для рычага также суммы моментов этих сил относительно центра масс (ЦМ). В сумму моментов входит также момент, равный произведению углового ускорения рычага на его момент инерции. Поскольку рычаги и шарниры одинаковые, то их массово-геометрические характеристики тоже одинаковы. Схема действия сил на рычаг и шарнирный зажим показана на рисунке 4.

В соответствии с рисунком 4 условие равновесия для рычага будет иметь вид:

$$\begin{cases} -m_p \cdot \ddot{z}_p + F_{air_p} + R_{кп_p}^z + R_{ш_p}^z = 0; \\ -m_p \cdot \ddot{y}_p - m_p \cdot g + R_{кп_p}^y + R_{ш_p}^y = 0; \\ -I_p \cdot \ddot{\varphi}_p + M(R_{кп_p}) + M(R_{ш_p}) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где m_p – масса рычага, кг;

I_p – момент инерции рычага, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$R_{\text{КП}_p}$ – реакция в точке соединения рычага и КП, Н;

$R_{ш-р}$ – реакция в точке соединения рычага и шарнирного зажима, Н;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

$F_{air\ p}$ – сила воздействия ветра на рычаг, Н;

$M(R_{\text{КП_р}})$ – момент относительно центра масс рычага от реакции соединения рычага и КП,
Н · м;

$M(R_{\text{ш_р}})$ – момент относительно центра масс рычага от реакции соединения рычага и шарнирного зажима, Н · м.

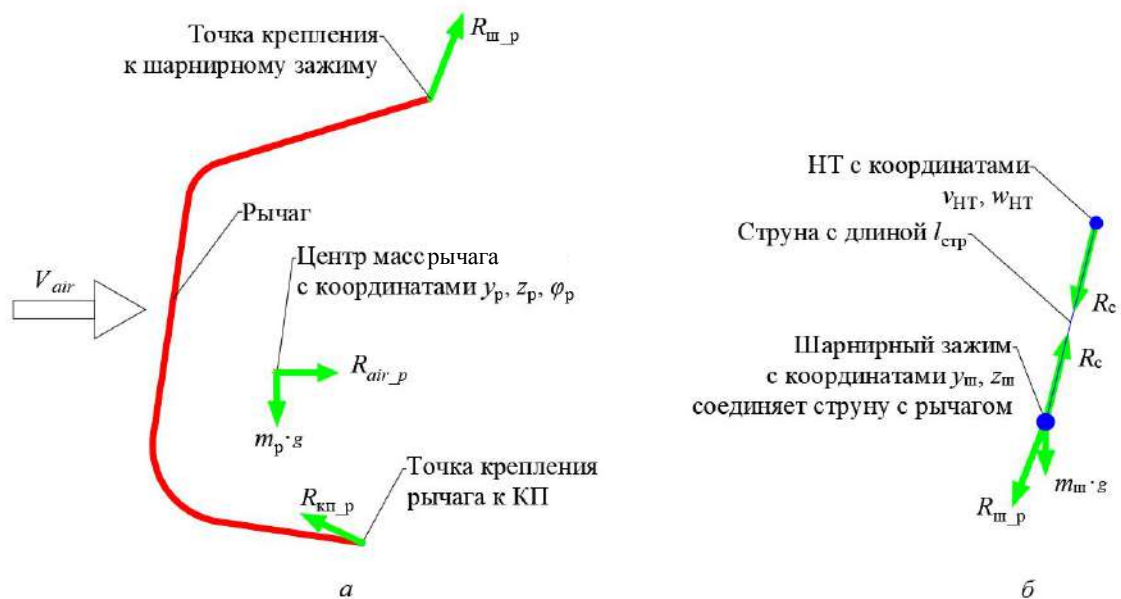


Рисунок 4 – Схема воздействия сил на рычаг (а) и шарнирный зажим (б)

Сила воздействия ветра на рычаг определяется по выражению

$$F_{air\ p} = C_p \cdot \rho_{air} \cdot d_p \cdot V_{air}^2 \cdot \text{sign}(V_{air}) \cdot (y_{\text{ш}} - y_{\text{КП}}),$$

где C_p – аэродинамический коэффициент рычага, равный 1;

ρ_{air} – ПЛОТНОСТЬ ВОЗДУХА, КГ/М³;

d_p – диаметр рычага, м;

 V_{air} – скорость ветра, м/с;

sign – функция определения знака.

Для рычага, который крепится непосредственно к консоли (см. рисунок 3), в уравнение суммы моментов добавляется еще два слагаемых: рабочий момент $M_{\text{раб}}$, создаваемый рабочей угловой жесткостью $c_{\text{раб}}$, и момент ограничения $M_{\text{огр}}$, который возникает, когда угол поворота рычага выходит за допустимые пределы.

Уравнение равновесия для шарнирного зажима, соединяющего рычаг и струну (см. рисунок 4), будет таким:

$$\begin{cases} -m_{\text{w}} \cdot \ddot{z}_{\text{w}} - R_{\text{w}_p}^z + R_{\text{c}}^z = 0; \\ -m_{\text{w}} \cdot \ddot{y}_{\text{w}} - m_{\text{w}} \cdot g - R_{\text{w}_p}^y + R_{\text{c}}^y = 0, \end{cases} \quad (2)$$

Где $m_{\text{ш}}$ – масса шарнирного зажима, кг;

R_c – реакция струны, Н.

Для рычага, который крепится непосредственно к консоли (см. рисунок 3), координаты шарнирного зажима $y_{ш}$, $z_{ш}$ заданы и не рассчитываются.

Реакция струны должна возникать только в случае, когда она работает на растяжение, поэтому она определяется по формулам:

$$R_c = \begin{cases} (l_c - l_{c0}) \cdot c_c, & \text{если } (l_c - l_{c0}) > 0; \\ 0, & \text{если } (l_c - l_{c0}) \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где l_c – расчетная длина струны, м;

l_{c0} – заданная длина струны, м;

c_c – условный коэффициент жесткости струны, принимаемый равным 2 кН/мм.

Расчетная длина струны определяется через расчетные переменные:

$$l_c = \sqrt{(w_{HT} - z_{ш})^2 + (v_{HT} - y_{ш})^2}. \quad (4)$$

Реакции в точках соединения рычага с шарниром и КП определяются по методу штрафа исходя из разности между координатой этих элементов и координатой точек рычага, которые крепятся непосредственно к шарниру, зажиму или КП. К примеру, выражение для реакции $R_{КП_р}^z$ (проекция на ось z реакции в точке соединения КП и рычага) будет такой:

$$R_{КП_р}^z = c_{крепл} \cdot (w_{КП} - z_{р_т. КП}), \quad (5)$$

где $c_{крепл}$ – условный коэффициент жесткости крепления, принимаемый равным 2 кН/мм;

$z_{р_т. КП}$ – координата по оси z точки крепления рычага к КП, м.

Координата каждой точки рычага, в том числе и точек крепления, определяется через координаты его центра масс и угол поворота $z_{р_т. КП} = f(z_p, y_p, \varphi_p)$. Это означает, что сила $R_{КП_р}^z$ будет зависеть от координат рычага и КП, т. е. от расчетных переменных.

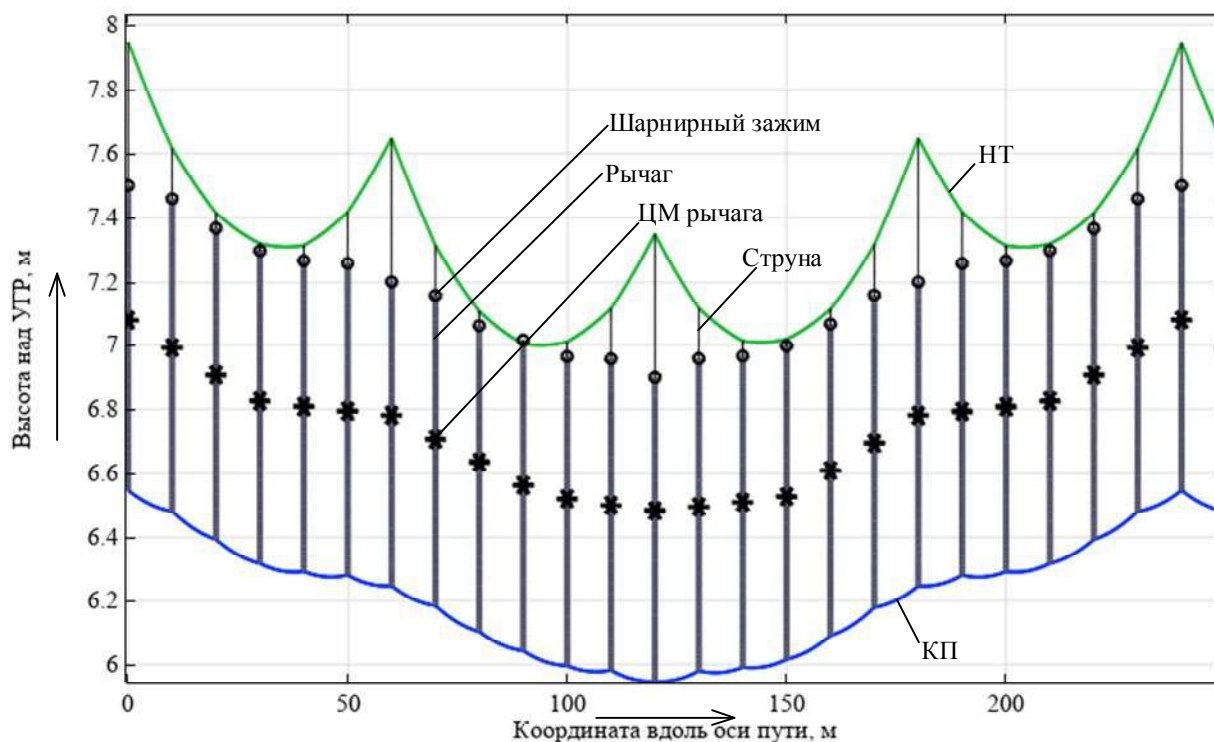
Аналогично будут находиться все остальные проекции реакций в точках соединения рычага с шарниром и КП. Таким образом, условия равновесия рычага с шарнирным зажимом замыкаются через расчетные переменные $y_p, z_p, \varphi_p, y_{ш}, z_{ш}, v_{кп}, w_{кп}, v_{кп}, w_{HT}$. Это означает, что к общей системе уравнений равновесия добавляется в местах крепления рычагов дополнительно пять степеней свободы: три для рычага и два для шарнирного зажима.

В точках крепления НТ к консоли заданы граничные условия Дирихле с заданными значениями его вертикальной и поперечной координаты. В точках соединения рычагов с КП задано граничное условие Неймана с величиной силы $R_{КП_р}$.

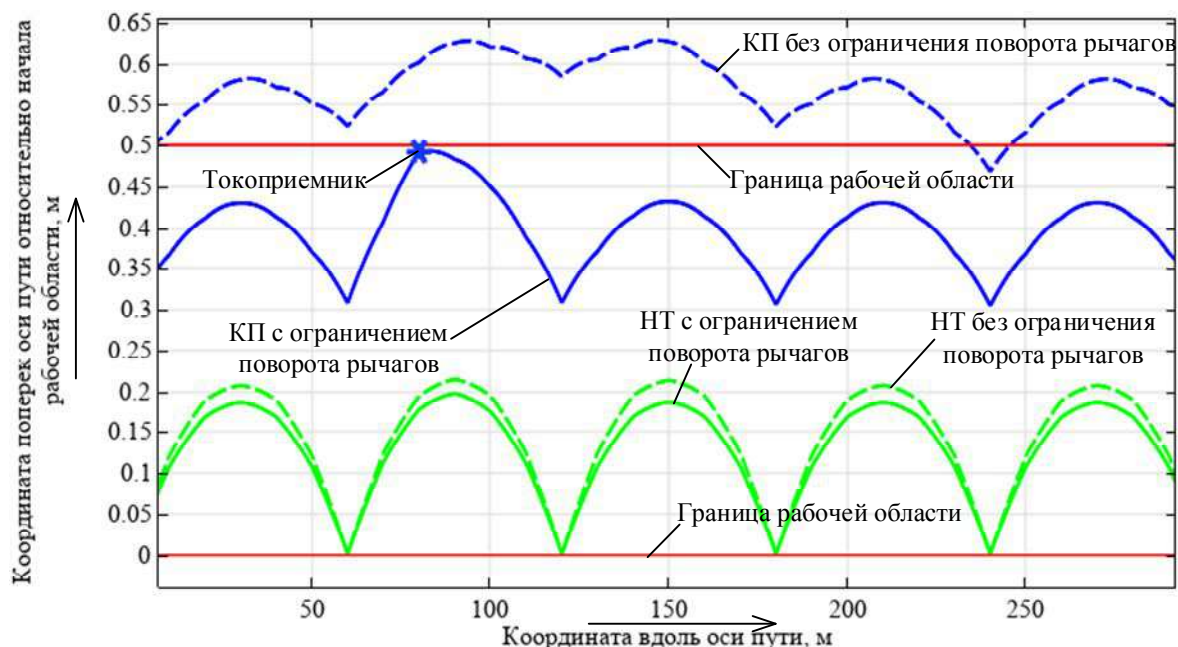
Математическая модель токоприемника в целом аналогична модели, приведенной в описании математической модели простой контактной подвески с поршневыми точками подвеса [2, табл. 2 и формула (10)]. Для уравнения полоза добавлены две силы, которые равны нулю, когда полз находится в рабочей области, и резко возрастают, когда полз переходит одну из границ. По сути это также метод штрафа, схожий с методом описания контакта КП и полоза [6, 7]. Как и для простой подвески с поршневыми точками подвеса, здесь конечно-элементная модель была построена в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

Основные результаты моделирования. Расположение подвески вдоль оси пути и реализация вертикального зигзага КП представлены на рисунке 5, который является результатом численного расчета описанной выше математической модели. Аналитическое решение системы уравнений на современном этапе развития вычислительных систем не представляется целесообразным, так как численные методы позволяют получить приемлемую точность вычислений.

Для результатов, показанных на рисунке 5, были приняты следующие условия: длина пролета – 60 м, вертикальный зигзаг реализуется за два пролета, гололед, боковой ветер и нажатие токоприемника отсутствуют, высота рычага $H_p = 1,0$ м и длина бокового изгиба $S_p = 0,4$ м, КП марки МФ-100 имеет натяжением 10 кН, а НТ марки М-120 – 18 кН.



На рисунке 6 показано расположение проводов подвески НТ и КП в плане пути при боковом ветре от оси пути 20 м/с, остальные параметры соответствуют случаю, рассмотренному на рисунке 5. Сплошные линии – случай без ограничения угла поворота рычагов у опор, пунктирная линия – случай с ограничением угла поворота рычагов у опор 0,305 рад от оси пути и 0,0 рад к оси пути.



Звездочкой на рисунке 6 показано предельное положение полоза токоприемника. Если угол поворота рычагов не ограничен, то при рассматриваемой скорости ветра полз не достает

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

КП. При заданных ограничениях угла поворота нажатие полоза составляет 70 Н. Данный расчет произведен в статическом режиме.

Рассмотрим влияние скорости ветра поперек оси пути на качество токосъема. Скорость движения ЭПС задана 100 км/ч, параметры контактной подвески приняты такими же, как и для результатов, представленных на рисунке 5, за исключением добавления элемента угловой жесткости в рычагах у опор, величина которой составляет $400 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$. На рисунке 7 приведен мгновенный результат расчета взаимодействия токоприемника с рассматриваемой контактной подвеской. Ветер направлен от оси пути в направлении координатной оси Z .

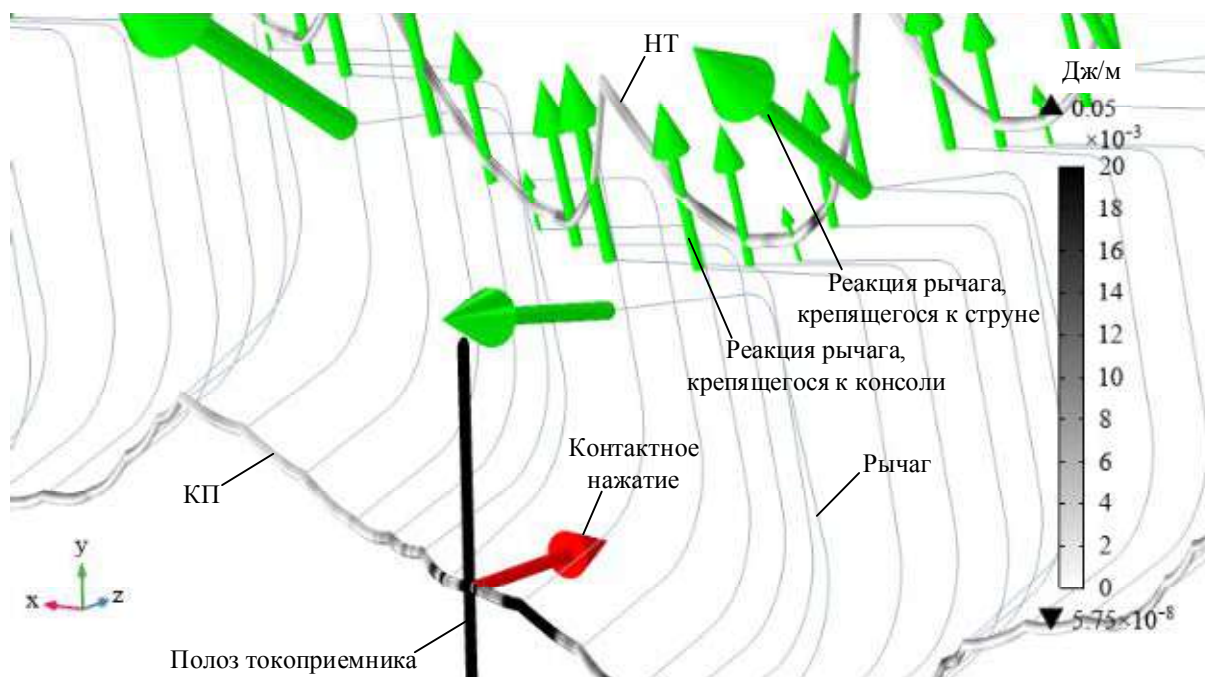


Рисунок 7 – Графический результат моделирования динамики взаимодействия токоприемника и контактной подвески в момент времени 4.51 с от начала расчета, скорость ветра поперек оси пути 20 м/с

Утолщенной монохромной линией на рисунке 7 снизу изображен КП, сверху – НТ. Яркость линии означает величину погонной кинетической энергии колебаний проводов в джоулях на метр, цветовая шкала находится справа. Такой подход позволяет наглядно представить процесс интерференции механических волн в контактной подвеске. Черная утолщенная вертикальная линия примерно по центру снизу рисунка представляет собой полз токоприемника. Стрелка от него в точке касания КП – это сила контактного нажатия. Тонкие изогнутые серые линии представляют собой рычаги. Силы реакции рычагов в точках крепления к струнам или к консоли (у рычагов рядом с опорами) также обозначены стрелками. У рычагов, закрепленных к консоли, которые имеют ограничение углов поворота и угловую рабочую жесткость при повороте, реакции, как правило, больше по величине и при ветре расположены более горизонтально по сравнению с реакциями рычагов, которые крепятся к струнам и далее к НТ.

Из рисунка 7 видно, что интенсивность волн в КП существенно больше, чем в НТ. Рычаги за счет своей инерции передают колебания на НТ хуже, чем гибкие струны в обычной существующей контактной подвеске с верхним токосъемом.

На рисунках 8 – 10 показаны соответственно график величины контактного нажатия токоприемника вдоль оси пути, спектральная плотность данной функции и гистограмма распределения контактного нажатия как случайной величины при разной скорости ветра.

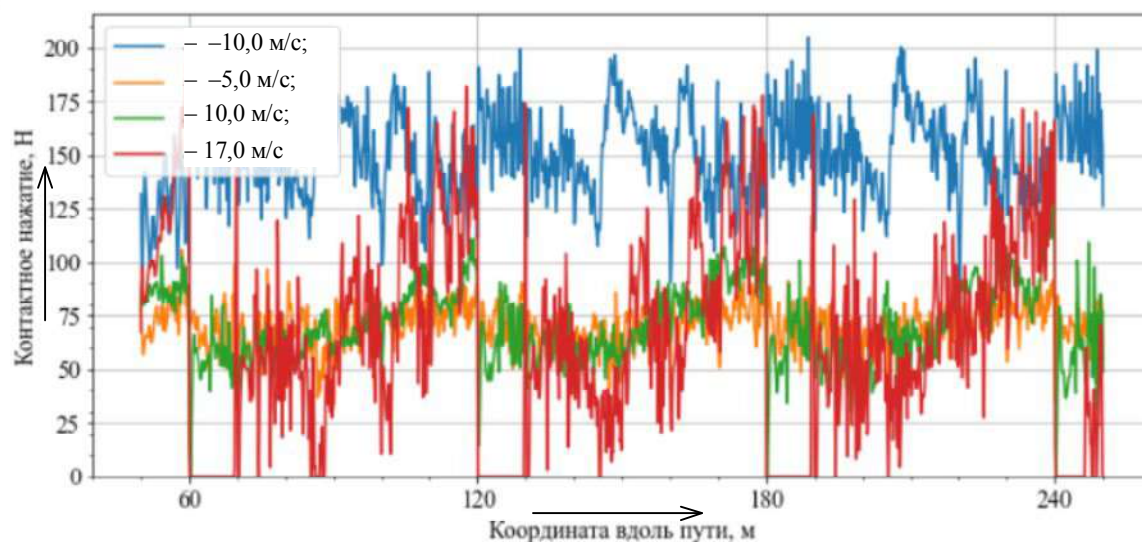


Рисунок 8 – График функции контактного нажатия токоприемника от координаты полоза при разной скорости ветра поперек оси пути (опоры расположены в координатах 60, 120, 180 и 240 м, рычаги – во всех координатах с рисками на оси абсцисс)

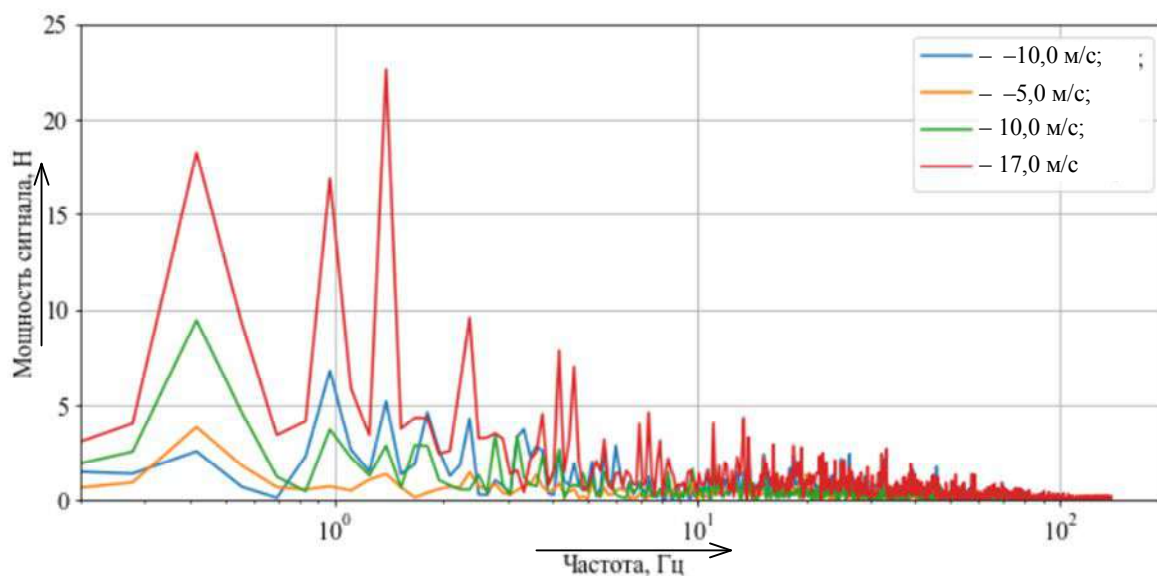


Рисунок 9 – Спектральная плотность функции контактного нажатия токоприемника при разной скорости ветра поперек оси пути (ось абсцисс имеет логарифмическую шкалу)

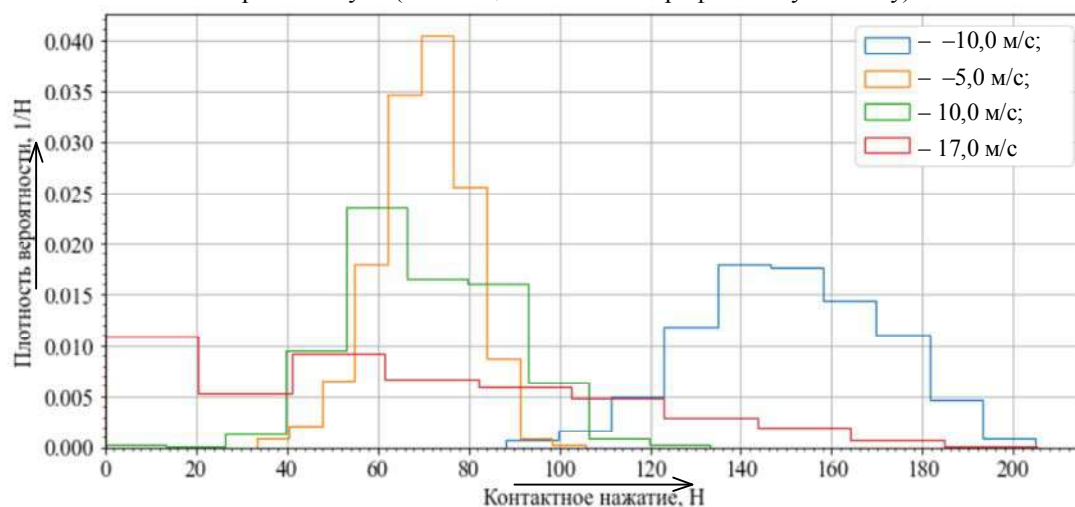


Рисунок 10 – Гистограмма распределения контактного нажатия токоприемника как случайной величины при разной скорости ветра поперек оси пути

Из анализа графиков на рисунке 8 следует, что функции нажатия токоприемников вдоль оси пути при скорости ветра 5 и 15 м/с получаются близкими. При скорости ветра минус 20 м/с (т. е. 20 м/с к оси пути) график расположен выше. При скорости ветра 15 м/с в отдельных точках рычагов у опор появляются кратковременные отрывы. При скорости ветра 20 м/с эти отрывы появляются у каждой опоры и становятся продолжительными до 10 м вдоль пути, нажатие токоприемника становится очень нестабильным.

Аналогичную ситуацию можно заметить и на графике спектральной плотности (рисунок 9). Начиная со скорости ветра 15 м/с амплитуда динамической составляющей контактного нажатия на отдельных частотах начинает резко возрастать, при ветре 20 м/с величина отдельных пиков на низких частотах достигает десятков единиц.

Из анализа гистограммы распределения (рисунок 10) следует, что с ростом скорости ветра в направлении от оси пути график становится более «размытым», т. е. увеличивается среднеквадратичное отклонение случайной величины. При ветре 20 м/с по внешнему виду диаграммы распределение становится больше похожим на экспоненциальное, чем на нормальное распределение. Наибольшая плотность случайной величины при этом попадает в область малых нажатий. Все эти признаки означают, что при скорости ветра 20 м/с, а возможно и при 15 м/с тоже, контактное нажатие токоприемника неудовлетворительное.

Как и при расчете простой подвески [2] с поршневými точками подвеса, за критерии качества токосъема приняты следующие общепринятые [5, 8 – 10] параметры:

- коэффициент ковариации контактного нажатия (отношение среднеквадратичного значения к математическому ожиданию) с допустимым значением не более 0,3;
- удельный процент искрения с допустимым значением 0,2.

Графики зависимостей этих параметров от скорости ветра поперек оси пути при рассматриваемых условиях показаны на рисунках 11 и 12.

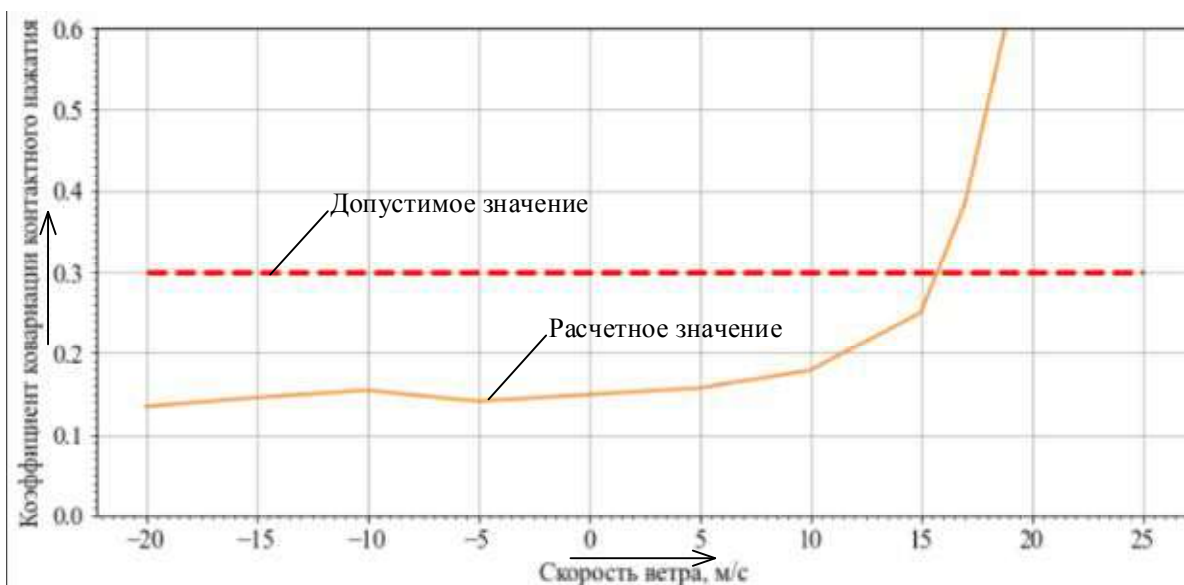


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента ковариации контактного нажатия от скорости ветра поперек оси пути

Из анализа рисунков 11 и 12 видно, что для обеспечения качественного токосъема допустимая скорость ветра в данном случае не должна превышать 13 – 14 м/с. Более ограничивающим фактором является удельный процент искрений, но и коэффициент ковариации контактного нажатия при скорости ветра 17 м/с выше допустимого.

Кроме этого скорость ветра поперек оси пути влияет и на величину среднего контактного нажатия (рисунок 13). Системы подвижных рам и привод токоприемника позволяют стабилизировать среднее значение контактного нажатия на заданном значении при скоростях поперечного ветра от минус 10 до 17 м/с. В этом случае полз токоприемника находится в рабочем диапазоне. Если скорость ветра будет больше или меньше этих значений, то полз упирается

в границу рабочего диапазона ближе или дальше от оси пути. Если эта граница ближе к оси пути, то среднее нажатие может быть больше номинального, если эта граница дальше от оси пути – среднее нажатие может быть меньше номинального.

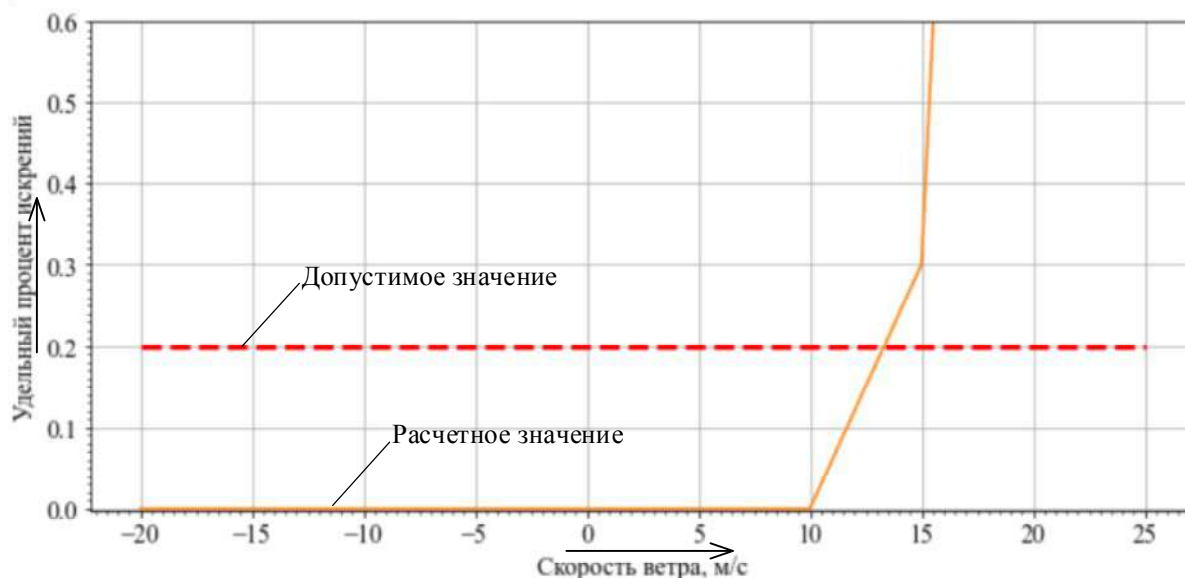


Рисунок 12 – Зависимость удельного процента искрения от скорости ветра поперек оси пути

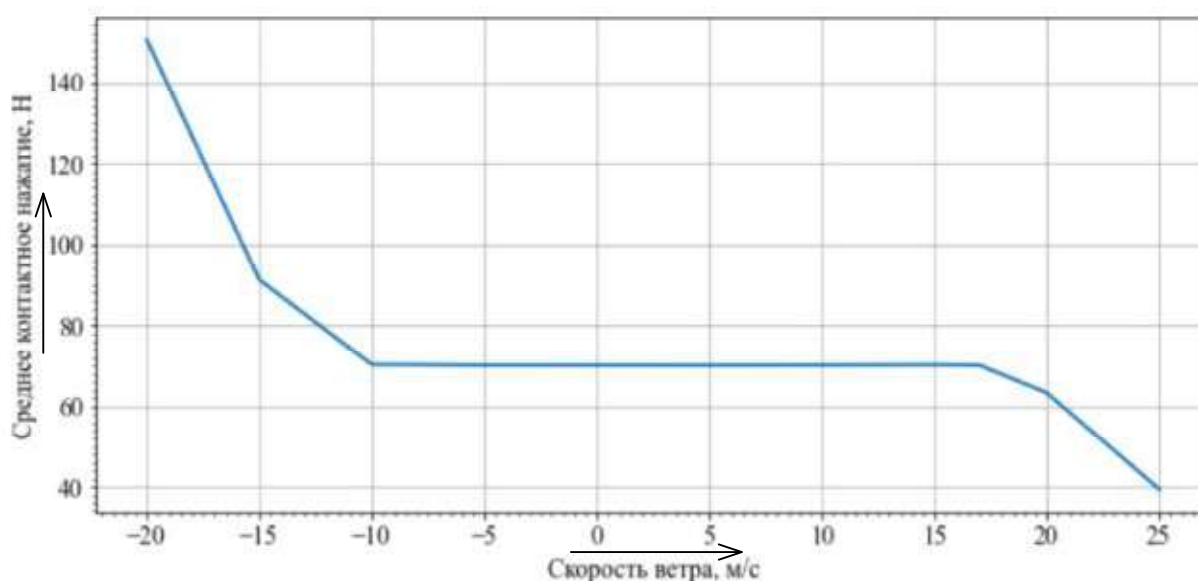


Рисунок 13 – Зависимость среднего контактного нажатия токоприемника от величины скорости ветра поперек оси пути

Таким образом, можно сделать вывод о том, что данная цепная подвеска так же, как и простая с поршневыми точками подвеса, весьма чувствительна к скорости ветра поперек оси пути, что является общей особенностью всех контактных подвесок с боковым токосямом.

С целью оценки влияния различных параметров самой подвески и их оптимальных значений, а также ограничивающих факторов окружающей среды на качество токосяема были произведены серии расчетов. В частности, длина пролета изменялась от 60 до 30 м с шагом 10 м; натяжение КП – из ряда 10, 11,5, 14, 16 кН (соответствует маркам МФ-100, Бр1Ф-100, Бр2Ф-100, Бр3Ф-100); расстояние между рычагами – от 6 до 30 м; угловая жесткость элементов рычагов, прикрепленных к консолям, – от 50 до 800 Н · м/рад; скорость ветра – 15 (основной вариант), 20, 25 м/с; скорость ЭПС – 80, 100 (основной вариант), 120 и

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

140 км/ч. Дополнительно для пролета 40 м с натяжением КП 10 кН определено влияние на качество токосъема гололеда с расчетной толщиной стенки 5, 10, 15 и 20 мм. Всего было произведено более 240 расчетов.

В качестве примера на рисунке 14 приведен результат исследования влияния угловой жесткости элементов рычага $c_{\text{раб}}$, который крепится непосредственно к консоли, на показатели качества токосъема. Из данного рисунка видно, что оптимальное значение данного параметра для большинства длин пролетов составляет около 300 Н · м/рад.

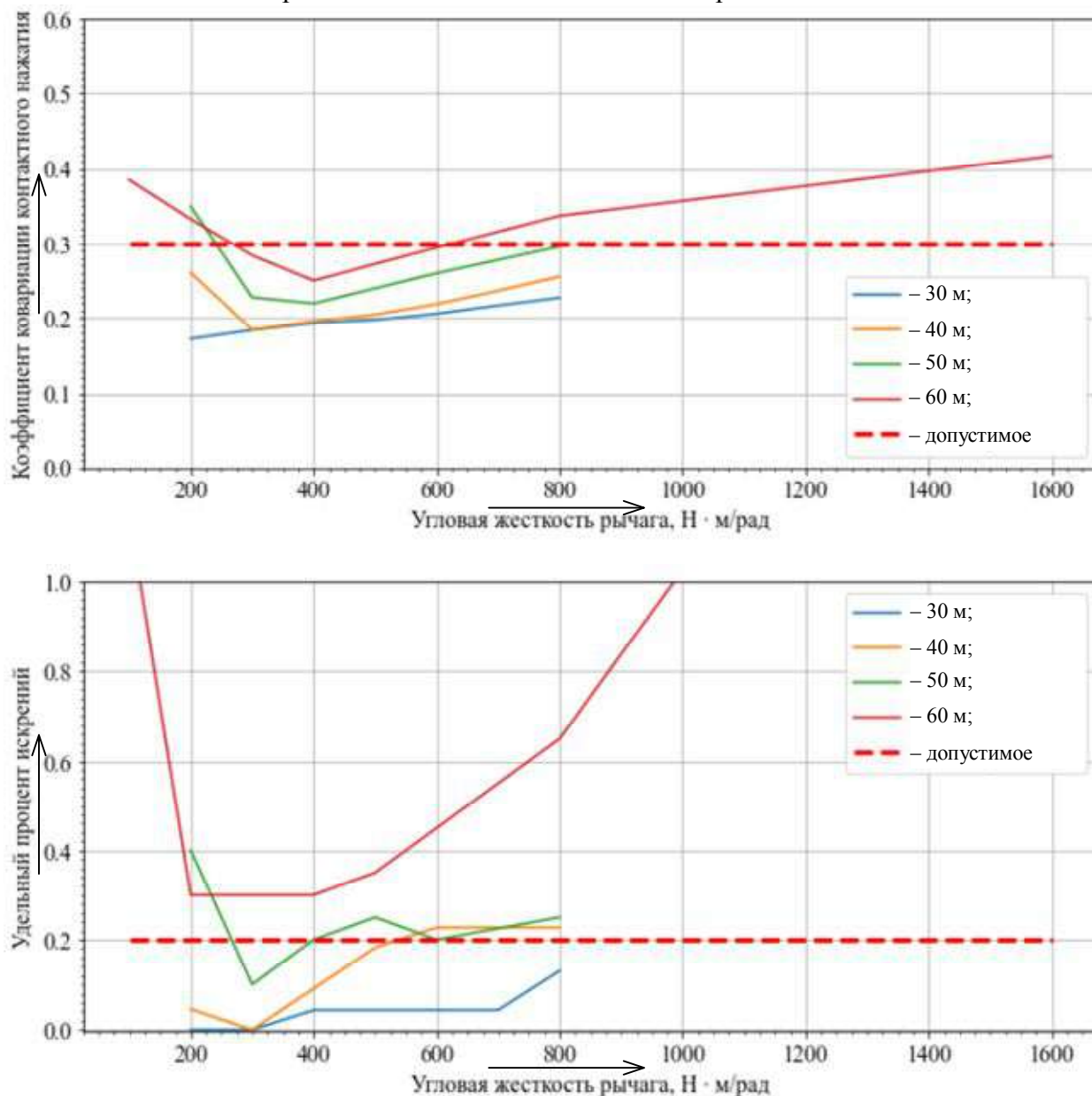


Рисунок 14 – Графики зависимости показателей качества токосъема от величины рабочей угловой жесткости рычага, который непосредственно крепится к консоли, при различной длине пролета

Расстояние между рычагами в большинстве случаев значительного влияния на качество токосъема не оказывает, так как однозначного тренда с точки зрения показателей качества не наблюдается.

Предложенный вариант конструкции цепной компенсированной контактной подвески с рычагами и боковым токосъемом для ТСТЭ был исследован с помощью разработанной математической модели в статике и динамике с учетом взаимодействия с токоприемником. Математическая модель реализована на основе дифференциальных уравнений в частных производных и обыкновенных дифференциальных уравнений, решаемых численными методами. На

основе анализа результатов моделирования доказана принципиальная работоспособность предложенной конструкции, оценено влияние параметров подвески, скорости движения ЭПС и климатических факторов на качество токосъема. Установлено, что рассматриваемая контактная подвеска, как и остальные контактные подвески с боковым токосъемом, крайне чувствительна к боковому ветру. Во многих случаях именно это является ограничивающим фактором для ее применения.

Повышение натяжения КП и снижение длины пролета улучшают качество токосъема, но до определенного предела, зависящего от скорости ветра и скорости движения ЭПС. Так, скорость ветра 25 м/с является ограничивающим фактором даже при пролетах длиной 30 м, максимальном натяжении КП 16 кН и скорости движения ЭПС 80 км/ч. С учетом того, что ТСТЭ предназначена для участков с преимущественно грузовым движением, скорость движения ЭПС 100 км/ч может рассматриваться как основной вариант.

Если принять, что скорость ветра при токосъеме равна 75 % от расчетной скорости ветра, которая менее 20 км/ч встречается крайне редко, то для типовых климатических условий (расчетная скорость ветра 27 м/с), КП должен иметь натяжение не менее 14 кН (марки Бр2Ф-100 и Бр3Ф-100) и длины пролетов возможны не более 40 м. Для районов с расчетной скоростью ветра более 30 м/с данная подвеска не применима. В качестве организационных мероприятий, если это позволяет график движения поездов, можно рекомендовать на время усиления ветра ограничение максимальной скорости движения на данных участках до 80 км/ч.

Список литературы

1. Аржанников, Б. А. Трехфазная система электрической тяги переменного тока : монография / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – 142 с. – Текст : непосредственный.
2. Аржанников, Б. А. Выбор и обоснование основных конструктивных параметров контактной подвески для трехфазной системы тягового электроснабжения на прямом участке пути / Б. А. Аржанников, А.В. Паранин. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2021. – № 1 (68). – С. 61–69.
3. СП 224.1326000.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги: утвержден приказом Минтранса России от 2 декабря 2014. № 330. – Москва : Министерство транспорта, 2014. – 83 с. – Текст : непосредственный.
4. Нормы проектирования контактной сети СТН ЦЭ 141-99. – Москва : Трансиздат, 2001. – 176 с. – Текст : непосредственный.
5. Кислинг, Ф. Контактные сети электрифицированных железных дорог. Проектирование. Расчет. Сооружение. Монтаж. Эксплуатация / Ф. Кислинг, Р. Пушман, А. Шмидер. – Москва : Сименс Россия, 2018. – 1176 с. – Текст : непосредственный.
6. Sánchez-Rebolloa C., Carnicerob A., Jiménez-Octaviob J.R. CANDY statement of methods. *Vehicle System Dynamics*, 2015, vol. 53, no. 3, pp. 392-401, <http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2014.982135>.
7. Математическое моделирование механического взаимодействия токоприемников и контактной подвески для скоростных электрифицированных железных дорог / Б. С. Григорьев, О. А. Головин, Е. Д. Викторов, Е. В. Кудряшов. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2012. – № 4. – С. 155–162.
8. ГОСТ 32793–2014. Токосъем токоприемником железнодорожного электроподвижного состава. Номенклатура показателей качества и методы их определения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 21 с. – Текст : непосредственный.
9. EN 50367:2006. Railway applications. Current collection systems. Technical criteria for the interaction between pantograph and over-head line (to achieve free access). London, BSI Standards Publication, 2006, 78 p.

10. Смердин, А. Н. Совершенствование системы токосъема магистральных электрических железных дорог в условиях высокоскоростного и тяжеловесного движения : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Смердин Александр Николаевич; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – 600 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Arzhannikov B.A. *Trekhfaznaya sistema elektricheskoy tyagi peremennogo toka* [Three-phase system of electric traction of alternating current]. Monograph. Yekaterinburg. UrGUPS, 2020, 142 p.
2. Arzhannikov B.A., Paragin A.V. Selection and justification of the main design parameters of the contact suspension for a three-phase traction power supply system on a straight section of the track. *Transport of the Urals*, 2021. no. 1 (68), pp. 61-69 (In Russian)
3. National set of rules SP 224.1326000.2014. Traction power supply of the railway. Moscow, Ministry of Transport, 2014. 83 p. (In Russian)
4. National normative document STN CE 141-99. Contact network design standards. Moscow. Transizdat, 2001, 176 p. (In Russian)
5. Kisling F., Pushman R., Schmider A. *Kontaktnye seti elektrificirovannykh zheleznnykh dorog. Proektirovanie. Raschet. Sooruzhenie. Montazh. Ekspluataciya*. [Contact networks of electrified railways. Design. Payment. Construction. Mounting. Exploitation]. Moscow, Siemens Russia, 2018, 1176 p. (In Russian)
6. Sánchez-Rebolloa C., Carnicerob A., Jiménez-Octaviob J.R. CANDY statement of methods. *Vehicle System Dynamics*, 2015, vol. 53, no. 3, pp. 392-401, <http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2014.982135>.
7. Grigoriev B. S., Golovin O. A., Viktorov E. D., Kudryashov E. V. Mathematical modeling of the mechanical interaction of current collectors and contact suspension for high-speed electrified railways. *Science and education*. 2012. no. 4 (159), pp. 155-162. (In Russian)
8. National Standard 32793-2014. Current collection by a current collector of a railway electric rolling stock. Nomenclature of quality indicators and methods for their determination, National Standard 32793-2014). Moscow, Standardinform Publ., 2014. 21 p. (In Russian)
9. EN 50367:2006. Railway applications. Current collection systems. Technical criteria for the interaction between pantograph and over-head line (to achieve free access). London, BSI Standards Publication, 2006, 78 p.
10. Smerdin A.N. *Sovershenstvovanie sistemy tokos'ema magistral'nykh elektricheskikh zheleznnykh dorog v usloviyakh vysokoskorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya* (Improvement of the tokos system of the main electric railways in the conditions of high-speed and heavy traffic). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2018, 600 p. (In Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аржанников Борис Алексеевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

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

Тел.: +7 (343) 221-24-78.

E-mail: BArzhannikov@usurt.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Arzhannikov Boris Alekseevich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Transport Power Supply», USURT.

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

E-mail: BArzhannikov@usurt.ru

Паранин Александр Викторович

Уральский государственный университет путей
сообщения (УрГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7 (343) 221-24-78.

E-mail: alks84@mail.ru

Paranin Alexander Viktorovich

Ural State University of Railway Transport
(USURT).

66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034,
the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the
department «Transport Power Supply», USURT.

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

E-mail: alks84@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Аржанников, Б. А. Расчет параметров и оценка
возможности использования цепной компенсирован-
ной контактной подвески с рычагами для трехфазной
системы тягового электроснабжения / Б. А. Аржанни-
ков, А. В. Паранин. – Текст : непосредственный // *Известия Транссиба*. – 2022. – № 2 (50). – С. 30 – 44.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Arzhannikov B.A., Paranin A.V. Calculation of pa-
rameters and evaluation of the possibility of using chain
compensated contact suspension with lever for a three-
phase traction power supply system. *Journal of Transsib
Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 30-44 (In Russian).

УДК 621.336.2

В. М. Павлов, А. И. Слатин, Д. А. Петин

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОГО УСТРОЙСТВА СБОРА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. В ходе эксплуатации токоприемников электроподвижного состава происходят процессы, приводящие к снижению механических показателей токоведущих конструкций. Контроль параметров работы токоприемников и нагрузок, действующих на них, в настоящее время затруднен из-за того, что разность потенциалов его элементов и кузова электроподвижного состава соответствует рабочему напряжению в контактной сети. Применение различных способов разделения среды передачи данных и гальванической развязки питания датчиков сопряжено с некоторыми недостатками, главным из которых являются значительные габариты и масса устройств такого типа. В исследовательских целях разработаны и применяются автономные источники питания и накопители информации, не претендующие на внедрение в конструкцию серийных токоприемников. В статье описано устройство, предназначенное для решения множества задач диагностики, использующее принцип утилизации свободной энергии для питания датчиков, преобразователей и системы передачи данных на внешние носители. Проведены исследования энергетических показателей модулей отбора мощности механических колебаний деталей токоприемника. Определены основные параметры пьезоэлектрического модуля для энергообеспечения малогабаритного устройства сбора диагностической информации. Предлагаемый подход должен обеспечить автономность работы устройства при движении электроподвижного состава с поднятым токоприемником. При этом отсутствует зависимость количества вырабатываемой энергии от освещенности или скорости движения, свойственных другим альтернативным источникам питания. Представлены компоновочные решения для опытного образца устройства, на основе которых возможно создание конструкторской документации для организации производства установочной партии. Описаны роль устройства в системе функционирования управляемых токоприемников и изменение технологии их эксплуатации.

Ключевые слова: токоприемник, ток, ускорение, аккумулятор, пьезоэлемент, система диагностики.

Viacheslav M. Pavlov, Anatoly I. Slatin, Daniil A. Petin

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

IMPROVEMENT OF A SMALL DIAGNOSTIC INFORMATION COLLECTION DEVICE FOR MONITORING THE PERFORMANCE OF ELECTRIC ROLLING STOCK CURRENT RECEIVERS

Abstract. During the operation of electric rolling stock current collectors, processes occur that lead to a decrease in the mechanical performance of current-carrying structures. Monitoring of the parameters of the operation of current collectors and the loads acting on them at present is difficult due to the fact that the electric potential between its elements and the body of the electric rolling stock corresponds to the operating voltage in the overhead contact line. The use of various methods of separating the data transmission medium and galvanic isolation of the sensor power supply is associated with some disadvantages, the main of which is the significant dimensions and mass of devices of this type. For research purposes, autonomous power supplies and information storage devices have been developed and used, which do not pretend to be used in the design of serial current collectors. The article describes a device designed to solve a variety of diagnostic tasks, using the principle of free energy utilization to power sensors, converters and a data transmission system to external media. Studies of the energy parameters of the electromagnetic field power selection modules and mechanical vibrations accompanying the operation of the current collector have been carried out. The main parameters of the piezoelectric module for power supply of a small-sized device for collecting diagnostic information are determined. The proposed approach should ensure the autonomy of the device when moving an electric rolling stock with a raised pantograph. At the same time, there is no dependence on the illumination or speed of movement characteristic of other alternative power sources. The layout solutions for the prototype of the device are presented, on the basis of which it is possible to build design documentation for the organization of the production of the installation batch. The role of the device in the system of functioning of controlled current collectors is described, as well as the change in the technology of their operation.

Keywords: current collector, current, acceleration, battery, piezoelectric element, diagnostic system.

Задача цифровизации железнодорожной отрасли, заявленная как одна из самых необходимых в опубликованной «Стратегии развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 г.», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р [1], затрагивает важнейшие компоненты системы токосяема, а контроль их работоспособности является необходимым условием эффективной эксплуатации. При этом до настоящего времени токоприемники электроподвижного состава (ЭПС) не располагают диагностической подсистемой, позволяющей надежно, достоверно и экономически эффективно контролировать работоспособность, оценивать остаточный ресурс.

Создание новой техники транспортных систем входит в Перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации (утвержден Указом Президента Российской Федерации от 07 июля 2011 г. [2]) с целью повышения готовности транспортной отрасли к новым технологическим вызовам, снижения затрат на обеспечение перевозочного процесса, что является актуальными вопросами для решения задачи повышения показателей эффективности.

В условиях перехода на новый технологический уклад и цифровизации всех отраслей экономики появляется возможность повышения эффективности эксплуатации токоприемников электроподвижного состава за счет дополнения их конструкции системой управления нажатием [3]. Важнейшим элементом такой системы является устройство контроля основных эксплуатационных показателей (протекающий ток, температура, ускорение отдельных узлов) в ходе токосяема. На основании получаемых данных система управления может автоматически вносить корректировки, повышая или понижая нажатие в скользящем контакте, а также сигнализировать о необходимости регламентных работ или о выходе из строя элементов системы токосяема.

Разработанный и изготовленный макет специализированного автономного устройства для контроля показателей токоприемника (рисунок 1) прошел апробацию на действующей железнодорожной линии в ходе комплексных испытаний электропоезда ЭС2Г «Ласточка». На макете были проверены основные принципы его работы, зарегистрированы значения тока, протекающего по токоприемнику, температурные параметры, ускорения ключевых элементов конструкции (полоса, верхнего шарнира, основания).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В ходе опытных поездок в качестве источника питания использовались аккумуляторная батарея и преобразователь напряжения. Для записи, обработки и передачи информации использовался одноплатный компьютер [4].

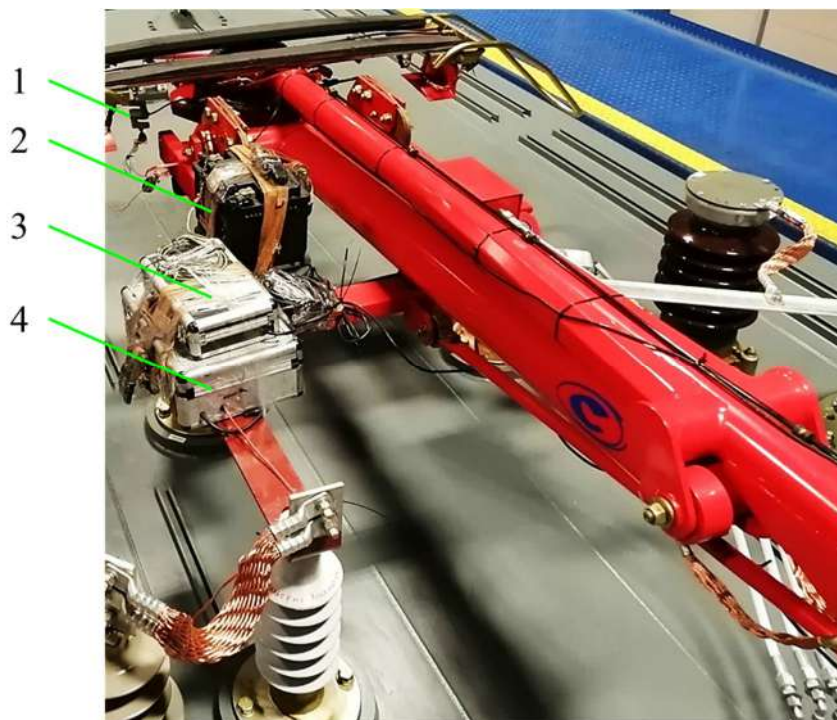


Рисунок 1 – Комплекс для контроля и регистрации основных эксплуатационных показателей токоприемника на крыше электропоезда ЭС2Г «Ласточка»: 1 – датчик силы нажатия; 2 – элемент питания; 3 – преобразователь напряжения; 4 – измерительный модуль

С учетом предназначения устройства на следующем этапе его разработки была поставлена задача реализации ряда схемных и конструктивных решений, расширяющих функциональные возможности диагностического модуля и позволяющих осуществлять его автономную эксплуатацию на крыше коммерческого ЭПС без присоединения к источникам бортового питания и информационным каналам. Были заново спроектированы электрическая схема питания измерительного блока, функциональный макет печатной платы, модель корпуса устройства. Схема взаимодействия указанных модулей и блоков представляет собой радиальную структуру (рисунок 2).



Рисунок 2 – Взаимодействие функциональных модулей электрической схемы измерительного блока

Электрическая схема включает в себя микроконтроллер MSP430FR5994 и компоненты, обеспечивающие его нормальную работоспособность. Микроконтроллер имеет 16-разрядную архитектуру RISC с тактовой частотой до 16 МГц, 256 КБ сегнетоэлектрической оперативной памяти, быструю запись скоростью 16 МБ/с со сверхнизким энергопотреблением. Диапазон питающего напряжения составляет от 1,8 до 3,6 В. К компонентам схемы относятся модуль сигнализации о работоспособности и режиме работы микроконтроллера, разъем программатора, генератор синусоидальных колебаний, модуль записи информации на карту памяти, модуль для подключения оптического медиаконвертера, два модуля для подключения измерительных датчиков к микроконтроллеру через аналоговый вход, модуль для подключения измерительных датчиков через цифровой вход.

Аппаратное обеспечение разработано для возможности реализации программного комплекса регистрации продольной и поперечной жесткости токоприемника, температуры каркаса полозов, силы протекающего тока, колебаний основания и верхнего узла [5].

При увеличении скоростей движения важнейшую роль играет снижение массовых и габаритных показателей всех систем и устройств, располагаемых на крыше ЭПС, и особенно на подверженных набегавшему потоку воздуха элементах токоприемника. Снижение миделева сечения приводит к повышению аэродинамической нейтральности токоприемника. С учетом уплотнения компоновки крышевого оборудования и важности обеспечения электробезопасности требуется максимально уменьшить габаритные размеры и вес всех устройств, располагаемых на основании токоприемника.

Разработка функционального макета печатной платы происходила из принципа максимального уменьшения ее габаритных размеров, простоты изготовления и доступности компонентов при минимизации затрат. В соответствии с принципами разработки функционального макета были выбраны электрические компоненты формата SMD (Surface Mounted Device) для поверхностного монтажа (рисунок 3, а). В сравнении с компонентами первоначального макета и переработанной версии установлено снижение габаритных показателей более чем в четыре раза за счет уплотнения и миниатюризации компонентов. Не менее важной задачей является снижение энергопотребления устройства, так как это дает возможность снизить емкость накопителей электрической энергии и мощность источников питания. За счет снижения энергопотребления блоков удалось не только повысить автономность, но и отказаться от принудительного охлаждения. Корпус устройства выполнен пыле- и влагозащищенным, имеет достаточно прочную конструкцию, так как эксплуатация устройства предусматривает его применение на открытом воздухе, а также имеет надежные и простые крепления к металлическим частям (рисунок 3, б). Для присоединения измерительного оборудования был выбран пятиконтактный разъем DS1110-01-5. С целью исключения возможности ошибочного подключения питания к разъему измерительных каналов, что может нарушить нормальное функционирование устройства, для питания был предусмотрен шестиконтактный разъем DS1110-01-6.

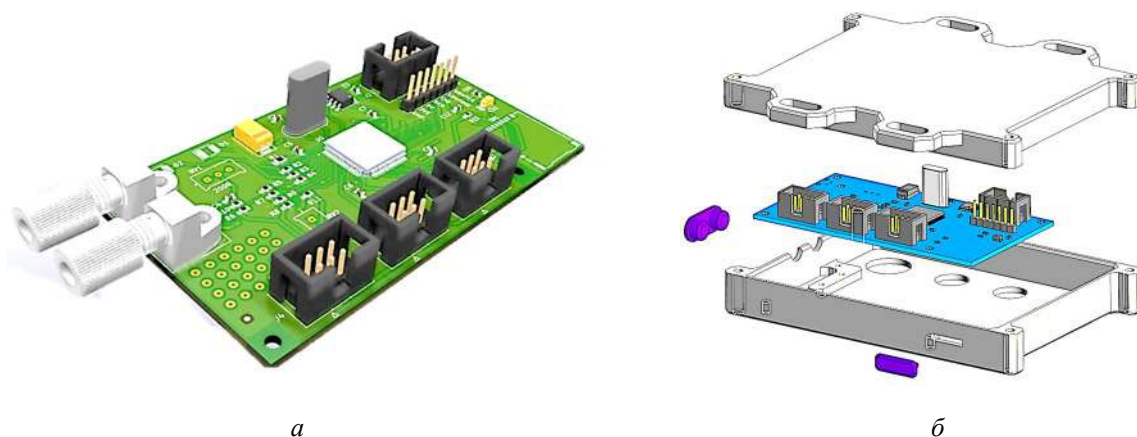


Рисунок 3 – 3D-визуализация размещения основных компонентов печатной платы (а) и чертеж сборки корпуса устройства (б)

Энергию для питания устройства сбора диагностической информации предполагается получать из механических колебаний, возникающих в процессе движения подвижного состава и токосъема. Из-за наличия множества колебательных контуров, образованных подрессоренными массами на электроподвижном составе и обладающих степенями свободы, элементы токоприемника вибрируют. Частоты таких колебаний находятся в диапазоне от 0,1 до 200 Гц [6]. При этом спектрограмма верхнего рычага токоприемника, полученная в рамках экспериментальной поездки, показывает, что резонансные явления наблюдаются на частотах в области 40 Гц (рисунок 4).

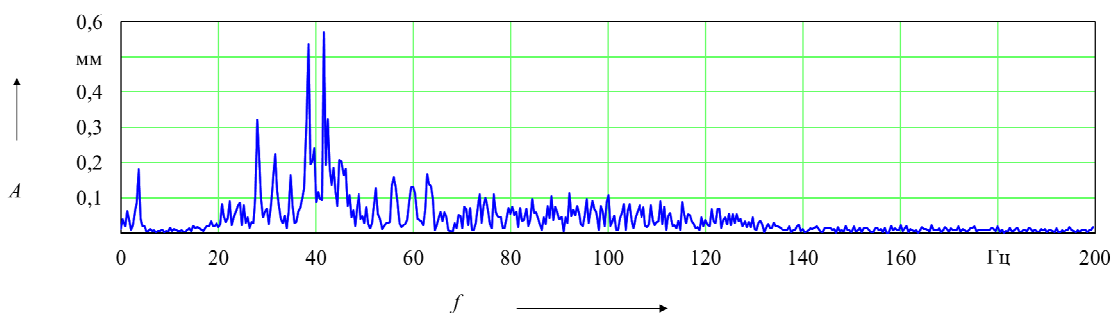


Рисунок 4 – Спектральный портрет вибрации верхнего рычага токоприемника

В основе способа извлечения электрической энергии из механических колебаний токоприемника во время движения ЭПС лежит явление прямого пьезоэффекта – возникновения поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. Пьезоэлектрические материалы представляют собой анизотропные кристаллы. Пространственные оси кристалла 1, 2 и 3 соответствуют направлению осей X , Y , Z ортогональной системы координат, а оси 4, 5 и 6 определяют направление вращения (рисунок 5). Направление оси 3 (Z) обычно принимается за направление поляризации [7].

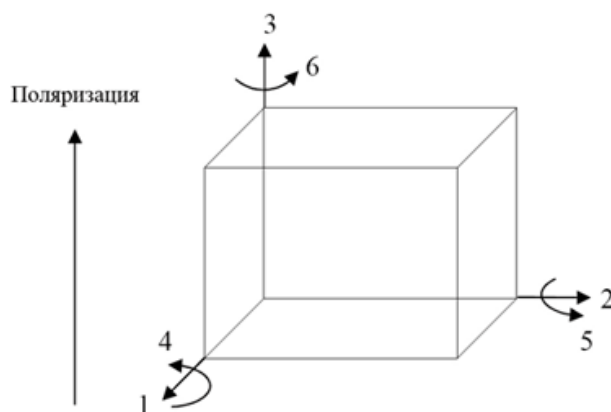


Рисунок 5 – Направление и ориентация осей пьезоэлектрического материала

В разрабатываемом устройстве предусмотрено применение пьезоэлемента S129-H5FR-1803YB (рисунок 6). Данный преобразователь относится к гибким или биморфным и представляет собой прямоугольную пластину. При изгибе пластины в результате колебаний одна сторона пьезоэлектрической прослойки растягивается, а другая сжимается, в результате чего на выводах образуется разность потенциалов. Сила, необходимая для того, чтобы деформация края пластины составляла от 0,1 до 1 мм, оценивается от 0,1 до 1 Н. Материал пьезоэлемента PZT-5A подходит для применения при экстремальных температурах и (или) при большой амплитуде колебаний температур, что обуславливает его применение на крыше ЭПС. Данный элемент выдерживает механические колебания на частотах до 175 Гц. С учетом спектрального портрета колебаний верхнего рычага токоприемника (см. рисунок 4), необходимо адаптировать пьезоэлемент таким образом,

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

чтобы его резонансная частота соответствовала гармонике с частотой 40 Гц, имеющей наибольшую амплитуду во время движения ЭПС.

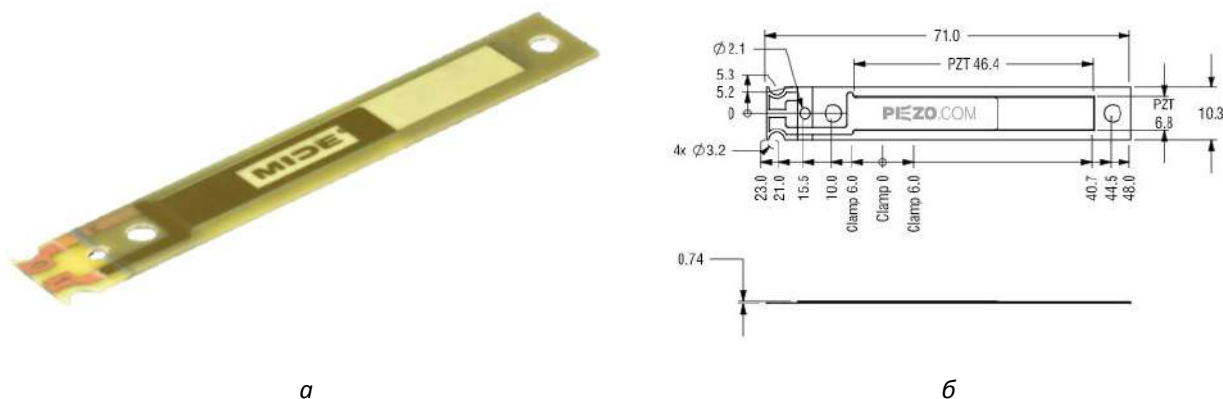


Рисунок 6 – Пьезоэлемент S129-H5FR-1803YB: а – общий вид пластины; б – геометрические параметры

Оценить количество преобразованной электрической энергии можно при помощи коэффициентов электромеханической связи k_p , k_{33} , k_{31} , k_t и k_{15} , которые являются характеристиками материала пьезоэлемента и описывают способность преобразования механической энергии в электрическую и наоборот. Квадрат коэффициента электромеханической связи определяется как отношение накопленной преобразованной энергии одного вида ко входной энергии другого вида:

$$k_{ij}^2 = \frac{E_{ij}}{W_{ij}} = \frac{W_{ij}}{E_{ij}}, \quad (1)$$

где E_{ij} – механическая энергия колебаний пластины, Дж; W_{ij} – электрическая энергия, Вт; индексы ij демонстрируют относительные направления действия электрических и механических сил соответственно.

Тогда полная электрическая энергия представляет собой сумму произведений квадратов коэффициентов электромеханической связи на количество накопленной механической энергии по соответствующим направлениям осей и определяется по формуле, Вт:

$$W = \sum_{i,j} k_{ij}^2 E_{ij}. \quad (2)$$

Другими словами, получаемая электрическая энергия представляет собой сумму механической энергии продольных и поперечных колебаний пьезоэлектрика по всем направлениям, помноженную на коэффициент преобразования. Для количественной оценки механической энергии колебаний за основу была взята математическая модель пластины со сторонами a и b толщиной h , жестко заземленной с одной стороны и свободным краем с другой (рисунок 7). Допущением принято, что материал пластины является изотропным.

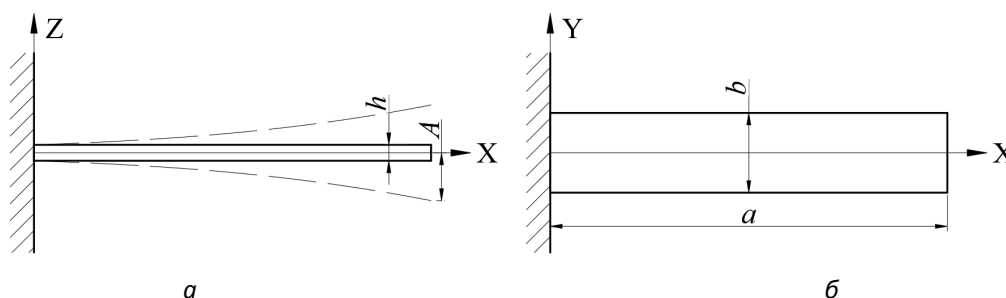


Рисунок 7 – Граничные условия математической модели колебаний заземленной пластины со свободным краем: а – вид плоскости XOZ; б – вид плоскости YOZ

Поскольку механическая энергия в системе возникает главным образом за счет поперечных колебаний вдоль оси X в плоскости XOZ , а при таких условиях механические напряжения пластины и вектор силы электрического поля будут сонаправлены в плоскости вдоль оси поляризации, то в расчетах целесообразно использовать коэффициент электромеханической связи k_{33} , а прочими коэффициентами можно пренебречь. Тогда выражение (2) приобретает вид:

$$W = k_{33}^2 E_{33}, \quad (3)$$

где E_{33} – энергия поперечных изгибных колебаний пластины, Дж.

Механическую энергию колебательной системы можно определить по известной формуле:

$$E = \frac{mA^2\omega^2}{2}, \quad (4)$$

где m – масса груза на конце пластины, кг; A – амплитуда колебаний, м; $\omega = 2\pi f_c$ – угловая частота, рад/с; f_c – частота собственных колебаний, Гц.

Таким образом, задача сводится к определению частоты собственных затухающих колебаний пластины с заданными параметрами. Математическое описание и аналитическое решение задачи колебаний пластин в общем случае описаны в работах [8 – 10].

Движение пластины со свободным краем описывается дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI_x \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right) + m_x \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = p(x,t), \quad (5)$$

где x – расстояние от места заземления, м; E – модуль упругости, Па; I_x – момент инерции сечения пластины, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; y – линейное перемещение точки пластины, м; $m_x = \rho_x F_x$ – интенсивность массы, кг/м; F_x – площадь сечения пластины, м^2 ; $p(x,t)$ – силовая функция. Силовую функцию нельзя выразить аналитически, поэтому уравнение (5) решается только численно.

На частотах, близких к собственной частоте, форма колебаний пластины близка к форме собственных колебаний консольной балки с распределенной массой. Форму колебаний пластины можно определить суммированием форм колебаний на разных собственных частотах. Если можно пренебречь изменением площади поперечного сечения пластины по длине, то уравнение (5) упрощается и его решение определяет форму колебаний пластины:

$$\varphi(x) = B_1 \cos \frac{\mu x}{l} + B_2 \sin \frac{\mu x}{l} + B_3 \cosh \frac{\mu x}{l} + B_4 \sinh \frac{\mu x}{l}, \quad (6)$$

где

$$\mu = l \sqrt[4]{\frac{m_l \omega^2}{EI}}; \quad (7)$$

ω – угловая частота, рад/с; m_l – интенсивность массы, кг/м; l – длина пластины, м.

Численное моделирование было выполнено в программном продукте COMSOL Multiphysics. В соответствии с рисунком 6 в среду моделирования была перенесена геометрия пластины и заданы граничные условия задачи, как показано на рисунке 7. Свойства материала пьезоэлектрика PZT-5A были получены из стандартной библиотеки материалов COMSOL. По результатам численного моделирования частота первой гармоники собственных поперечных колебаний пластины без нагружения составила 98,959 Гц (рисунок 8, а). Для подбора необходимой резонансной частоты было выполнено моделирование с имитацией грузов различной массы на свободном краю

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

пластины. По результатам моделирования была получена зависимость, представленная на рисунке 8, б. Таким образом, чтобы добиться максимального пьезоэлектрического эффекта, необходимо на свободном краю пластины закрепить груз массой $4 \pm 0,1$ г.

При амплитуде колебаний порядка $A = 1$ см преобразованная электрическая энергия при частоте колебаний 40 Гц, при коэффициенте преобразования для выбранного материала $k_{33} = 0,72$ в соответствии с выражениями (3) и (4) составит:

$$W = k_{33}^2 \frac{mA^2(2\pi f)^2}{2}; \quad (8)$$

$$W = 0,72^2 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 40)^2}{2} = 6,55 \text{ мВт} \cdot \text{с}.$$

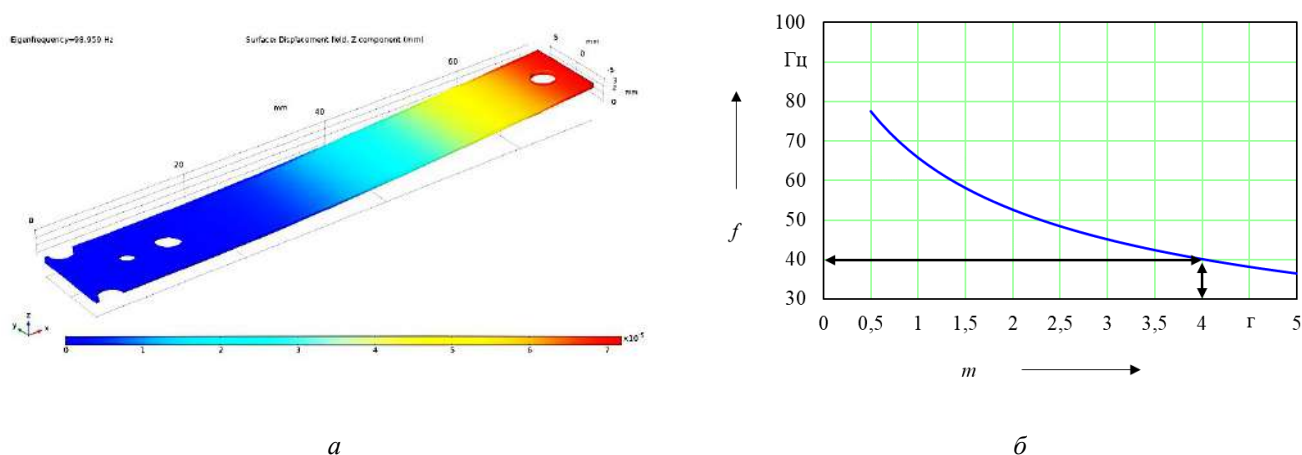


Рисунок 8 – Изгибная деформация пластины на собственной частоте без нагружения (а) и зависимость частоты собственных колебаний от массы груза на конце пластины (б)

Для непрерывной работы устройства необходим аккумулятор, обеспечивающий работоспособность во время стоянки подвижного состава. С учетом того, что перерывы в движении могут быть дольше расчетного промежутка времени, по его истечении система переходит в режим гибернации, из которого сможет выйти только при появлении механических колебаний.

В рабочем режиме алгоритм работы представляет чередование непродолжительных интервалов активного энергопотребления во время передачи данных и длительных временных отрезков сбора данных (рисунок 9). Окончательное значение требований к емкости аккумулятора и количество генераторов свободной энергии для обеспечения энергобаланса разрабатываемого устройства определяются в ходе натурных испытаний.

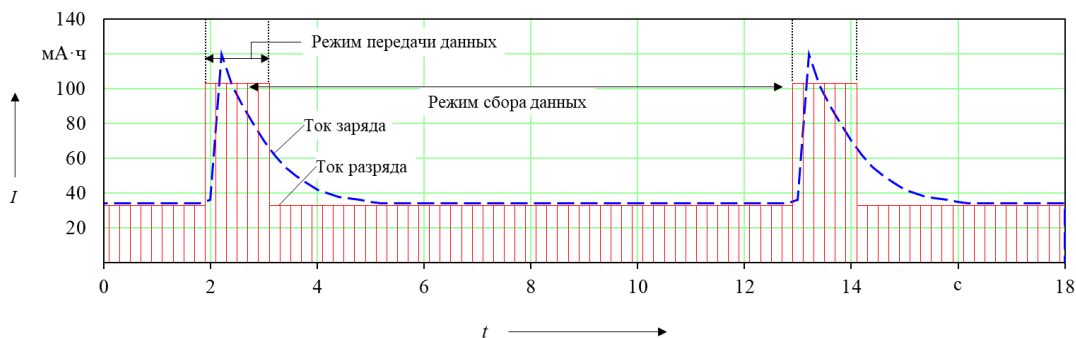


Рисунок 9 – Режимы работы устройства сбора диагностической информации

В настоящее время в лаборатории контактных сетей, линий электропередачи и токосъема ведутся работы по гармонизации энергетических показателей применяемых генераторов свободной энергии, комплекса датчиков и системы обработки данных. С учетом перерывов в движении, вариабельности и интенсивности вибрации необходим запас энергии в аккумуляторах предлагаемого блока. При этом энергонезависимость разрабатываемого модуля должна быть такой, чтобы даже при длительном бездействии (до нескольких суток) обеспечивался его автоматический запуск при начале движения электроподвижного состава.

Оснащение токоприемников ЭПС малогабаритными автономными диагностическими модулями соответствует утвержденной долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» [11] и способствует переходу на «цифровую железную дорогу». Предлагаемое устройство позволяет в рамках программы «Индустрия 4.0» не только качественно изменить подход к диагностике токоприемников, но и послужить прототипом для системы активного управления нажатием в скользящем контакте, что является важным техническим эффектом при повышении скоростей движения и токовых нагрузок.

В качестве дальнейшего направления разработки данной темы предполагается расширение перечня источников свободной энергии для питания датчиков и их комплексов. Объединение множества устройств описанного типа в единую диагностическую систему позволит с помощью методологии Data Science повысить достоверность прогнозирования технического состояния токоприемников в краткосрочной и долгосрочной перспективе [12, 13].

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года». Утверждено распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. // <http://government.ru/> : сайт. – Текст : электронный. URL: <http://government.ru/docs/all/64817/> (дата обращения: 18.02.2022).
2. Указ Президента РФ от 07.07.2011 № 899 (ред. от 16.12.2015) «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». // <http://www.kremlin.ru/> : сайт. – Текст : электронный. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/33514> (дата обращения: 18.02.2022).
3. Ермачков, Г. Р. Повышение эффективности эксплуатации электроподвижного состава за счет управления нажатием в контакте системы токосъема : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ермачков Глеб Романович; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2020. – 175 с. – Текст : непосредственный.
4. Сидоров, О. А. Совершенствование методов испытаний контактных подвесок и токоприемников / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 11. – С. 72–73.
5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2017661151 (РФ). Программный комплекс для регистрации продольной и поперечной жесткости токоприемника / Смердин А. Н., Голубков А. С., Рыжков А. В. (РФ) : № 2017616306 : заявлено 30.06.2017 : опубликовано 04.10.2017. – Текст : непосредственный.
6. Smerdin, A. Improvement of the method of calculation of the parameters of the universal current collector with the increased motion speeds / A. Smerdin, A. Ryzhkov, Y. Demin. *MATEC Web of Conferences*, Novosibirsk: EDP Sciences, 2018. P. 01040, DOI 10.1051/mateconf/201823901040.
7. Ranier Clement Tjiptoprodjo. On a Finite Element Approach to Modeling of Piezoelectric Element Driven Compliant Mechanisms. – Saskatchewan, Canada: University of Saskatchewan Saskatoon, April 2005.
8. Андрианов, И. В. Асимптотические методы в теории колебаний балок и пластин / И. В. Андрианов, В. В. Данишевский, А. О. Иванков. – Днепропетровск : Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2010. – 216 с. – Текст : непосредственный.

9. Рыбак, С. А. О колебаниях тонких пластин / С. А. Рыбак, Б. Д. Тартаковский. – Текст : непосредственный // Акустический журнал. – 1963. – IX. – Вып. 1. – С. 66–71.

10. Панков, С. О. Колебания прямоугольной ортотропной пластины со свободными краями: анализ и решение бесконечной системы / С. О. Панков. – Текст : непосредственный // Акустический журнал. – 2015. – Том 61. – № 2. – С. 152–160.

11. Распоряжение Правительства РФ от 19.03.2019 № 466-р «Об утверждении программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года» // <http://government.ru/> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://government.ru/docs/36094/> (дата обращения: 18.02.2022).

12. Применение байесовских сетей для совершенствования систем диагностики устройств электроснабжения железных дорог / А. С. Голубков, А. Н. Смердин, Г. Р. Ермачков, А. В. Рыжков. – Текст : непосредственный // Фундаментальные основы, теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики : материалы 18-й международной молодежной научно-практической конференции. – Новочеркасск : ООО «Лик», 2017. – С. 173–182.

13. Ермачков, Г. Р. Применение нейронных сетей для моделирования взаимодействия контактной подвески и токоприемника / Г. Р. Ермачков, А. Н. Смердин, А. С. Голубков. – Текст : непосредственный // инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : материалы XLII международной научно-практической конференции в рамках реализации Послания Президента РК Н. Назарбаева «Новые возможности развития в условиях четвертой промышленной революции», Алматы, 18 апреля 2018 г. / под ред. Б. М. Ибраева. – Алматы : Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2018. – С. 66–72.

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»).

2. *Ukaz Prezidenta RF ot 07.07.2011 № 899 (red. ot 16.12.2015) «Ob utverzhdenii prioritetnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologii i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologii Rossiyskoy Federatsii»* (Decree of the President of the Russian Federation of 07.07.2011 No. 899 (as amended on 16.12.2015) «On the approval of priority directions for the development of science, technology and technology in the Russian Federation and the list of critical technologies of the Russian Federation»).

3. Ermachkov G.R. *Povyshenie jeffektivnosti jekspluatatsii jelektropodvizhnogo sostava za schet upravleniya nazhatiem v kontakte sistemy tokos'ema* (Improving the efficiency of operation of electric rolling stock by controlling the push in contact of the current collection system). *Doctor's thesis*, Omsk, OSTU, 2020, 175 p. (In Russian).

4. Sidorov O.A., Smerdin A.N. Improvement of test methods for contact suspensions and current collectors. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 11, pp. 72-73 (In Russian).

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

6. Smerdin A., Ryzhkov A., Demin Y. Improvement of the method of calculation of the parameters of the universal current collector with the increased motion speeds. *MATEC Web of Conferences*. Novosibirsk: EDP Sciences, 2018. – P. 01040. – DOI 10.1051/mateconf/201823901040.

7. Ranier Clement Tjptoprodjo. On a Finite Element Approach to Modeling of Piezoelectric Element Driven Compliant Mechanisms. Saskatchewan, Canada: University of Saskatchewan Saskatoon, April, 2005.

8. Andrianov I.V., Danishevskij V.V., Ivankov A.O. *Asimptoticheskie metody v teorii kolebanij balok i plastin* (Asymptotic methods in the theory of vibrations of beams and plates). Dnepropetrovsk: Pridneprovskaya State Academy of Construction and Architecture Publ, 2010, 216 p.

9. Rybak S.A., Tartakovsky B.D. On vibrations of thin plates [*O kolebanijah tonkih plastin*]. *Acoustic journal*, 1963, IX, vol. 1, pp. 66-71 (In Russian).

10. Pankov S.O. Oscillations of a rectangular orthotropic plate with free edges: analysis and solution of an infinite system [*Kolebanija prjamougol'noj ortotropnoj plastiny so svobodnymi krajami: analiz i reshenie beskonechnoj sistemy*]. *Acoustic journal*, 2015.– no. 2(61), pp. 152-160.

11. *Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 19.03.2019 № 466-r «Ob utverzhdenii programmy razvitiya OAO «RZHD» do 2025 goda»* (Order of the Government of the Russian Federation of 19.03.2019 No. 466-r «On approval of the development program of Russian Railways until 2025»).

12. Golubkov A.S., Smerdin A.N., Ermachkov G.R., Ryzhkov A.V. Application of Bayesian networks for improving diagnostic systems of railway power supply devices [Primenenie bajesovskih setej dlja sovershenstvovaniya sistem diagnostiki ustrojstv jelektrosnabzhenija zheleznyh dorog] *Fundamental'nye osnovy, teorija, metody i sredstva izmerenij, kontrolja i diagnostiki : Materialy 18-oj Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* (Proceedings of the 18th International Youth Scientific and Practical Conference). Novocherkassk, August 28-30, 2017, pp. 173-182 (In Russian).

13. Ermachkov G.R., Smerdin A.N., Golubkov A.S. Application of neural networks for modeling the interaction of a contact suspension and a current collector [Primenenie nejronnyh setej dlja modelirovaniya vzaimodejstviya kontaktnoj podveski i tokopriemnika] *Materialy XLII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii v ramkah realizacii Poslanija Prezidenta RK N. Nazarbaeva «Novyje vozmozhnosti razvitiya v uslovijah chetvertoj promyshlennoj revoljucii»* (Materials of the XLII International Scientific and Practical Conference in the framework of the implementation of the Message of the President of the Republic of Kazakhstan N. Nazarbayev «New development opportunities in the context of the Fourth Industrial Revolution»). Almaty: Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshepaev, 2018, pp. 66-72 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлов Вячеслав Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-67.

E-mail: pavlovvm@omgups.ru

Слатин Анатолий Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: slatin_omgups@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavlov Vyacheslav Mihajlovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: +7 (3812) 31-34-67.

E-mail: pavlovvm@omgups.ru

Slatin Anatoly Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: slatin_omgups@mail.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Петин Даниил Андреевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железно-
дорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: daniil.petin2405@gmail.com

Petin Daniil Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: daniil.petin2405@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Павлов, В. М. Совершенствование малогабаритного устройства сбора диагностической информации для контроля работоспособности токоприемников электроподвижного состава / В. М. Павлов, А. И. Слатин, Д. А. Петин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 44 – 55.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Pavlov V.M., Slatin A.I., Petin D.A. Improvement of a small diagnostic information collection device for monitoring the performance of electric rolling stock current receivers. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 2 (50), pp. 44-55 (In Russian).

УДК 629.423.1

Е. А. Третьяков, Е. Г. Авдиенко

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОВЕДЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПО ДАННЫМ ТЕКУЩИХ ИЗМЕРЕНИЙ БОРТОВЫХ СИСТЕМ И МГНОВЕННЫХ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ

Аннотация. В статье предлагается подход к повышению эффективности использования системы автоматического ведения поезда на основе мгновенных тяговых расчетов с использованием фактических параметров движения по данным текущих измерений бортовых систем электровозов. Выполнен критический анализ научных исследований по совершенствованию систем автоведения грузовых магистральных электровозов на основе современных технологий и алгоритмов машинного обучения. Как правило, все существующие подходы к определению оптимальных режимов ведения поезда основаны на применении правил тяговых расчетов с эмпирическим заданием сопротивлений движению и прочих факторов без учета реального влияния внешней среды, в том числе состоянии подвижного состава и объектов инфраструктуры.

Представлены результаты сравнения тяговых расчетов на участке Западно-Сибирского полигона по действующим правилам и в программе «КОРТЕС» с фактическими данными бортовых систем измерений электровоза серии 2ЭС6. На основе данных, расшифрованных с регистраторов параметров движения электровозов серии 2ЭС6, исследованы законы управления током возбуждения на реостатных и ходовых позициях в режиме тяги.

Обоснована возможность использования измеренных данных бортовых систем электровозов для определения параметров поезда, включая вращающий момент тяговых электродвигателей, силу тяги секций электровоза, фактическое суммарное сопротивление движению, инертные свойства и пр. Выполнен расчет указанных параметров для режима тяги. Введено понятие эквивалентной меры инертности и представлены выражения для определения параметров поезда на основе уравнения движения в виде малых приращений измеренных и расчетных данных.

Полученные результаты определения параметров поезда по мгновенным тяговым расчетам и данным текущих измерений бортовых систем электровозов показали статистическую устойчивость на реостатных позициях С-соединения и могут быть использованы в реальном времени для систем автоведения поезда, обеспечивая повышение точности определения управляющих воздействий с учетом фактического влияния внешней среды и повышение эффективности использования системы автоведения грузовых электровозов в целом.

Ключевые слова: электроподвижной состав, система автоведения, тяговые расчеты, уравнение движения, бортовые системы измерения, повышение эффективности.

Evgeniy A. Tretyakov, Egor G. Avdienko

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

IMPROVEMENT THE EFFICIENCY OF USING THE ELECTRIC CARGO LOCOMOTIVES AUTOMATIC CONTROL SYSTEM ON DATA OF CURRENT MEASUREMENTS OF ONBOARD SYSTEMS AND INSTANT TRACTION CALCULATIONS

Abstract. *The article proposes an approach to improve the efficiency of using the automatic train guidance system based on instantaneous traction calculations using the actual movement parameters according to current measurements of on-board systems of electric locomotives. A critical analysis of scientific research on the improvement of auto-guidance systems for freight mainline electric locomotives based on modern technologies and machine learning algorithms, neural networks has been carried out. As a rule, all existing approaches to determining the optimal train driving modes are based on the application of traction calculation rules with the empirical setting of movement resistances and other factors without taking into account the real influence of the external environment.*

The results of comparison of traction calculations in the section of the West Siberian test site according to the current rules and in the KORTES program with the actual data of the on-board measurement systems of the 2ES6 series electric locomotive are presented. Based on the data deciphered from the recorders of motion parameters of electric locomotives of the 2ES6 series, the laws of control of the excitation current at rheostatic and running positions in the traction mode are investigated.

The possibility of using the measured data of the on-board systems of electric locomotives to determine the parameters of the train, including the torque of the traction motors, the traction force of the electric locomotive sections, the actual total resistance to movement, inertial properties, etc., is substantiated. The calculation of these parameters for the traction mode is performed. The concept of equivalent mass is introduced and expressions are presented for determining the parameters of a train based on the equation of motion in the form of small increments of measured and calculated data.

The obtained results of determining the parameters of the train based on instantaneous traction calculations and data of current measurements of the on-board systems of electric locomotives showed statistical stability and can be used in real time for automatic train guidance systems, providing an increase in the accuracy of determining control actions, taking into account the actual influence of the external environment and increasing the efficiency of using the automatic guidance system for freight trains. locomotives in general.

Keywords: *electric rolling stock, automatic guidance system, traction calculations, equation of motion, on-board measurement systems, efficiency improvement.*

Повышение конкурентоспособности и эффективности деятельности холдинга «РЖД» за счет применения прорывных информационных технологий реализуется на основе стратегии цифровой трансформации холдинга, долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» до 2025 г., научно-технического проекта «Цифровая железная дорога» [1, 2], в соответствии с которыми предполагается разработка и внедрение в том числе следующих технологий:

«Industrial Internet of Things» (промышленный Интернет вещей) и «Big Data» (Большие данные) для автоведения, учитывающего заданный график движения поездов, возможности инфраструктуры, команды диспетчерских центров, техническое состояние подвижного состава и статусы ближайших участников движения; для постоянного сбора первичных данных о состоянии подвижного состава и объектов инфраструктуры с последующим формированием комплексного описания объектов в целях управления их жизненным циклом, контроля состояния подвижного состава в движении, цифровой диагностики объектов инфраструктуры, а также оперативного взаимодействия с участниками производственной деятельности и поставщиками;

технология «Imitation Modeling» (имитационное моделирование) для управления вагонами и локомотивами, позволяющая определять оптимальный режим работы подвижного состава с учетом его местонахождения, владельца, статуса, планов использования и технического состояния, а также резервировать вагономеста с целью повышения коэффициента полезного использования подвижного состава.

Таким образом, развитие цифровых информационных интеллектуальных технологий вызывает необходимость разработки новых подходов в системе автоматического управления (автоведения) поездом, связанных как с использованием данных измерений локомотива в процессе движения, так и с применением более совершенных алгоритмов, обеспечивающих учет большего количества факторов и прогнозирование развития ситуации. Актуальность данной тематики обуславливается также необходимостью повышения доли использования системы автоведения на практике. В ряде случаев система автоведения не способна в полной мере исполнить необходимые алгоритмы управления.

В области совершенствования системы автоведения известно достаточно большое количество научных исследований: Баранов Л. А. [6 – 8], Лазарян В. А. [9], Мугинштейн Л. А. [10], Никифоров Б. Д. [11], Плакс А. В. [12], Пясик М. С. [13], Ябко И. А. [14], среди которых наиболее близкими по тематике являются работы [4] и [5], направленные на применение искусственных нейронных сетей (ИНС) для модели поезда в тяговых расчетах в виде дискретных тел и локомотива с дискретным управлением тягой, а также для алгоритма обработки данных о текущих параметрах движения электровоза в сравнении с аналогичными поездками, позволяющего вычислять значения уставок силы тяги, обеспечивающих повышение эффективности его использования за счет снижения удельной энергоемкости тяги поездов локомотивов.

Основными недостатками предлагаемых подходов к совершенствованию систем автоведения поезда на основе нейронных сетей являются следующие. Во-первых, задача определения оптимальных уставок силы тяги решается на основе обучения искусственных рекуррентных нейронных сетей по ретроспективным данным за последние 30 секунд среди множества аналогичных поездок на данном участке с минимальным расходом электроэнергии без фактического учета реальных внешних факторов в данный момент, т. е. система автоведения настраивается на «лучшую» поездку из заложенных в базу поездок, выполненных в прошлом, без учета настоящего, т. е. не обладает адаптивностью к изменению внешних факторов на основе измеренных текущих поездных данных (состояние локомотива, погода, изменение состояния пути и т. п.). Во-вторых, параметры движения поезда определяются по действующим правилам тяговых расчетов, т. е. удельные сопротивления движению поезда задаются по эмпирическим формулам, снижая вероятность получения оптимальных режимов ведения поезда. Возникает парадоксальная ситуация – на упрощенных моделях движения поезда продолжают развиваться модели оптимального автоведения, в том числе с использованием методов искусственного интеллекта.

В связи с изложенным авторами предлагаются, среди прочего, следующие основные пути повышения эффективности использования системы автоведения грузовых электровозов:

отказ от части правил тяговых расчетов, выполняемых на основе эмпирических зависимостей, и переход к мгновенным тяговым расчетам по данным текущих измерений;

определение ряда параметров электровоза и поезда на основе текущих измерений (масса состава, сила тяги, силы сопротивления движению, сила инерции и пр.);

построение энергооптимальной траектории движения поезда в режиме реального времени с учетом данных текущих измерений электровоза.

Как известно, правила тяговых расчетов (ПТР) [15] определяют порядок и методику тяговых расчетов, устанавливают основные нормативы, принимаемые в расчетах, являются основой для расчета расхода электроэнергии и топлива на тягу поездов. Согласно требованиям ПТР [15] сопротивления движению поезда определяют по эмпирическим формулам, при этом фактическое основное удельное сопротивление движению поезда даже с учетом поправочных коэффициентов от воздействия окружающей среды может отличаться от расчетного в два – три раза, как показано на рисунке 1.

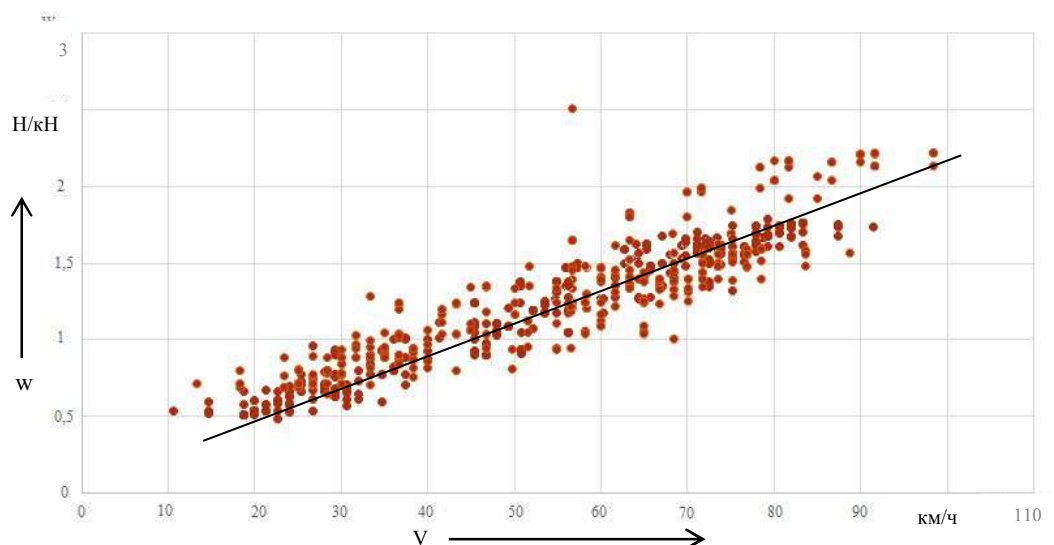


Рисунок 1 – Зависимость основного удельного сопротивления движению от скорости движения

Выполним сопоставление результатов моделирования тока электровоза 2ЭС6 на участке Москва – Кабаклы в программном комплексе «КОРТЭС» и фактических значений тока электровоза, полученных с регистраторов параметров движения (рисунок 2).

Как можно заметить, значения рассматриваемых токов электровоза значительно расходятся на протяжении всего участка.

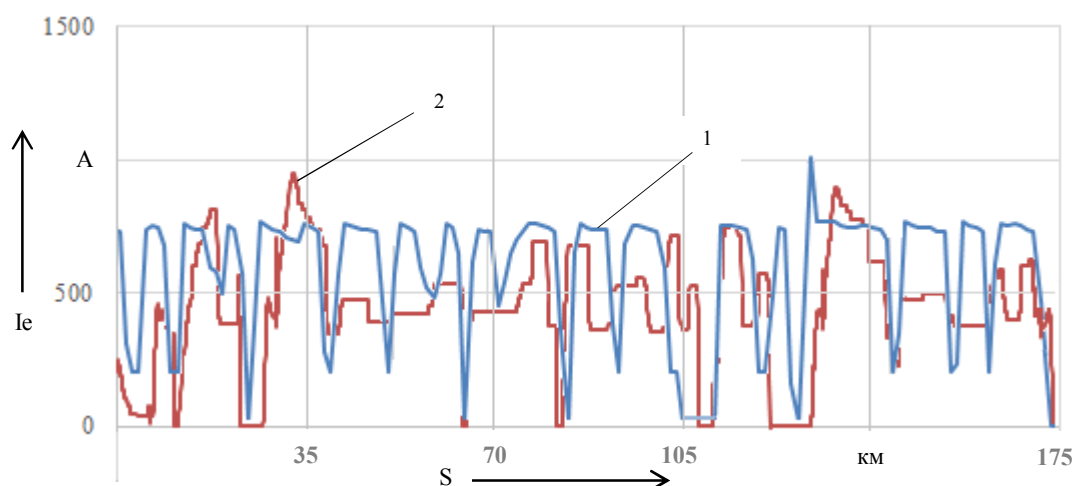


Рисунок 2 – Сравнение токов электровоза серии 2ЭС6 на участке Москва – Кабаклы:
1 – ток по программе «КОРТЭС»; 2 – ток электровоза с бортовых измерительных систем

В настоящее время наличие на современных электровозах бортовых измерительных систем (например, для электровоза 2ЭС6 датчики тока якоря – RS1, RS2, датчики тока возбуждения – RS3, RS4, датчики напряжения – UZ1, UZ2) позволяет получить основу для определения параметров движения поезда по фактическим данным в реальном времени. Погрешность бортовых измерительных систем не превышает 0,5 %. Применяемые ранее подходы на основе ПТР не учитывают фактических эксплуатационных условий.

На основе данных, расшифрованных с регистраторов параметров движения электровозов серии 2ЭС6, исследованы законы управления током возбуждения на реостатных и ходовых позициях в режиме тяги, в том числе с целью поиска устойчивых взаимосвязей между параметрами силовой цепи электровоза, соответствующих заявленным характеристикам тяговых электродвигателей и локомотива.

В соответствии с документом [3] закон управления током возбуждения определяется по выражению:

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$$I_{\text{в}} = I_{\text{в. уст}} + k \cdot I_{\text{я}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{в}}$ – ток возбуждения тягового электродвигателя;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря для группы тяговых электродвигателей;

$I_{\text{в. уст}}$ – задаваемая уставка тока возбуждения от системы управления;

k – коэффициент компаундирования обратной связи по току якоря, $0 < k < 1$.

На рисунке 3 представлена визуализация коэффициента компаундирования по данным измерительных систем электровоза 2ЭС6.



Рисунок 3 – Коэффициент компаундирования

На рисунке 4 представлены зависимости тока возбуждения от тока якоря на всем участке движения поезда (реостатные и ходовые позиции), на рисунке 5 – на реостатных позициях, на рисунке 6 – на ходовых позициях.

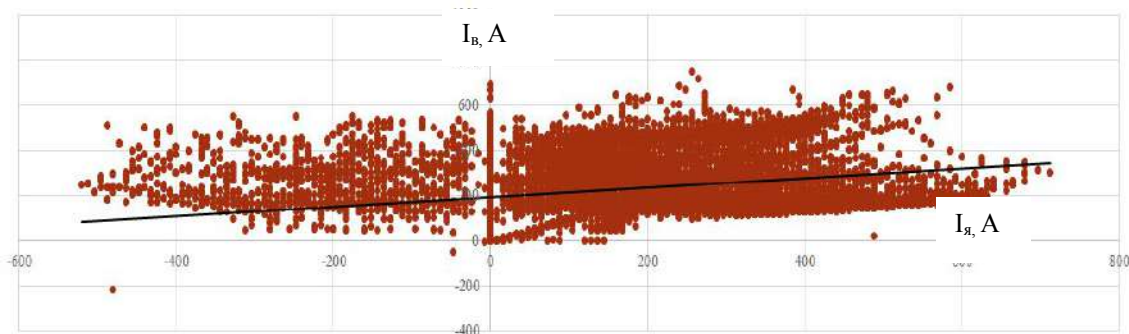


Рисунок 4 – Зависимости тока возбуждения от тока якоря на всем участке

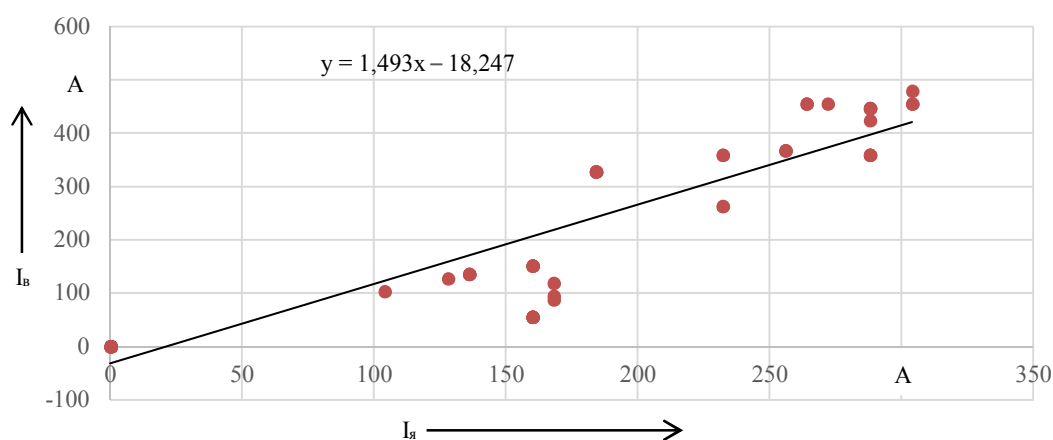


Рисунок 5 – Зависимости тока возбуждения от тока якоря на реостатных позициях

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

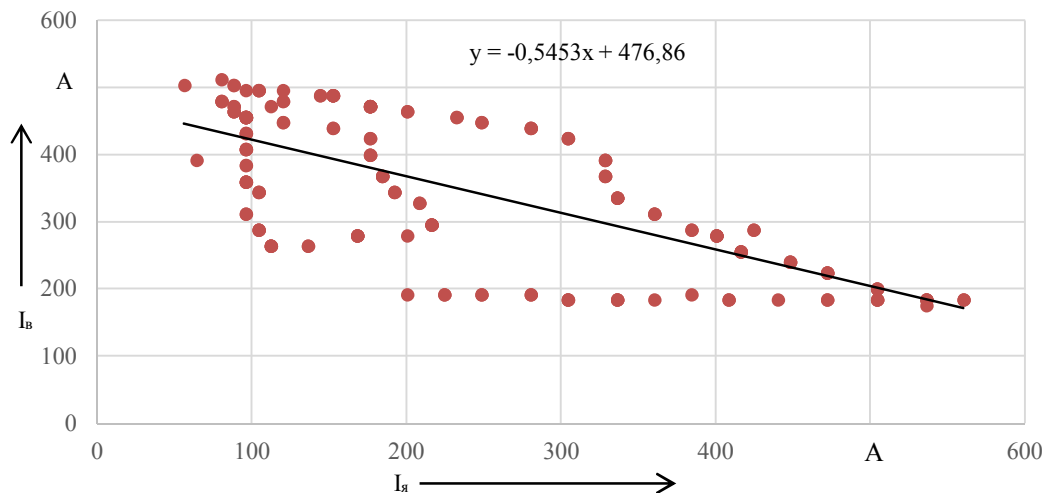


Рисунок 6 – Зависимости тока возбуждения от тока якоря на ходовых позициях

Анализ представленных на рисунках 3 – 6 зависимостей позволяет сделать вывод о том, что на реостатных позициях наблюдается удовлетворительная сходимость измеренных данных с законом управления током возбуждения при $I_{в.уст} = \text{const}$ по выражению (1). На ходовых позициях из-за малых активных сопротивлений силовой цепи электровоза наблюдается значительное влияние случайных составляющих, вызванных отклонениями, колебаниями напряжения в контактной сети, динамическими составляющими нагрузки. Кроме этого закон управления током возбуждения на электровозе 2ЭС6 обеспечивает изменение жесткости скоростных характеристик тяговых электродвигателей при $I_{в.уст} = \text{var}$, как оказалось на ходовых позициях (см. рисунок 6).

Для повышения достоверности результатов исследований рассмотрим участки движения поезда на реостатных позициях с высокой сходимостью экспериментальных точек и аппроксимирующей прямой, описывающей закон управления током возбуждения при $I_{в.уст} = \text{const}$. При этом на реостатных позициях с 1-й по 23-ю выполняется набор скорости, описываемый уравнением движения поезда. На ходовых позициях при постоянной скорости движения отсутствует возможность определения ряда параметров поезда по измеренным данным. Анализ законов управления током возбуждения при $I_{в.уст} = \text{var}$ для получения параметров поезда для целей автоведения является темой дальнейших исследований авторов.

Системы автоведения грузовых электровозов базируются на уравнении движения поезда и ПТР с уравнениями на основе усредненных эмпирических данных по сопротивлениям движения с контролем скорости.

Применение текущих измерений бортовых систем электровозов и мгновенных тяговых расчетов, как предлагается, позволит обеспечить повышение достоверности определения параметров движения грузового поезда и окружающей инфраструктуры в реальном времени и, как следствие, повышение эффективности использования системы автоведения.

Обоснуем возможность использования измеренных данных бортовых систем электровозов для определения параметров поезда, включая вращающий момент тяговых электродвигателей, силу тяги секций электровоза, фактическое суммарное сопротивление движению, инертные свойства и пр.

Уравнение движение поезда в первой форме записывается в виде [15]:

$$m(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} + \xi W = \xi F_k, \quad (2)$$

где m – масса состава, т;

$(1 + \gamma)$ – коэффициент инерции вращающихся частей;

dv – изменение скорости, м/с;

dt – изменение времени, с;

ξ – переводной коэффициент;

W – сопротивление движению поезда, кН;

F – сила тяги электровоза, кН.

С точки зрения свойств инертности поезда выражение $m(1 + \gamma)$ можно рассматривать как единое целое из-за невозможности на основе данных измерений выделить составляющие поступательного и вращательного движения. Введем понятие эквивалентной меры инертности поезда $m' = m(1 + \gamma)$.

Сила тяги электровоза может быть определена на основе данных измерений регистраторами параметров движения (так называемые РПМ-файлы) по выражению:

$$F_{\text{РПМ}} = 8 \cdot M \frac{3,44\eta}{1,21 \cdot 10^3}, \quad (3)$$

где M – вращающий момент тягового электродвигателя, Н·м;

η – КПД двигателя.

Выражение для вращающего момента тягового электродвигателя ДПТ-810 получено авторами на основе аппроксимации известной магнитной характеристики от тока возбуждения I_b [15]:

$$M = \frac{I_b}{868,678 + 2,676 \cdot I_b}, \quad (4)$$

Микропроцессорная система управления и диагностики (МПСУиД) электровоза 2ЭС6 также выполняет расчет силы тяги электровоза $F_{\text{расч}}$ по данным измерений.

На рисунке 7 представлены изменения силы тяги электровоза на рассматриваемом участке на серийном соединении (С-соединении) тяговых электродвигателей.

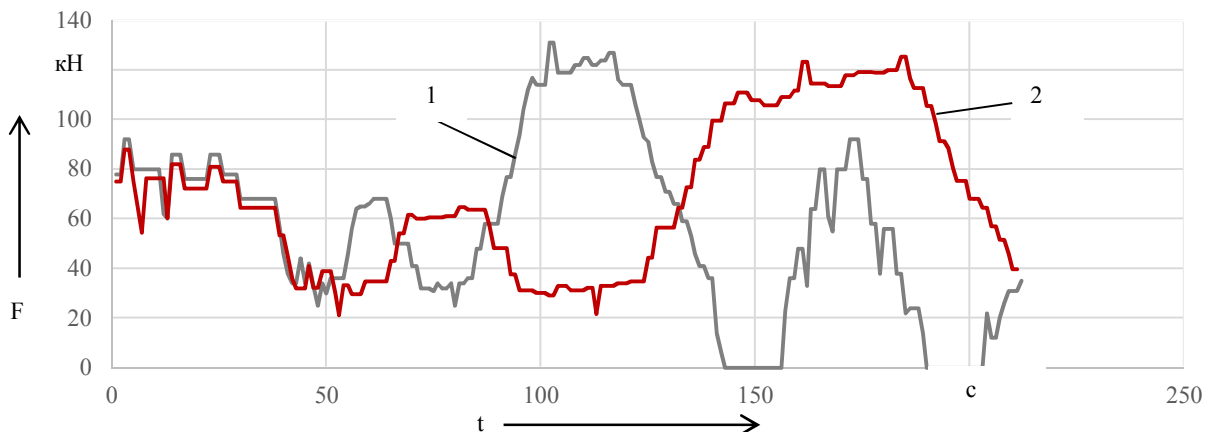


Рисунок 7 – Значения силы тяги на С-соединении: 1 – $F_{\text{РПМ}}$; 2 – $F_{\text{расч}}$

Как следует из представленных данных, наиболее высокая сходимость наблюдается на реостатных позициях С-соединения (см. рисунок 7, до 50-й секунды). На реостатных позициях серийно-параллельного соединения (СП-соединения) значения реостатных сопротивлений ниже, чем на С-соединении, и сходимость ниже.

При выходе на ходовые позиции меняется закон управления токов возбуждения $I_{b, \text{уст}} = \text{var}$, и в выражении (4) $M = \text{var}$.

На основе экспериментальных данных бортовых систем можно получить значение сопротивления движению, эквивалентную меру инертности поезда. Из формулы (1) для рассматриваемого участка набора скорости на реостатных позициях $\frac{dv}{dt} > 0$.

Если рассматривать составляющие уравнения (1) в малых приращениях, то с достаточно высокой точностью можно записать:

$$\begin{cases} m' \frac{v_{i+1} - v_i}{t_{i+1} - t_i} + \xi W = \xi F_{ki}; \\ m' \frac{v_{i+2} - v_{i+1}}{t_{i+2} - t_{i+1}} + \xi W = \xi F_{k(i+1)}, \end{cases} \quad (5)$$

где v_i, v_{i+1}, v_{i+2} – мгновенная скорость движения поезда в моменты времени t_i, t_{i+1}, t_{i+2} , м/с;

$F_{ki}, F_{k(i+1)}$ – мгновенные значения силы тяги поезда в соответствующие моменты времени ($F_k = F_{\text{ПТМ}}$), Н · м.

Аналогично составляется система уравнений для определения последующих групп моментов времени. Систему уравнения (5) можно представить в матричной форме относительно неизвестных:

$$\begin{bmatrix} m' \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_{i+1} - v_i}{t_{i+1} - t_i} + \xi \\ \frac{v_{i+2} - v_{i+1}}{t_{i+2} - t_{i+1}} + \xi \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \xi F_{ki} \\ \xi F_{k(i+1)} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для исключения нулевых приращений скорости, обусловленных разрядностью бортовой измерительной системы (шаг измерения скорости составляет 1 км/ч), предлагается функцию скорости по времени на рассматриваемом участке аппроксимировать полиномом третьего порядка (рисунок 8).

Аналогично на рассматриваемом участке (реостатные позиции 1 – 23 на С-соединении) аппроксимирована функция силы тяги $F_{\text{расч}}$ (рисунок 9).

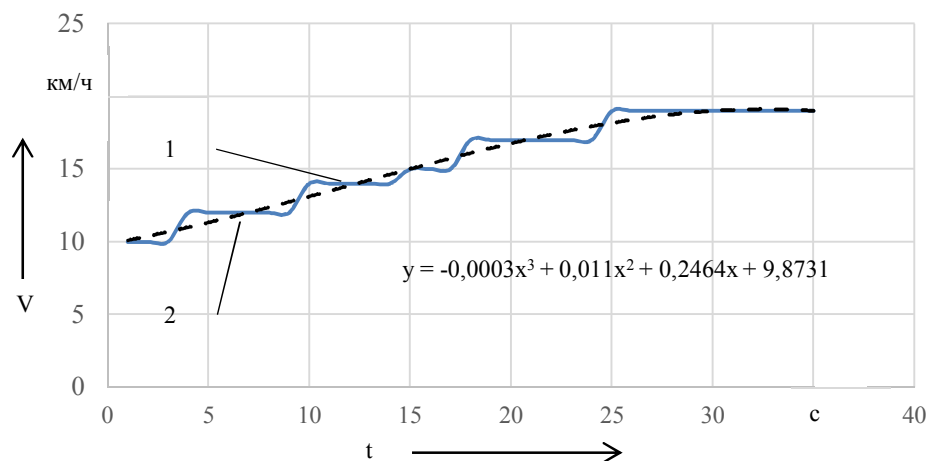


Рисунок 8 – Аппроксимация функции скорости движения поезда:
1 – график скорости; 2 – аппроксимирующий полином третьего порядка

Мгновенные значения силы тяги поезда в соответствующие моменты времени в выражении (5) задавались на основе аппроксимирующей кривой.

В результате решения систем уравнений (6) получены мгновенные значения эквивалентной меры инертности поезда и сопротивления движению поезда (рисунок 10). Среднее значение эквивалентной меры инертности поезда составило на участке 2520 т, сопротивления движению поезда – 70 кН.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Полученные результаты определения параметров поезда по мгновенным тяговым расчетам и данным текущих измерений бортовых систем электровозов показали статистическую устойчивость на реостатных позициях С-соединения и могут быть использованы в реальном времени для систем автоведения поезда, обеспечивая повышение точности определения управляющих воздействий с учетом фактического влияния внешней среды и повышение эффективности использования системы автоведения грузовых электровозов в целом.

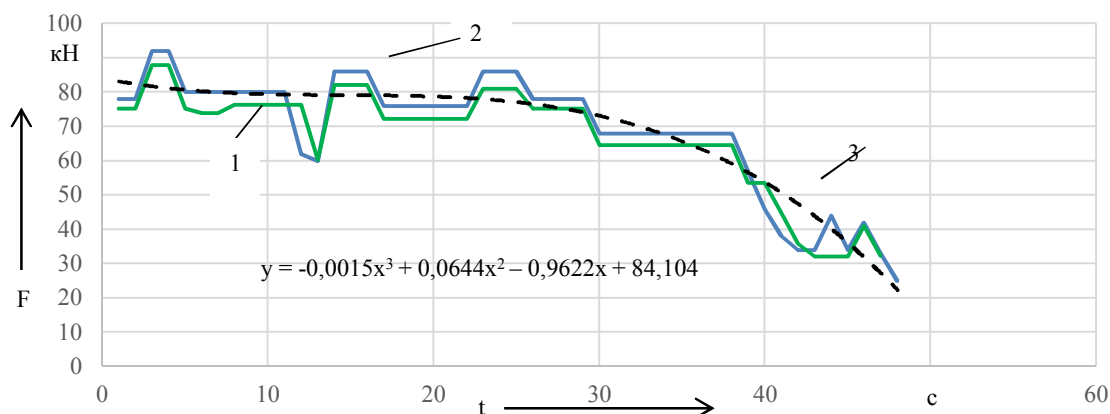


Рисунок 9 – Изменение силы тяги поезда при наборе скорости:
1 – $F_{РПМ}$; 2 – $F_{расч}$; 3 – аппроксимирующий полином третьего порядка

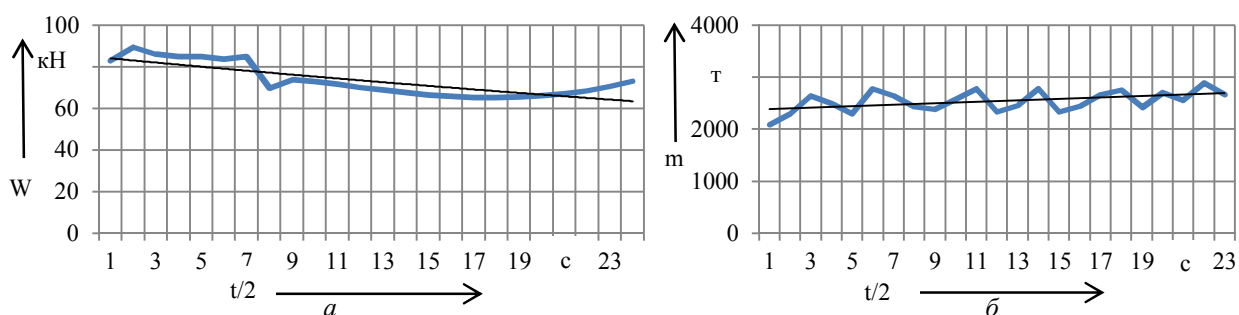


Рисунок 10 – Расчетные значения силы сопротивления движению (а) и мгновенной эквивалентной меры инертности поезда (б)

Научный интерес представляют также вопросы определения параметров поезда по мгновенным тяговым расчетам и данным текущих измерений бортовых систем электровозов во всех режимах работы, включая движение с установившейся скоростью, выбег, торможение, что является предметом дальнейших исследований авторов.

Список литературы

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» № 466р. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018 / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2019. – 135 с. – Текст : непосредственный.
2. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года № 466р. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018 / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2018. – 19 с. – Текст : непосредственный.
3. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 (Синара) с коллекторными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Технические характеристики и электрические схемы. – Верхняя Пышма : ОАО «УЗЖМ», 2008. – 112 с. – Текст : непосредственный.
4. Малахов, С. В. Оптимизация энергозатрат на тягу поездов на основе уточненного метода тяговых расчетов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.

наук / Малахов Сергей Валерьевич; Российский университет транспорта. – Москва, 2021. – 147 с. – Текст : непосредственный.

5. Перестенко, А. Е. Повышение эффективности использования магистральных грузовых электровозов посредством управления режимами эксплуатации : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Перестенко Артем Евгеньевич; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2021. – 18 с. – Текст : непосредственный.

6. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом : учебник : В 3 частях. Ч. 1. Теория автоматического управления / под ред. Л. А. Баранова и А. Н. Савоськина. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 400 с. – Текст : непосредственный.

7. Микропроцессорные системы автоведения подвижного состава / под ред. Л.А. Баранова. – Москва : Транспорт, 1990. – 272 с. – Текст : непосредственный

8. Оптимизация управления движением поездов : учебное пособие / Л. А. Баранова. – Москва : Российский ун-т транспорта, 2001. – 164 с. – Текст : непосредственный.

9. Мугинштейн, Л. А. Нестационарные режимы тяги (Сцепление. Критическая норма массы поезда) / Л. А. Мугинштейн, А. Л. Лисицын. – Москва : Интекст, 1996. – 176 с. – Текст : непосредственный.

10. Локомотивная система управления и обеспечения безопасности / Б. Д. Никифоров, М. Д. Рабинович, А. А. Хацкелевич [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2004. – № 8. – С. 60–64.

11. Плакс, А. В. Системы управления электрическим подвижным составом : учебник / А. В. Плакс – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте; Маршрут, 2005. – 358 с. – Текст : непосредственный.

12. Пяси́к, М. С. Энергооптимальная система автоведения электровозов, адаптированная к условиям движения : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пяси́к Михаил Соломонович; Всерос. науч.-исследоват. ин-т железнодорожного транспорта. – Москва, 2003. – 102 с. – Текст : непосредственный.

13. Ябко, И. А. Численный метод определения энергооптимального управления движением поезда / И. А. Ябко. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт на новом этапе развития : труды ВНИИЖТа. – Москва : Интекст, 2003. – С. 129–135.

14. Правила тяговых расчетов для поездной работы : Распоряжение ОАО «РЖД» № 867р от 12.05.2016 // <https://docs.cntd.ru/> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200079084> (дата обращения: 04.03.2022).

15. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – Москва : Транспорт, 1983. – 328 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Dolgosrochnaja programma razvitija otkrytogo akcionernogo obshhestva «Rossijskie zheleznye dorogi»* № 466r. Utv. Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 07.05.2018. Pravitel'stvo Rossijskoj Federacii. Moscow, 2019, 135 p. (In Russian).

2. *O nacional'nyh celjah i strategicheskikh zadachah razvitija Rossijskoj Federacii na period do 2024 goda* № 466r. Utv. Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 07.05.2018. / Prezident Rossijskoj Federacii. Moscow, 2018, 19 p. (In Russian).

3. *Elektrovoz gruzovoy postoyannogo toka 2ES6 (Sinara) s kollektornimi tyagovimi elektrodvigatelyami : Rukovodstvo po ekspluatatsii : Chast' I. Tekhnicheskie harakteristiki i elektricheskie skhemy* (DC electric freight locomotive 2ES6 (Sinara) with collector traction motors. User Manual: Part 1. Specifications and Wiring Diagrams). JSC UZZHM Publ., 2008, 112 p. (In Russian).

4. Malahov S.V. *Optimizacija jenergozatrata na tjagu poezdov na osnove utochnennogo metoda tjagovyh raschjotov: special'nost'*. Doctor's thesis, Malahov Sergej Valer'evich; Rossijskij universitet transporta. Moscow, 2021, 147 p. (In Russian).

5. Perestenko A.Ju. *Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija magistral'nyh gruzovyh jel-ektrovozov posredstvom upravlenija rezhimami jekspluatacii*. Doctor's thesis. OSTU. Omsk, 2021, 18 p. (In Russian).
6. Baranov L.A. *Avtomatizirovannye sistemy upravlenija jelektropodvizhnym sostavom : ucheb-nik* (Automated control systems for electric rolling stock). Moscow. Transport publ., 2014, 400 p. (In Russian).
7. Baranov L.A. *Mikroprocessornye sistemy avtovedenija podvizhnogo sostava* (Microprocessor systems for automatic guidance of rolling stock). Moscow. Transport publ., 1990, 272 p. (In Russian).
8. Baranov L.A. *Optimizacija upravlenija dvizheniem poezdov* (Optimization of train traffic control). Moscow, 2001, 164 p. (In Russian).
9. Muginshtejn L.A., Lisicyn A.L. *Nestacionarnye rezhimy tjagi* (Unsteady thrust modes). Mjscow: Intekst Publ., 1996, 176 p. (In Russian).
10. Nikiforov B.D. Locomotive control and safety system. *Zheleznodorozhnyj transport – The journal of railway transport*, 2004, no. 8, p. 20 (In Russian).
11. Plaks A. V. *Sistemy upravlenija jelektricheskim podvizhnym sostavom* (Electric rolling stock control systems). Moskow, 2005, 358 p. (In Russian).
12. Pjasik M.S. *Jenergooptimal'naja sistema avtovedenija jelektrovozov, adaptirovannaja k uslovijam dvizhenija*: Doctor's thesis, Muginshtejn Lev Aleksandrovich; Federal'noe gosudarstven-noe unitarnoe predpriatie Vserossijskogo nauchno-issledovatel'nogo instituta zheleznodorozhnogo transporta : Moscow, 2003, 102 p. (In Russian).
13. Jabko I.A. *Numerical method for determining the energy-optimal control of train movement*. *Zheleznodorozhnyj transport na novom jetape razvitija*. Trudy VNIIZhT. Moscow: Intekst, 2003, pp. 129-135 (In Russian).
14. Pravila tja.govykh raschetov dlja poezdnoj raboty : Rasporjazhenie OAO «RZhD» № 867r ot 12.05.2016. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200079084> (accessed: 19.11.2021).
15. Rozenfel'd V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N. *Teorija jelektricheskoy tjagi* (Electric traction theory). Moscow: Transport Publ., 1983, 328 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Третьяков Евгений Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (905) 921-47-30.

E-mail: eugentr@mail.ru

Авдиенко Егор Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (933) 302-02-50.

E-mail: sleyter.ua@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Третьяков, Е. А. Повышение эффективности использования системы автоведения грузовых электро-возов по данным текущих измерений бортовых систем и мгновенных тяговых расчетов / Е. А. Третьяков, Е. Г. Авдиенко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 55 – 65.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tretyakov Evgeniy Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electric railways rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (905) 921-47-30.

E-mail: eugentr@mail.ru

Advienko Egor Gennadyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Engineer, postgraduate student of the department «Electric railways rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (933) 302-02-50.

E-mail: sleyter.ua@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tretyakov E.A., Advienko E.G. Improvement the efficiency of using the electric cargo locomotives automatic control system on data of current measurements of onboard systems and instant traction calculation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 55-65 (In Russian).

И. И. Лакин¹, В. А. Мельников²

¹АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ), г. Москва, Российская Федерация;

²Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОВЕРКИ ДОСТОВЕРНОСТИ ДАННЫХ О НАДЕЖНОСТИ ЛОКОМОТИВОВ, ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ

Аннотация. В практике железнодорожного транспорта и локомотивного комплекса используемые среднестатистические данные на практике не являются однородными, что в литературе принято называть «средней температурой по больнице». Однородность данных определяется их унимодальностью, т. е. наличием в выборке одного процесса. Неудачное формирование выборки приводит к ее бимодальности и даже к мультимодальности.

Проверку на унимодальность исходных данных предлагается реализовать, воспользовавшись следствием закона больших чисел, согласно которому при увеличении числа данных однородные выборки стремятся к одному из законов распределения случайной величины: нормальному, экспоненциальному, логнормальному или другому известному закону. Следовательно, любая унимодальная выборка должна соответствовать критерию согласия, в качестве которого в статье предлагается использовать критерий Пирсона («хи-квадрат», χ^2). Унимодальность данных предлагается оценивать через вероятность соответствия выбранному для рассмотрения закону распределения случайной величины, считая достаточной вероятность более 0,3 (30 %).

На примере данных эксплуатации локомотивов и данных бортовых микропроцессорных систем показаны данные, которые действительно не могут быть унимодальными, а есть данные, требующие изменения правил формирования выборки для достижения унимодальности. Например, при рассмотрении среднесуточных пробегов локомотивов по сериям по конкретным депо приписки при участии в одном виде движения (магистральное движение, вывозная или маневровая работа) достигается их унимодальность. Попытка укрупнить данные (взять несколько серий, несколько полигонов и др.) приводит к потере унимодальности.

В статье рассмотрена унимодальность данных бортовых микропроцессорных систем управления МСУ-ТП тепловозов серии 2ТЭ116У. Ожидаемое время работы по позициям контроллера машиниста оказалось мультимодальным. Неожиданно унимодальным оказался ток тяговых электродвигателей независимо от ходовой позиции контроллера машиниста.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, локомотивы, надежность, проверка достоверности.

Igor I. Lakin¹, Viktor A. Melnikov²

¹Transmashholding LLC (TMH), Moscow, the Russian Federation;

²Russian university of transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

MATHEMATICAL METHODS FOR RELIABILITY VERIFICATION OF DATA ON RELIABILITY OF LOCOMOTIVES, THEIR OPERATION AND MAINTENANCE

Abstract: In the practice of railway transport and the locomotive complex, the average statistical data used in practice are not homogeneous, which is usually called “average temperature in the hospital” in the literature. The homogeneity of data is determined by their unimodality, i.e. the presence of one process in the sample. Unsuccessful sampling leads to its bimodality and even multimodality.

It is proposed to check for unimodality of the initial data using the consequence of the law of large numbers, according to which, with an increase in the number of data, homogeneous samples tend to one of the distribution laws of a random variable: normal, exponential, lognormal, or another known law. Therefore, any unimodal sample must meet the goodness-of-fit test, which the article proposes to use the Pearson test (“chi-square”, χ^2). The unimodality of the data is proposed to be estimated through the probability of compliance with the law of distribution of a random variable chosen for consideration, considering the probability of more than 0.3 (30%) to be sufficient.

On the example of locomotive operation data and on-board microprocessor systems data, data are shown that cannot really be unimodal, but there is data that requires changing the sampling rules to achieve unimodality. For example, when considering the average daily runs of locomotives by series at specific home depots with participation in one type of traffic (main traffic, shunting or switching work), unimodality is achieved. An attempt to enlarge the data (take several series, several polygons, etc.) leads to the loss of unimodality.

The article considers the unimodality of these on-board microprocessor control systems MSU-TP for diesel locomotives of the 2TE116U series. The expected operating time for the positions of the driver's controller turned out to be

multimodal data. Unexpectedly, the current of the traction motors turned out to be unimodal, regardless of the driving position of the driver's controller.

Key words: railway engineering, locomotives, reliability, dependability control

Задача научной организации производства, управления качеством технологических процессов впервые была решена в конце XIX в. – в начале XX в. Фредериком Тейлором [1]. В начале XX в. принципы управления качеством продукции и ее себестоимостью научно и практически развил Генри Гант (наиболее известна «диаграмма Ганта», хотя это далеко не единственная и не основная его разработка). Качественно новый этап управления производством в середине XX в. связан с именами Уолтера Шухарта и Эдварда Деминга, которые ввели в менеджмент обязательность применения принципа постоянного улучшения (цикл PDCA). Принимая за основу тезис о постоянной изменчивости производственной ситуации, Э. Деминг развил теорию вариабельности предприятий, сделав практику применения вероятностно-статистических методов в управлении обязательной [1].

Развитие теории Э. Деминга применительно к отечественному локомотивному комплексу во второй половине XX в. выполнил выдающийся ученый, доктор технических наук, профессор Игорь Петрович Исаев, который не только адаптировал математический аппарат к условиям транспорта, но и практически реализовал систему в локомотивном депо «Рыбное» [2]. И. П. Исаев создал школу статистического управления надежностью локомотивов, которая развивалась его учениками и последователями [3]. Вероятностно-статистические методы стали обязательной частью учебного процесса [4].

Современный этап развития теории надежности локомотивов связан с развитием средств вычислительной техники (IT-технологий). Под руководством д.т.н. Игоря Капитоновича Лакина создана автоматизированная система управления (АСУ) локомотивным хозяйством (АСУТ) [5] – основа системы управления локомотивным комплексом ОАО «РЖД». Как развитие АСУТ И. К. Лакиным и его учениками создана АСУ технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов АСУ «Сетевой график» (АСУ СГ) для управления ТОиР в 85 сервисных локомотивных депо группы компаний «ЛокоТех» [6, 7, 9]. В АСУ СГ инкапсулированы научные положения менеджмента качества, Lean Production, TQM и др., в результате подготовлено пять кандидатских диссертаций и одна докторская.

С июля 2014 г. ОАО «РЖД» перешло на сервисную систему ТОиР локомотивов, при которой сервисные компании (представители заводов-изготовителей) получают доход (выручку) не за выполненный объем ТОиР, а за полезный пробег локомотивов (руб./км). Предусмотрен понижающий коэффициент, если не обеспечен заданный в договоре сервисного обслуживания уровень надежности (SLA). Все вновь покупаемые в ОАО «РЖД» локомотивы поставляются по Контракту жизненного цикла (КЖЦ), где установлены более строгие требования к надежности локомотивов. Определить на 40 лет вперед затраты на ТОиР – трудная задача. Переход от бюджетной формы оплаты ТОиР к КЖЦ требует применения вероятностно-статистических методов: необходимо прогнозировать объем ТОиР как в рамках планово-предупредительной системы, так и для сверхцикловых неплановых работ из-за отказов, необходимости модернизации и др. Возрастает роль вариативных методов управления.

В процессе эксплуатации локомотивов выполненная ими работа (в тонна-километрах, киловатт-часах, миллионах километров и др.) фиксируется в информационных системах ОАО «РЖД» [5, 10]. Одновременно в бортовых микропроцессорных системах управления (МСУ) локомотива по информации с датчиков регистрируется информация о режимах работы оборудования, производится техническое диагностирование [6, 7]. Эта информация является исходной для организации ТОиР как планово-предупредительного с элементами предиктивного ремонта (с учетом фактического технического состояния локомотивов, выполненной ими работы).

При заходе локомотива в сервисное локомотивное депо (СЛД) на ТОиР выполняется анализ накопленной в процессе эксплуатации информации, производится дополнительное диагностирование при помощи переносных и стационарных систем (вибродиагностирование, измерение профиля бандажа, сопротивления изоляции и др.). Используются также результаты

визуального осмотра, замечания машиниста из бортового журнала. Вся информация собирается в электронной диагностической карте, которая является основанием для назначения сверхцикловых работ для устранения отказов и предотказных состояний. На каждую плановую и сверхцикловую работу выписывается электронный наряд, в котором фиксируются трудозатраты, полученные со склада материалы и запасные части, а в дальнейшем будут указываться использованный при ТОиР инструмент и оборудование. Регистрируется простой локомотива на различных операциях. В результате в процессе эксплуатации и ТОиР локомотивов формируется комплексная база данных на протяжении всего жизненного цикла локомотивов по безбумажной технологии. Важно, что данные являются результатом процессов эксплуатации и ТОиР, а не вводятся вручную.

Информация жизненного цикла локомотивов нужна не только для управления производственными процессами ТОиР, но и для анализа эффективности организации эксплуатации и ТОиР локомотивов [9, 10]. Современная интероперабельная система АСУ конструирования, производства, эксплуатации и ТОиР локомотивов создает большой объем данных (Big Data), анализ которого невозможен без программируемых алгоритмов анализа. Однако автоматизированная обработка данных имеет риск получения ложных заключений. Данная ситуация типична не только для России – проблема оценки достоверности при работе с большими объемами данных затрагивается и в зарубежных трудах [11, 12], однако единого подхода к ее решению в настоящее время не существует.

Марк Твен в книге «Главы моей биографии» процитировал премьер-министра Великобритании: «Существуют три вида лжи: ложь, наглая ложь и статистика». Это широко известное выражение подчеркивает наличие рисков при формальной математической обработке данных. Один из них известен как «средняя температура по больнице»: смешивание разнородных данных. Со средней температурой ошибка очевидна. В практике локомотивного комплекса часто пользуются усредненными значениями для оценки эффективности эксплуатации и ТОиР локомотивов: участковая скорость, время простоя на ТОиР и его ожидания, интенсивность отказов по видам оборудования, необходимая периодичность ТОиР по видам оборудования и др. Проверка на унимодальность при этом не производится.

Формализация проверки процессов на унимодальность возможна по свойству закона больших чисел [4, 8]: при увеличении выборки вероятность появления того или иного значения приближается к устойчивому значению. То есть унимодальный процесс принимает вид стандартного распределения случайной величины: нормального, экспоненциального, логнормального или другого; оценить унимодальность можно по критерию согласия проверки гипотез.

Рассмотрим пример распределения пробега локомотива L между ТР-1 (рисунок 1 и таблица 1).

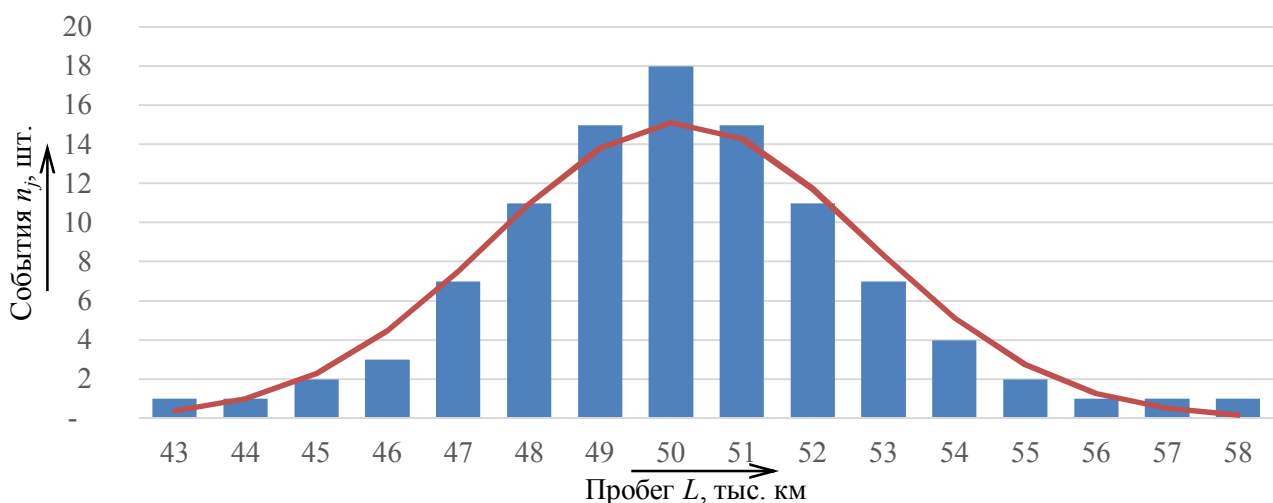


Рисунок 1 – Пример распределения межремонтного пробега, тыс. км (столбцы – фактические данные, график – теоретическое распределение)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Примеры распределения межремонтного пробега

i	L_i , тыс. км	Объем выборки фактический N				Теоретический объем выборки N_t				
		100	1 000	10 000	100 000	$f(L_i)$	100	1 000	10 000	100 000
1	43	1	10	100	1 000	0,0040	0	4	40	395
2	44	1	10	100	1 000	0,0102	1	10	102	1 024
3	45	2	20	200	2 000	0,0230	2	23	230	2 298
4	46	3	30	300	3 000	0,0446	4	45	446	4 465
5	47	7	70	700	7 000	0,0751	8	75	751	7 513
6	48	11	110	1 100	11 000	0,1095	11	110	1 095	10 951
7	49	15	150	1 500	15 000	0,1382	14	138	1 382	13 823
8	50	18	180	1 800	18 000	0,1511	15	151	1 511	15 111
9	51	15	150	1 500	15 000	0,1431	14	143	1 431	14 308
10	52	11	110	1 100	11 000	0,1173	12	117	1 173	11 733
11	53	7	70	700	7 000	0,0833	8	83	833	8 333
12	54	4	40	400	4 000	0,0513	5	51	513	5 126
13	55	2	20	200	2 000	0,0273	3	27	273	2 731
14	56	1	10	100	1 000	0,0126	1	13	126	1 260
15	57	1	10	100	1 000	0,0050	1	5	50	503
16	58	1	10	100	1 000	0,0017	0	2	17	174
	L_n	50,12	50,12	50,12	50,12					
	σ	2,64	2,63	2,62	2,6					

Сформировано четыре выборки с одинаковой пропорцией распределения, но с различным числом данных: $N = \{100, 1000, 10\,000, 100\,000\}$. У распределений одинаковое математическое ожидание $L_n = 50,12$ тыс. км и почти одинаковое среднеквадратичное отклонение σ_n [4]:

$$L_n = \frac{1}{Nn} \sum_{i=1}^{Nn} L_{ni}; \quad (1)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{Nn-1} \sum_{i=1}^{Nn} (L_{ni} - L_n)^2}, \quad (2)$$

где L_n – математическое ожидание выборки $n \in N = \{100, 1000, 10\,000, 100\,000\}$;

L_{ni} – i -й пробег выборки $n \in N = \{100, 1000, 10\,000, 100\,000\}$;

N_n – максимальное число данных в выборке $n \in N$.

По критерию согласия Пирсона вычисляется «хи-квадрат» χ^2_n для каждой выборки $n \in N$:

$$\chi^2_n = \sum_{i=1}^{Nn} \frac{(L_{ni} - L_{\text{теор } i})^2}{L_{\text{теор } i}}, \quad (3)$$

где $L_{\text{теор } i}$ – теоретическое число попаданий в диапазон для нормального закона распределения случайной величины, вычисляемое по функции плотности распределения $f(x)$ [4] (см. таблицу 1): $L_{\text{теор}} = \int_{x_{n1}}^{x_{n2}} f(x) dx$.

Вероятность соответствия нормальному закону P_n определяется по таблице Пирсона. В таблице 2 приведены результаты расчета: только для $N = 100$ есть значимая вероятность соответствия нормальному закону $P_{100} = 0,3$.

Таблица 2 – Вероятность соответствия нормальному закону по χ^2

Показатель	Объем выборки фактический N			
N_n	100	1 000	10 000	100 000
χ^2	7	73	732	7 325
P_n	0,3	0	0	0

Четыре одинаковых распределения имеют разную вероятность соответствия закону: вероятность соответствия крайне чувствительна к объему выборки. В практике локомотивного хозяйства выборки всегда будут разного объема и зашумленные даже при больших выборках. Ориентация на минимальную из них снизит объем полезной информации. Критерий Пирсона эффективен и чувствителен для строго унимодальных выборок и для инкапсуляции в АСУ не подходит.

Рассмотренный пример проверен по критерию согласия Колмогорова – Смирнова, согласно которому надо найти максимальное различие фактического L_{ni} и теоретического $L_{теор i}$ распределений:

$$\Delta_{\max} = \text{Max} (f_{\Phi i} - f_{mi}), \quad (4)$$

где $f_{\Phi i} = N_i / N$;

$f_{mi} = N_{mi} / N_{mi}$;

N_i – число фактических попаданий в диапазон i ;

N – размер эмпирической выборки;

N_{mi} – число теоретических попаданий в диапазон i ;

N_m – размер контрольной выборки ($N_m = N$).

Далее следует рассчитать показатель D , который для нормального закона имеет вид:

$$D_{\Phi} = \Delta_{\max} \cdot (N^{0,5} - 0,01 + 0,85 / N^{0,5}). \quad (5)$$

В таблице 3 приведены результаты расчета: при увеличении выборки вероятность соответствия уменьшается медленнее, чем по критерию согласия Пирсона: при выборках менее 1000 проверка унимодальности по D_{Φ} эффективна.

Таблица 3 – Вероятность соответствия нормальному закону по D_{Φ}

N	100	1000	10000	100000
$\Delta_{\max}$	0,029	0,029	0,029	0,029
D	0,2910	0,9139	2,8885	9,1341
P_n	0,9999	0,3791	0,00000018	0

Проверка унимодальности данных внедрена авторами в практику их работы. Приведем примеры полученных на практике данных.

Один из важных показателей эксплуатации локомотивов – средняя участковая скорость движения. Анализ данных бортовых микропроцессорных систем управления показал наличие как минимум двух пиков. Например, у тепловозов серии 2ТЭ116У на Октябрьской железной дороге есть три пика – в диапазонах 18 – 25, 34 – 41 и 50 – 57 км/ч, на Приволжской – два: 42 – 49 и 58 – 65 км/ч, на Свердловской железной дороге: 26 – 31 и 68 – 73 км/ч.

Интересные данные получены авторами по работе дизель-генераторной установки тепловозов серии 2ТЭ116У за 3164 суток эксплуатации (рассмотрено 120 секций локомотивов на трех полигонах эксплуатации). Распределение времени работы по позициям ожидаемо оказалось мультимодальным (рисунок 2), но при этом ток тяговых электродвигателей оказался унимодальным (рисунок 3).

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Автоматизация процесса управления жизненным циклом локомотивов в целом и их техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) в частности позволяет инкапсулировать в программное обеспечение математические методы управления, включая вероятностно-статистические согласно теории вариабельности Эдварда Деминга.

2. При вероятностно-статистической обработке данных об эксплуатации локомотивов и их ТОиР перед принятием управляющих решений необходимо проверить данные на унимодальность как принадлежащие одному процессу. При бимодальном или мультимодальном процессе данные следует разделить на группы, добившись тем самым унимодальности.

3. Проверку на унимодальность в автоматизированных системах управления предлагается производить через проверку согласия гипотезы об унимодальном распределении как наличие

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

значимой вероятности соответствия распределения рассматриваемого параметра одному из законов распределения случайной величины. Предпочтительным является критерий согласия Колмогорова – Смирнова.

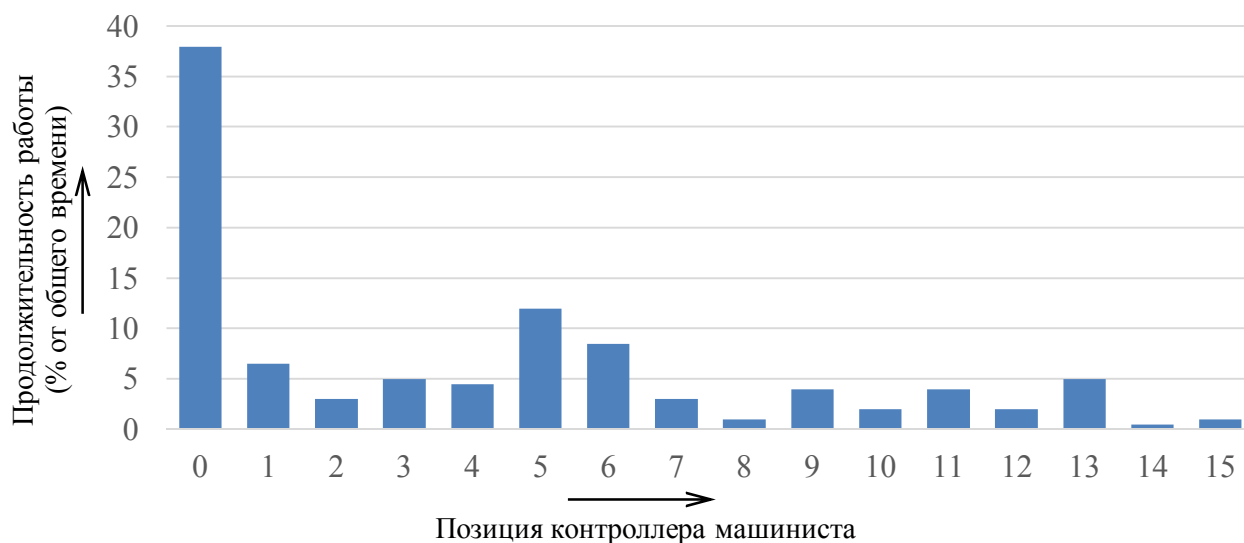


Рисунок 2 – Распределение времени работы ДГУ тепловоза по позициям

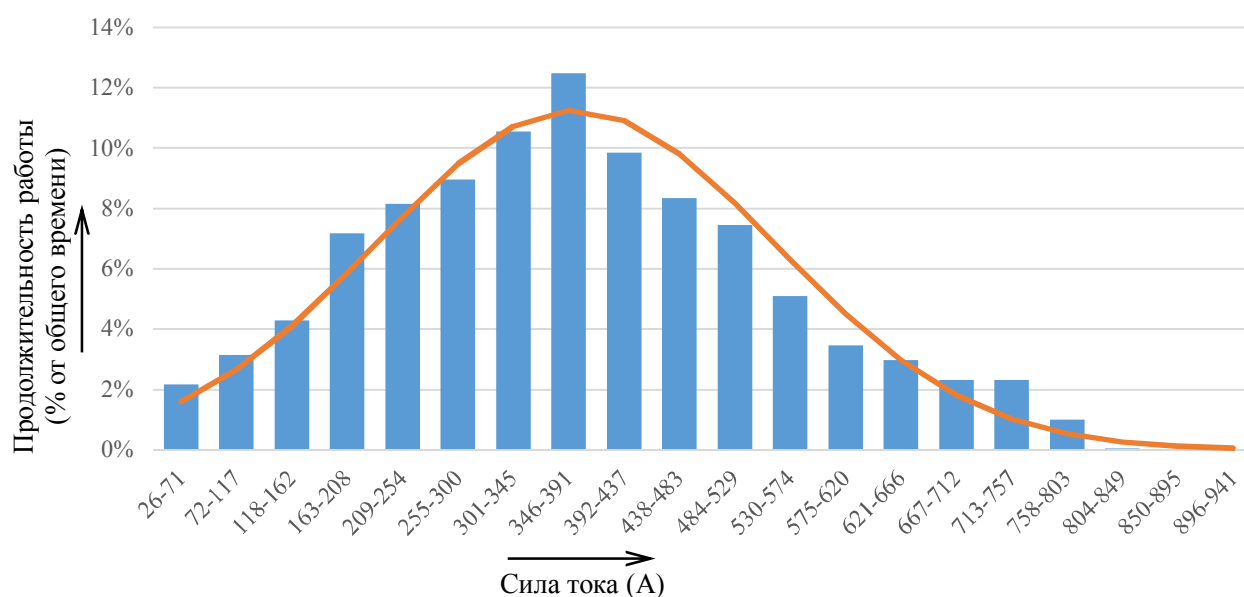


Рисунок 3 – Распределение тока ТЭД у тепловозов серии 2ТЭ116У

4. Комплексный анализ данных эксплуатации и ТОиР локомотивов показал, что унимодальностью обладают данные одной серии локомотивов одного депо приписки при участии в одном виде движения (магистральное движение, вывозная или маневровая работа): местные условия эксплуатации, весовые нормы, профиль и скоростной режим приводят к потере унимодальности при попытке обобщить данные.

5. Выявленная унимодальность тока тяговых электродвигателей (ТЭД) тепловозов позволяет учитывать этот факт при конструировании ТЭД.

Список литературы

1. Лакин, И. К. История создания систем менеджмента качества (СМК) и особенности их внедрения на железнодорожном транспорте / И. К. Лакин, В. Н. Супрун. – Красноярск :

Красноярский филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, 2006. – 92 с. – Текст : непосредственный.

2. Исаев, И. П. Комплексное управление качеством технического обслуживания и ремонта электровозов / И. П. Исаев, В. Т. Стрельников. – Москва : Транспорт, 1980. – 207 с. – Текст : непосредственный.

3. Горский, А. В. Надежность электроподвижного состава / А. В. Горский, А. А. Воробьев. – Москва : Маршрут, 2005. – 303 с. – Текст : непосредственный.

4. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Москва : Академия, 2003. – 464 с. – Текст : непосредственный.

5. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством (АСУТ) / И. К. Лакин, Ю. В. Смирнов, А. Ю. Тимченко [и др.]. – Москва : Отраслевой центр внедрения, 2002. – 516 с. – Текст : непосредственный.

6. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К. В. Липа, В. Н. Пустовой, С. Л. Лянгасов [и др.]. – Москва : ЛокоТех, 2015. – 212 с. – Текст : непосредственный.

7. Лакин, И. К. Автоматизированная система управления эксплуатационным жизненным циклом локомотивов / И. К. Лакин, И. В. Пустовой, А. А. Аболмасов. – Текст : непосредственный // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : труды всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Красноярск : ДЦВ Красноярской железной дороги, 2020. – С. 223–242.

8. Пузанков, А. Д. Управление качеством локомотивного хозяйства / А. Д. Пузанков. – Москва : Московский институт инженеров транспорта, 2009. – 262 с. – Текст : непосредственный.

9. Пустовой, И. В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пустовой Илья Владимирович. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – 183 с. – Текст : непосредственный.

10. Повышение энергетической эффективности предприятий по сервисному обслуживанию локомотивов на базе концепции «Умное предприятие» / В. Т. Черемисин, А. А. Комяков, В. В. Эрбес, В. И. Иванченко. – Текст : непосредственный // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Москва : ООО «ЛокоТех», 2018. – С. 413–417.

11. Bonadero, Adriano. Statistical methods and dynamic railway. *Ingegneria Ferroviaria*, December 2011 66(12), pp.1087 – 1107.

12. Saptarshi Ghosh, Avishek Banerjee, Naveen Sharma Sanket Agarwal, Niloy Gangul. Statistical Analysis of the Indian Railway Network: a Complex Network Approach. *Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement*, 2011, no. 2, pp.123 – 137.

References

1. Lakin I.K., Suprun V.N. *Istoriya sozdaniya sistem menedgmenta kachestva (SMK) i osobennosti ikh vnedreniya na zheleznodorozhnom transporte* [The history of quality management systems (SMK) and specificity of their application to railway transport]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk branch of Irkutsk state transport university, 2006. – 92 p. (In Russian).

2. Isayev I.P., Strelnikov V.T., *Kompleksnoe upravlenie kachestvom tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta elektrovozov* [Complex electric locomotive service and repair quality control management]. Moscow, Transport, 1980, 207 p.

3. Gorskiy A.V., Vorobyov A.A. *Nadezhnost' podvizhnogo sostava* [Electric rolling stock reliability]. Moscow: Marshrut, 2005, 303 p. (In Russian).

4. Ventzel' E.S. *Teoriya veroyatnostey i eyo tekhnicheskoe primeneniye* [Probability theory and its technical application]. Moscow, Akademiya, 2003, 464 p.

5. Lzkin I.K., Smirnov A.Yu., Timchenko and others. *Avtomaticeskaya Sistema upravleniya lokomotivnym khoziaystvom (ASUT)* [Automatic locomotive complex control system (ASUT)]. Moscow, OTsV, 2002, 516 p. (In Russian).

6. Lipa K.V., Pustovoy V.N., Lyangasov S.L., Lakin I.K., Abolmasov A.A., Lakin I.I., Melnikov V.A. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov. Teoriya i praktika.* [Locomotive technical state and operation mode monitoring. Theory and practice.] Moscow, LocoTech, 2015, 212 p. (In Russian).

7. Lakin I.K., Pustovoy V.N., Abolmasov A.A. [Automated locomotive exploitation lifecycle monitoring system]. *Ekspluatatsiya i obsluzhivanie elektronnoy i mikroprocessornoy oborudovaniya podvizhnogo sostava: trudy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsyy s mezhdunarodnym uchastiem* [Rolling stock electric and microprocessor equipment service and repair: materials of trans-Russian science and practical conference with international membership] Krasnoyarsk, KrasDTsV, 2020, pp. 223-242 (In Russian).

8. Puzankov A.D. *Upravlenie kachestvom lokomotivnoy hozyaystva* [Quality control of locomotive industry]. Moscow, Moscow state transport engineering university, 2009, 262 p.

9. Pustovoy I.V. *Razrabotka informatsionno-dinamicheskoy modeli upravleniya servisnym obsluzhivaniem i remontom lokomotivov* (Development of an informational-dynamic model of locomotive service and repair management). PhD's thesis, Omsk, OSTU, 2018, 183 p. (In Russian).

10. Cheremisin V.T. ["Smart industry" concept-based locomotive service facility improvement]. *Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Locomotive service perspectives: materials of international conference]. Moscow, LocoTech, 2018, pp. 372-376 (In Russian).

11. Bonadero, Adriano. Statistical methods and dynamic railway. *Ingegneria Ferroviaria*, December 2011 66(12), pp.1087-1107.

12. Saptarshi Ghosh, Avishek Banerjee, Naveen Sharma Sanket Agarwal, Niloy Gangul. Statistical Analysis of the Indian Railway Network: a Complex Network Approach. *Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement*, 2011, no. 2, pp.123-137.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лакин Игорь Игоревич

АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ).

Ефремова ул., д. 10, г. Москва, 119048, Российская Федерация

Кандидат технических наук, руководитель направления по техническому управлению.

Тел.: +7 (916) 383-6443.

E-mail: i.lakin@tmholding.ru

Мельников Виктор Александрович

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

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

Ассистент.

Тел.: +7 (916) 949-3161.

E-mail: Lordson@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лакин, И. И. Математические методы проверки достоверности данных о надежности локомотивов, их эксплуатации и техническом обслуживании / И. И. Лакин, В. А. Мельников. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 66 – 73.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lakin Igor Igorevich

Transmashholding LLC (TMH).

10, Yefremova st., Moscow, 119048, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, head of technical management department.

Phone.: +7 (916) 383-6443.

E-mail: i.lakin@tmholding.ru

Melnikov Viktor Aleksandrovich

Russian university of transport (MIIT).

9/9, Obraztsova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Assistant.

Phone.: +7 (916) 949-3161.

E-mail: Lordson@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lakin I.I., Melnikov V.A. Mathematical methods for reliability verification of data on reliability of locomotives, their operation and maintenance. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 66-73 (In Russian).

УДК.629.423.1

В. Н. Знаенко, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков

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

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ ШИН НА ТОКОВУЮ СИММЕТРИЮ В ВЕТВЯХ ПЛЕЧА ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА IGBT-ТРАНЗИСТОРАХ ПРИ ИХ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВКЛЮЧЕНИИ

Аннотация. Актуальным вопросом является повышение коэффициента мощности электроподвижного состава. Один из способов повышения коэффициента мощности в режимах тяги и рекуперативного торможения предложен учеными ИрГУПСа – это применение выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах с измененными алгоритмами управления. Данное решение позволяет значительно снизить потребление реактивного тока из контактной сети, увеличить пропускную способность железнодорожных участков, повысить техническую скорость, увеличить КПД тяговой системы электроснабжения, а также повысить количество возвращаемой электроэнергии в контактную сеть в режиме рекуперативного торможения. Представляет интерес исследование работоспособности данного преобразователя.

Объемы грузов, провозимых по железнодорожным магистралям Российской Федерации, продолжают увеличиваться. Одним из ключевых звеньев в обеспечении заданных темпов роста тонна-километровой работы является наличие мощного тягового подвижного состава, оборудованного соответствующим тяговым приводом.

Мощный тяговый привод характеризуется значительным потреблением тока. Чтобы обеспечить его протекание по плечам преобразователя, применяется параллельное соединение силовых полупроводниковых приборов. Для современных преобразователей электровозов в плече используют четыре параллельные ветви силовых ключей.

Особенности параллельной работы ветвей плеча сказываются на работоспособности преобразователя на IGBT-транзисторах. В данной статье предлагается рассмотреть одну из таких особенностей, а именно влияние паразитных индуктивностей на распределение токов по параллельным ветвям преобразователя в зависимости от точки подключения силовой шины переменного тока.

Исследование проведено с помощью программного комплекса Matlab Simulink. В статье рассмотрены различные варианты топологии соединения силовых шин и представлены диаграммы распределения токов в параллельных ветвях плеча для каждого способа подключения. Произведена оценка таких параметров, как разброс пикового тока включения ветвей плеча, время выравнивания тока в течение периода проводимости и разница по величине тока в конкретных ветвях.

Исходя из результатов исследования, а также учитывая существующие габариты для оборудования электровозов переменного тока, сделан вывод о наиболее оптимальном в применении варианте соединения силовых шин.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, параллельное соединение, IGBT, работоспособность.

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

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

INFLUENCE OF THE POWER BUS DESIGN ON THE CURRENT SYMMETRY IN THE ARM BRANCHES OF A RECTIFIER-INVERTER CONVERTER ON IGBT-TRANSISTORS IN THEIR PARALLEL CONNECTION

Abstract. An urgent issue is to increase the power factor of electric rolling stock. One of the ways to increase the power factor in the traction and regenerative braking modes was proposed by the scientists of IrGUPS - this is the use of a rectifier-inverter converter on IGBT with modified control algorithms. This solution allows to significantly reduce the consumption of reactive current from the contact network, increase the capacity of railway sections, increase the technical speed, increase the efficiency of the traction power supply system, and also increase the amount of electricity returned to the contact network in the regenerative braking mode. The study of the performance of this converter is of interest.

The transported volumes of goods on the railway lines of the Russian Federation continue to increase. One of the key links in ensuring the specified growth rates of tonne-kilometer work is the availability of powerful traction rolling stock equipped with an appropriate traction drive.

A powerful traction drive is characterized by the consumption of significant current. To ensure its flow over the arms of the converter, a parallel connection of power semiconductor devices is used. For modern converters of electric locomotives, 4 parallel branches of power switches are used in the arm.

The features of the parallel operation of the arm branches affect the performance of the converter on IGBT transistors. This article proposes to consider one of these features, namely the influence of parasitic inductances on the distribution of currents in the parallel branches of the converter, depending on the connection point of the AC power bus.

The study was carried out using the Matlab Simulink software package. The article discusses various options for the topology of connecting power buses and presents diagrams of the distribution of currents in the parallel branches of the arm for each connection method. An assessment was made of such parameters as the spread of the peak current of switching on the branches of the arm, the time of current equalization during the conduction period, and the difference in the magnitude of the current in specific branches.

Based on the results of the study, as well as taking into account the existing dimensions for the equipment of AC electric locomotives, a conclusion was made about the most optimal option for connecting power buses.

Keywords: AC electric locomotive; rectifier-inverter converter; parallel connection; IGBT; performance.

Согласно данным официального сайта ОАО «РЖД» за период январь – ноябрь 2021 г. тарифный грузооборот составил 2416,4 млрд ткм. Это на 4,2 % больше, чем за аналогичный период 2020 г. [1]. В марте 2021 г. компанией зафиксирован рост на 70 % транзитных перевозок по направлению «Китай – Европа – Китай», что является рекордным, если сравнить данные за указанный период в 2020 г. [2].

Выполнение перечисленных объемов работы и обеспечения роста показателей сложно представить без мощного тягового подвижного состава, оборудованного электроприводом, обеспечивающим требующиеся тяговые характеристики. Большинство современных электровазов переменного тока, эксплуатируемых на Восточном полигоне, оборудованы тяговыми электродвигателями (ТЭД) типа НБ-514Б либо НБ-514Е [3]. Подключение указанных ТЭД в зависимости от построения силовой схемы в настоящее время осуществляется двумя способами. Первый способ, реализуемый с конца 2019 г. на электровазах серии «Ермак» с поосным регулированием силы тяги, осуществлен по принципу индивидуального привода: каждый ТЭД подключается к отдельному каналу выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИПа). Второй вариант, реализованный на подавляющем большинстве эксплуатируемых на полигоне электровазов (ВЛ80р, ВЛ85, 2(3)ЭС5К), представлен на рисунке 1. При таком способе два двигателя, приходящиеся на одну тележку, подключаются параллельно друг другу к одному ВИПу.

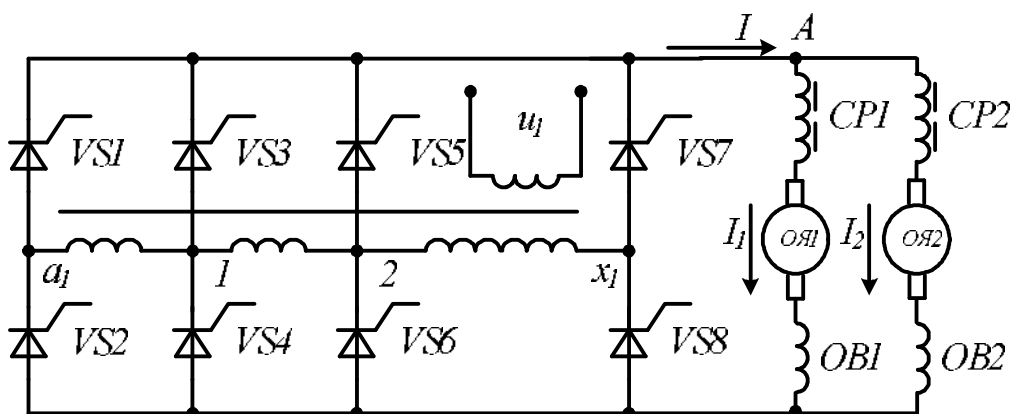


Рисунок 1 – Упрощенная принципиальная схема тележки электроваза переменного тока с тиристорным ВИПом: ТТ – тяговый трансформатор; СР – сглаживающий реактор; ОЯ – обмотка якоря ТЭД; ОВ – обмотка возбуждения ТЭД

Данное схемотехническое решение подразумевает, что ВИП должен быть рассчитан на двойной ток ТЭД. Так, для узла «А» (см. рисунок 1) справедливо выражение, составленное по первому закону Кирхгофа:

$$I - I_1 - I_2 = 0. \quad (1)$$

Исходя из токовых характеристик упомянутых тяговых электродвигателей при определенном режиме работы значение токов двигателя I_1 и I_2 может достигать 1100 А [4]. Опираясь на уравнение (1), несложно увидеть, что при данной силовой схеме ток I , протекающий по плечам преобразователя, будет равен сумме токов двух ТЭД.

Обеспечение протекания тока в плечах ВИПа без перегрузки силовых тиристоров достигается путем применения параллельного соединения полупроводников. Так, в плече ВИП-4000М для увеличения максимально возможной нагрузки по току включено параллельно четыре ветви тиристоров ТЗ53-800 – рисунок 2 [5].

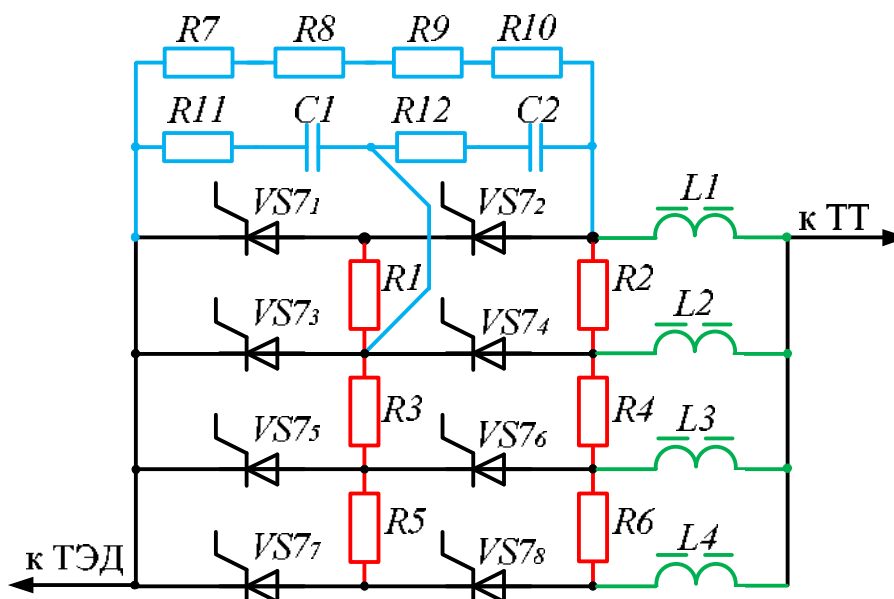


Рисунок 2 – Принципиальная схема плеча VS7 ВИП-4000М

Для обеспечения длительной работы без пробоя тиристоров по максимально возможному амплитудному значению напряжения применяют последовательное соединение полупроводниковых приборов: по два тиристора в каждой ветви плеча. Последовательное и параллельное соединения приборов приводят к усложнению конструкции всего плеча. Для выравнивания токов в параллельных ветвях в конструкцию введены реактивные делители тока $L1 - L4$. Чтобы обеспечить равное падение напряжения на последовательно включенных тиристорах, в схему включены резисторы $R1 - R6$. В каждом плече для защиты от коммутационных перенапряжений предусмотрены также снабберные сопротивления ($R7 - R10$) и RC-цепи ($R11 - R12$ и $C1 - C2$).

Насыщенность схемы плеча ответственными элементами для обеспечения его работоспособности в том числе и по протеканию тока в параллельных ветвях плеча усложняет конструкцию ВИПа и влияет на надежность преобразователя и, соответственно, локомотива в целом. Особенности параллельной работы тиристоров в плечах ВИПа были достаточно изучены в процессе разработки преобразователей и их опытной эксплуатации [6].

Современные электровозы переменного тока оборудованы тиристорными ВИПами, принципиальная силовая схема и алгоритмы работы которых остаются неизменными более 50 лет. Морально устаревшая силовая база ВИПа не способна реализовать энергоэффективные алгоритмы работы и не отвечает требованиям ГОСТ Р 55364–2012 по обеспечению коэффициента мощности электровоза переменного тока в продолжительном режиме тяги не менее 0,9 [7].

Низкий коэффициент мощности, значительная нагрузка контактного провода реактивным током, а также ряд других недостатков, ранее изложенных в работах [8 – 10], сдерживают рост качественных и количественных показателей железнодорожных перевозок. Альтернатива морально устаревшему преобразователю и алгоритмам его управления – это перспективный ВИП на базе IGBT-транзисторов с коэффициентом мощности в режиме тяги 0,95 [8 – 10].

Транзисторный преобразователь (рисунок 3) также предназначен для питания двух параллельно подключенных тяговых двигателей. Чтобы обеспечить требующуюся мощность ВИПа, в преобразователе применяется параллельное соединение силовых транзисторов. Транзисторная база преобразователя характеризуется рядом особенностей, которые влияют на параллельную работу ветвей плеча и требуют учета при его конструировании. Некоторым из этих особенностей посвящена данная статья.

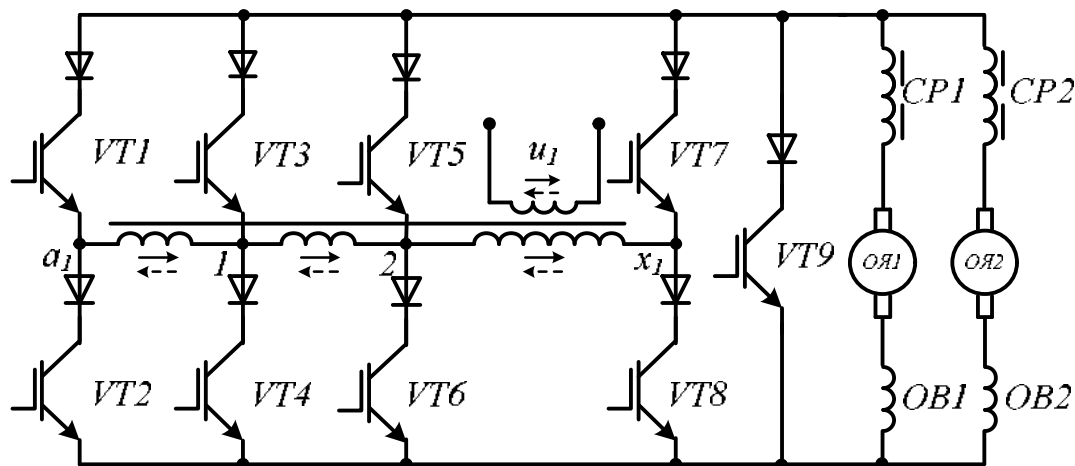


Рисунок 3 – Упрощенная принципиальная схема тележки электропоезда переменного тока с ВИПом на IGBT-транзисторах

Параллельное соединение силовых ключей используется для наращивания мощности, оно начинается еще на уровне чипа, где имеется множество IGBT-ячеек. На уровне конструирования преобразователя увеличение мощности достигается путем параллельного соединения модулей. На этом этапе наступает проблема токового небаланса в параллельных ветвях. Существует множество показателей, влияющих на баланс токов, немаловажное значение в этом списке следует уделять конструкции силовых шин, соединяющих силовые модули. Чем больше физический размер модулей IGBT-транзисторов и их сборок в комплекте с диодами, тем больше геометрическая асимметрия их соединений в плече. В связи с этим разработка топологии силовых шин является ответственным этапом проектирования преобразователей [11 – 13].

Рассмотрим отдельное плечо ВИПа на IGBT-транзисторах, принципиальная схема плеча со снабберными цепями (на схеме обозначены синим) представлена на рисунке 4.

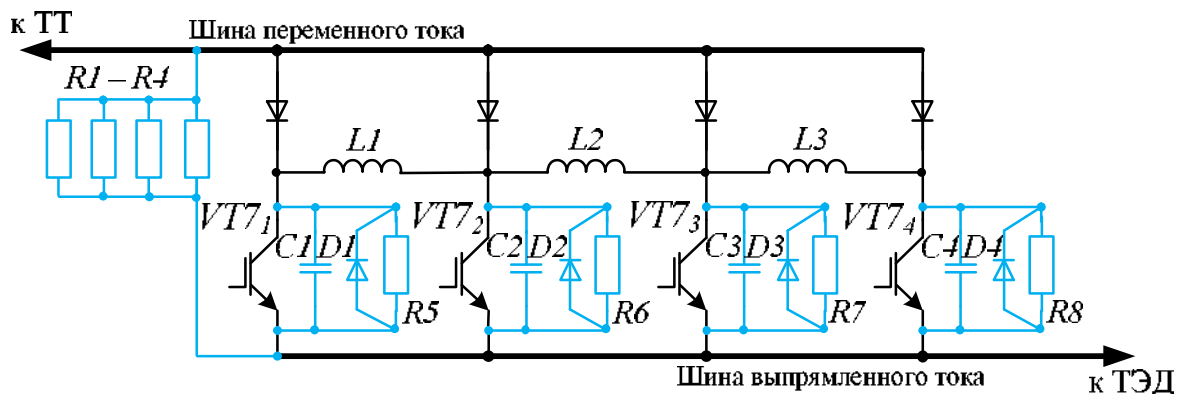


Рисунок 4 – Принципиальная схема плеча ВИПа на IGBT-транзисторах

При значительных размерах сборок транзисторного преобразователя важное значение приобретает взаимное расположение токонесущих шин. Любой реальный проводник характеризуется наличием распределенной индуктивности. В рассматриваемом плече ВИПа расстояние между силовыми выводами транзисторов, соединяющимися с токоведущими шинами, составляет 200 мм. При переоборудовании опытными образцами ВИПа на базе IGBT-транзисторов электровоза Э5К-015 на базе СЛД «Иркутское» были проведены измерения этих участков силовых шин с помощью измерителя иммитанса МНИПИ Е7-21, которые показали наличие индуктивности 0,3 мкГн. Является ли эта величина значением, оказывающим влияние на работу при различных вариантах подключения силовых шин преобразователя? Для проведения исследования предлагается рассмотреть электромагнитные процессы в ветвях плеча преобразователя на базе IGBT-транзисторов посредством математического моделирования в программном комплексе Matlab Simulink.

Исследование осуществляется с использованием математической модели системы «Тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» [14]. В данной модели сформировано четырехтранзисторное плечо преобразователя, при этом участки силовой шины представлены в виде индуктивности $L_{ш}$, в соответствии с измеренной величиной индуктивности. Для упрощения восприятия схемы плеча ВИПа на IGBT-транзисторах предложена схема замещения, состоящая из силовых ключей и паразитных индуктивностей шин. Первый вариант подключения силовых шин в плече ВИПа на IGBT-транзисторах представлен на рисунке 5, а. При таком способе силовые шины подключаются к крайним ветвям транзисторов: шина переменного тока – к коллектору транзистора VT7₁, шина постоянного тока – к эмиттеру VT7₄. Диаграмма протекания токов по параллельным ветвям плеча представлена на рисунке 5, б.

Для анализа распределения токов выбран момент включения и выключения силовых транзисторов. Время проводящего состояния ветвей соответствует существующим алгоритмам управления ВИПом на IGBT-транзисторах для 3-й, 5-й зон регулирования в режиме тяги [13]. По условиям моделирования приняты допущения о том, что сигнал управления подается одновременно на все ветви плеча, а помехи в цепях управления отсутствуют.

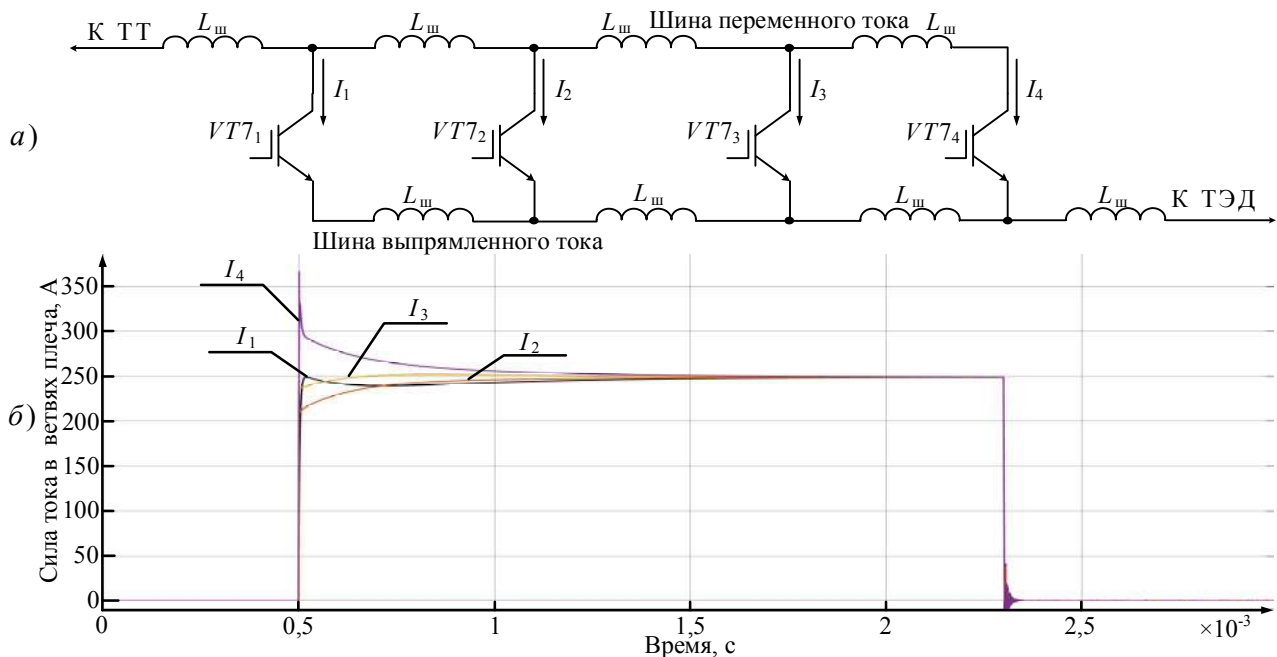


Рисунок 5 – Распределение токов по параллельным ветвям плеча при подключении силовых шин к крайним ветвям плеча преобразователя: а – упрощенная принципиальная схема подключения силовых шин; б – диаграммы протекания токов в параллельных ветвях плеча

Судя по рисунку 5, б, получено следующее: открытие всех ветвей плеча происходит одновременно, присутствует разброс по величине пикового тока включения. Максимальное значение тока включения приходится на транзистор VT7₄ и составляет более 350 А, в то время как для остальных ветвей плеча (VT7₁ – VT7₃) значение тока колеблется в диапазоне 200 – 250 А. Форма тока для внутренних ветвей VT7₂ и VT7₃ идентичная, аналогичная ситуация и для крайних ветвей плеча – VT7₁ и VT7₄. При этом менее чем за половину периода проводящего состояния ток выравнивается во всех ветвях плеча.

Транзисторы VT7₄ и VT7₁, расположенные наиболее близко к точкам подключения силовых шин, принимают пиковую нагрузку при включении и проводят больший ток, а ветви VT7₂ и VT7₃, где токовые цепи удалены от силовых шин и обладают большей индуктивностью, соответственно нагружены меньше первых. При таком режиме работы потери при включении на транзисторе VT7₄ будут выше по сравнению с остальными транзисторами плеча, однако разброс тока в параллельных ветвях плеча незначительный.

При изменении варианта подключения силовой шины переменного тока, как это показано на рисунке 6, а, с вывода коллектора крайнего левого транзистора VT7₁ на транзистор VT7₂ следует и изменение распределения токов по ветвям. Диаграммы протекания тока, полученные в результате моделирования, для следующего способа соединения представлены на рисунке 6, б.

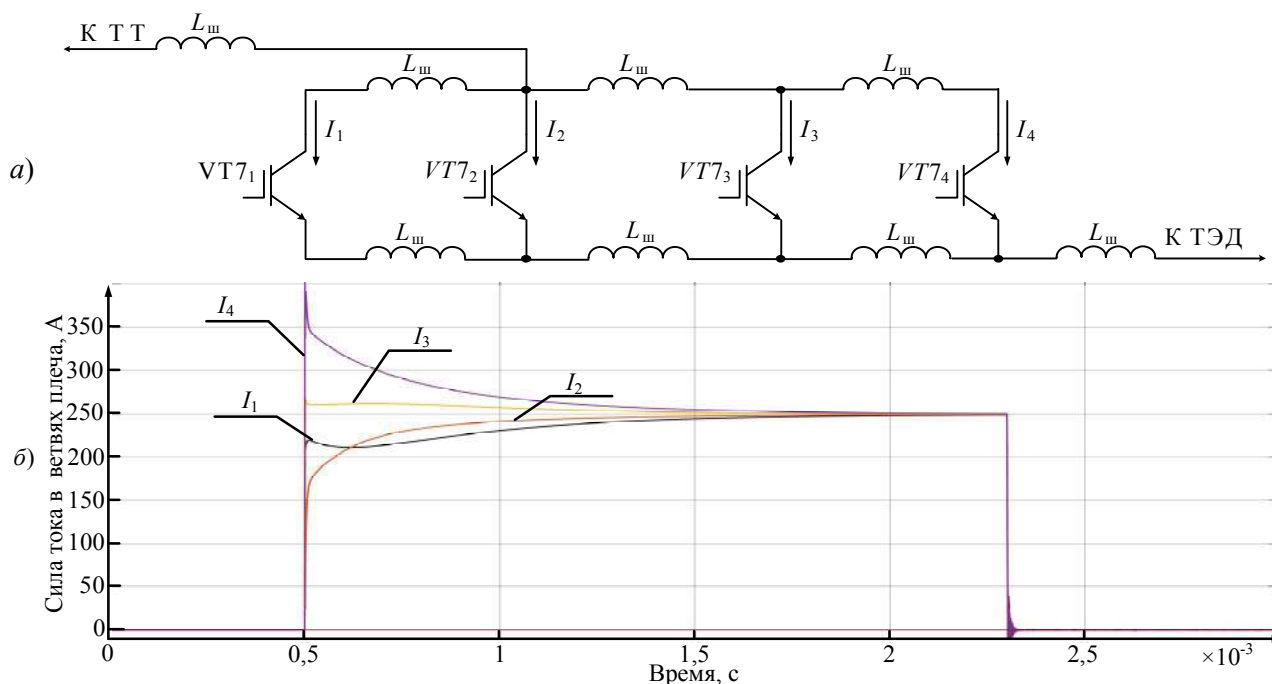


Рисунок 6 – Распределение токов по параллельным ветвям плеча при подключении шины переменного тока к транзистору VT7₂: а – упрощенная принципиальная схема подключения силовых шин; б – диаграммы протекания токов в параллельных ветвях плеча

Сдвиг шины переменного тока приводит к изменению токовых диаграмм для параллельных ветвей и к увеличению небаланса между ними. Пиковый ток включения приходится на ветвь VT7₄, причем его величина практически в два раза превышает ток включения VT7₁. Номинальная величина тока протекает по VT7₃. Большую часть периода проводящего состояния VT7₂ остается недогруженным по току. По всем ветвям ток выравнивается в течение 1,2 – 1,3 мс.

Вариант такого распределения токов в параллельных ветвях нельзя назвать удовлетворительным, так как в перспективе эксплуатации он может привести к выходу из строя преимущественно перегруженных ветвей, после чего – к пробую плеча в целом.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Следующий вариант подключения представлен на рисунке 7, а: шина переменного тока подключается к коллектору VT7₃. Диаграммы распределения токов в ветвях представлены на рисунке 7, б.

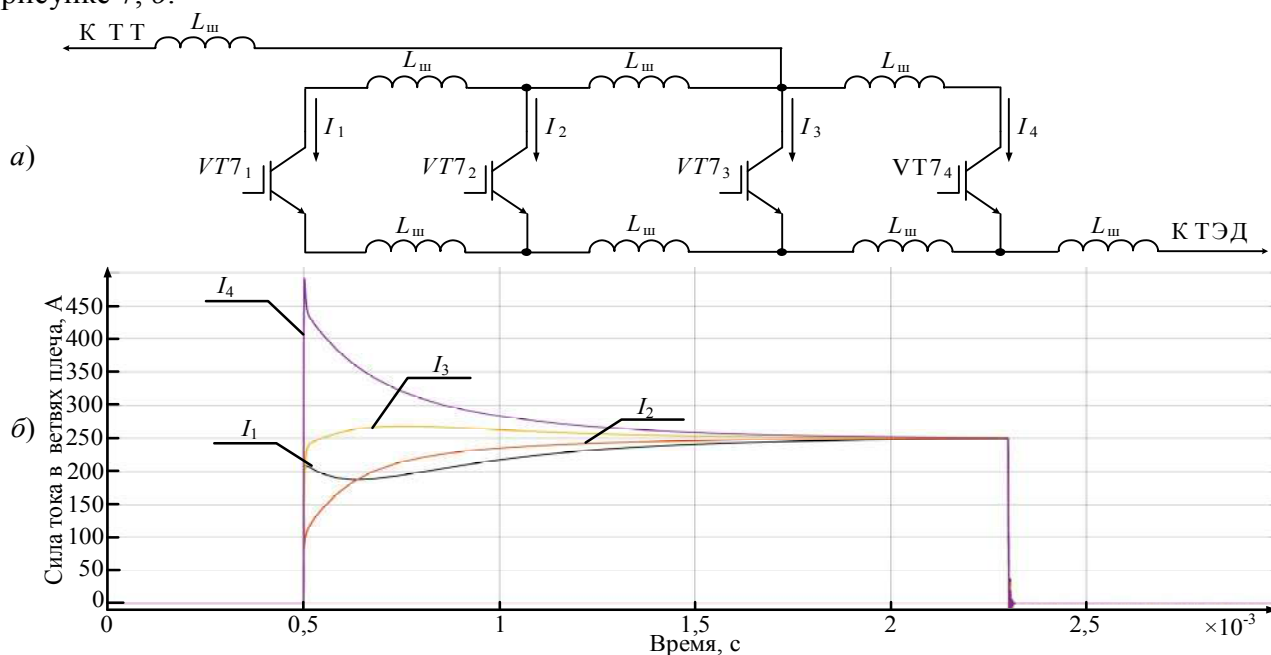


Рисунок 7 – Распределение токов по параллельным ветвям плеча при подключении шины переменного тока к транзистору VT7₃: а – упрощенная принципиальная схема подключения силовых шин; б – диаграммы протекания токов в параллельных ветвях плеча

При таком варианте расположения шин пиковый ток включения приходится на транзистор VT7₄, причем его величина в два раза превышает номинальное значение. Выравнивание токов в ветвях наблюдается только в конце периода проводящего состояния. Ток в ветвях VT7₁ – VT7₃ имеет между собой незначительный разброс (около 50 А), в целом близок к номинальному. Если сравнивать с предыдущим опытом, где силовые шины подключаются к крайним ветвям транзисторов, получено, что смещение шины переменного тока привело к увеличению индуктивности в токовой цепи VT7₂, и, как следствие, уменьшился ток в данной ветви. Для VT7₄ токовая цепь сократилась, соответственно ток в ней увеличился.

Аналогично с вариантом подключения, представленным на рисунке 6, а, такой вид соединения не может обеспечить надежной работы плеча преобразователя по причине значительной неравномерности распределения токов в ветвях. Повышенная нагрузка на плечо VT7₄ продолжительное время приведет к прожогу ветви и последующему пробоем плеча.

Рассмотрим диаграммы протекания токов в параллельных ветвях плеча при включении силовых шин к крайнему транзистору (рисунок 8).

Из полученной диаграммы можем наблюдать следующее: транзистор VT7₄ при включении в работу принимает максимальный ток, в два раза превышающий суммарный ток остальных ветвей плеча. Ток транзистора VT7₄ плавно снижается в течение токопроводящего периода по мере принятия части нагрузки соседними параллельными ветвями VT7₁ – VT7₃, но при этом остается максимальным по отношению к другим ветвям плеча. За период управления плечом токи в ветвях не выравниваются. Величина тока по ветвям VT7₁ – VT7₃ имеет более значительный разброс по сравнению с предыдущими опытами. Выравнивание тока в ветвях происходит лишь в конце периода проводящего состояния. Очевидно, что даже для номинального режима рассматриваемой зоны регулирования ток по крайнему плечу при непродолжительной работе может привести к перегрузке этой ветви с последующим ее отказом.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Анализ приведенных на рисунках 5 – 8 диаграмм показывает, как может повлиять на распределение токов топология соединения силовых шин, обладающих незначительной индуктивностью. Самым оптимальным вариантом считается симметричное расположение силовых транзисторов, вследствие которого обеспечивается одинаковое удаление от силовых шин, равная индуктивность и идеальное распределение токов по параллельным ветвям. Такой вариант представлен на рисунке 9, где при перечисленных условиях диаграммы токов сливаются в одну кривую без всплесков при включении плеча.

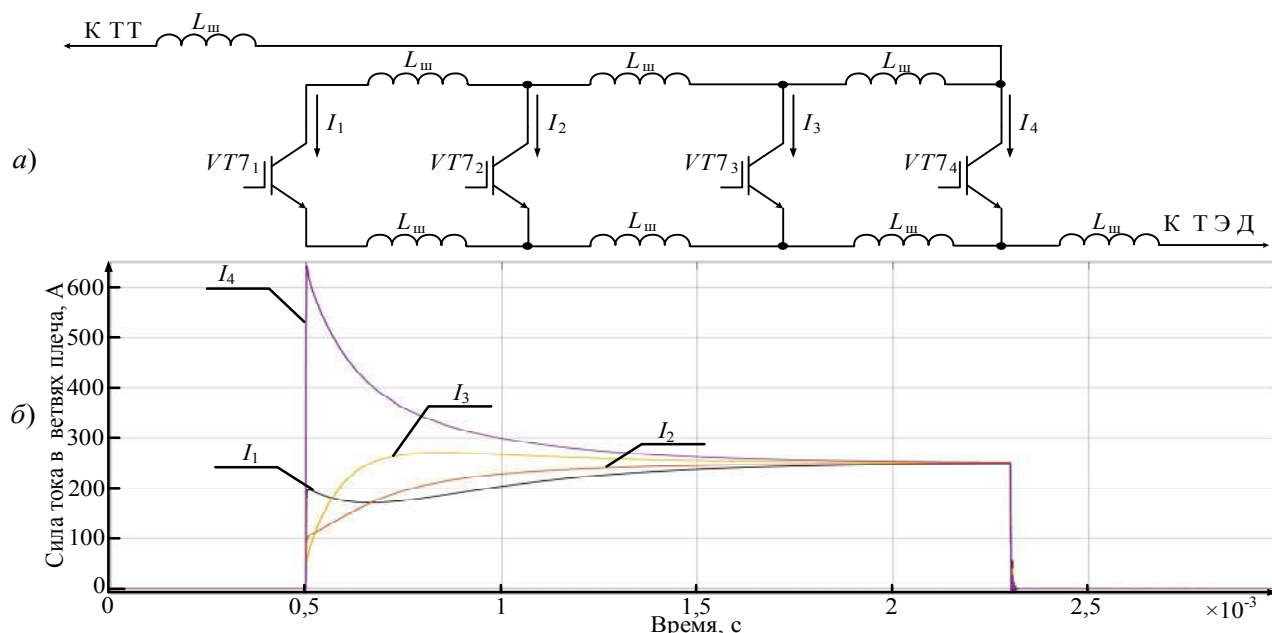


Рисунок 8 – Распределение токов по параллельным ветвям плеча при подключении силовых шин к крайнему транзистору: *а* – упрощенная принципиальная схема подключения силовых шин; *б* – диаграммы протекания токов в параллельных ветвях плеча

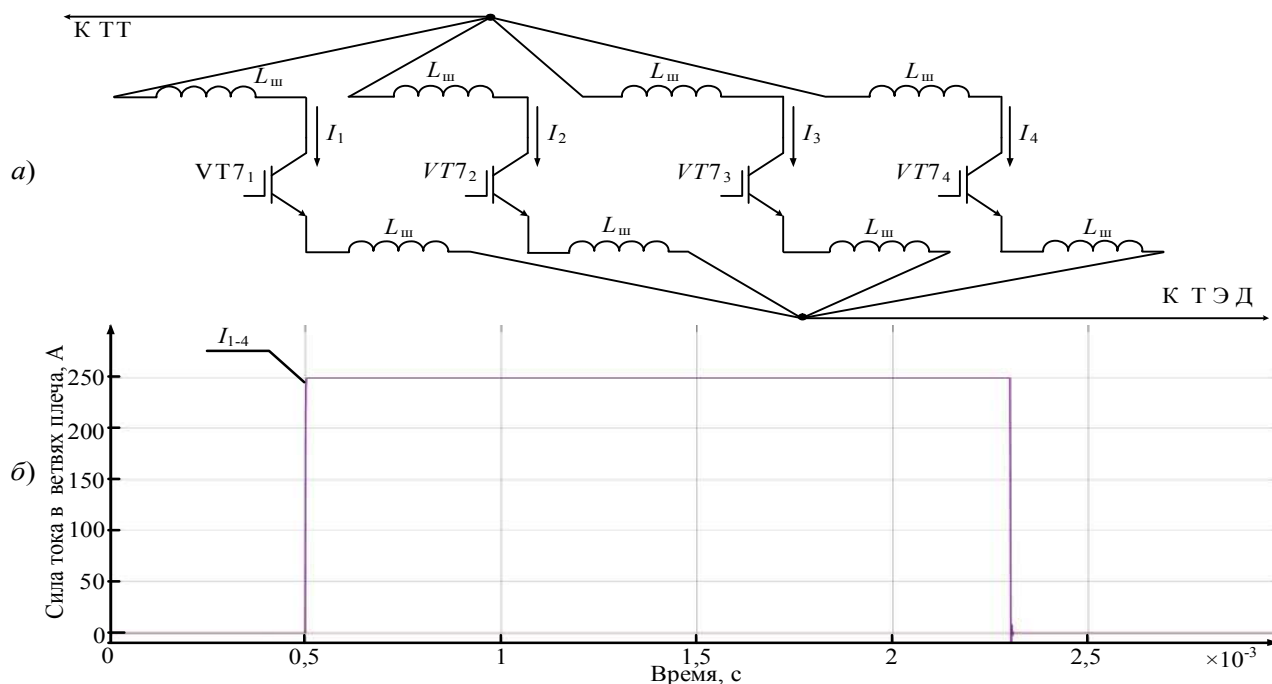


Рисунок 9 – Распределение токов по параллельным ветвям плеча при симметричном подключении силовых шин к транзисторам: *а* – упрощенная принципиальная схема подключения силовых шин; *б* – диаграммы протекания токов в параллельных ветвях плеча

Представленный вариант наиболее приемлем при проектировании преобразователей на силовых транзисторах. Однако, говоря о преобразователе для электроподвижного состава, необходимо учитывать особенности работы и требования к существующим габаритам. Пространство внутри электровоза ограничено, а сами сборки на IGBT-транзисторах в комплекте с диодом и радиаторами охлаждения представляют собой массивную конструкцию, что в свою очередь вводит ограничения по вариантам компоновки в установленном пространстве. Необходимо отметить также, что требуется соблюдение и других немаловажных факторов при проектировании преобразователя, решающую роль среди которых играет условие равномерного охлаждения параллельных модулей в плече.

Индуктивные делители в конструкции ВИПа на базе IGBT-транзисторов не предусмотрены, так как введение дополнительной индуктивности в цепь транзисторов усложняет условия коммутации и ведет к снижению коэффициента мощности, при том что индуктивные делители не способствуют компенсации небаланса тока по параллельным ветвям в плече ВИПа на базе IGBT-транзисторов. Помимо этого применение индуктивных делителей привело бы к удорожанию и усложнению конструкции с одновременным выходом за рамки допустимых габаритов ВИПа.

При принятых допущениях моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Паразитные параметры цепей и элементов системы плеча ВИПа, а следовательно, и ее конструкция оказывают значительное влияние на распределение токов параллельно включенных модулей.

2. Пространственное расположение отдельных компонентов относительно друг друга и образующиеся индуктивные связи влияют на распределение токов по параллельным ветвям плеча ВИПа.

3. Чем симметричнее соединение, тем лучше баланс токов в параллельных ветвях плеча ВИПа.

4. Для того чтобы разработать оптимальные технические решения необходимо провести ряд испытаний конструкции плеча ВИПа на реальном электровозе с учетом параметров всех силовых шин.

Работа выполнена в рамках государственного задания по государственной работе «Проведение прикладных научных исследований» на 2022 год по теме «Разработка математических моделей электрической части электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения и энергосберегающих алгоритмов управления его преобразователями с применением диодно-транзисторного разрядного плеча» №121050600025-2 от 06.05.2021.

Список литературы

1. РЖД в цифрах. – rzd.ru : сайт. – Текст: электронный – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377> (дата обращения: 20.01.2022).

2. Абдримова, М. Рекордный транзит. В ОАО «РЖД» фиксируют рост объемов перевозок по Новому шелковому пути / М. Абдримова. – Текст: электронный – URL: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1558260/> (дата обращения: 15.02.2022).

3. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К) : Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы. ИДМБ.661142.009.РЭ1. – Новочеркасск : ВЭЛНИИ, 2005. – 252 с. – Текст : непосредственный.

4. Правила тяговых расчетов для поездной работы: Распоряжение ОАО «РЖД» № 867р от 12.05.2016 // <https://docs.cntd.ru/>: Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200079084> (дата обращения: 20.12.2021).

5. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К): Руководство по эксплуатации. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи. ИДМБ.661142.009.РЭ5. – Новочеркасск : ВЭЛНИИ, 2005. – 125 с. – Текст : непосредственный.

6. Капустин, Л. Д. Надежность и эффективность электровозов ВЛ80р в эксплуатации / Л. Д. Капустин, А. С. Копанев, А. Л. Лозановский. – Москва : Транспорт, 1986. – 240 с. – Текст : непосредственный.

7. ГОСТ Р 55364–2012. Электровозы. Общие технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 36 с. – Текст : непосредственный.
8. Мельниченко, О. В. Разработка нового энергосберегающего алгоритма управления ВИП электровоза на IGBT-модулях / О. В. Мельниченко, Д. А. Яговкин, А. Ю. Портной. – Текст : непосредственный // Вестник института тяги и подвижного состава : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. А. Е. Стецюка и Ю. А. Гамоли. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2013. – Вып. 9. – С. 17–24.
9. Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режиме тяги / О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, Д. А. Яговкин, С. Г. Шрамко. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 3. – С. 46–51.
10. Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока / В. С. Томилов, О. В. Мельниченко, С. Г. Шрамко, С. А. Богинский. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 65. – № 1. – С. 172–182. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).172–182.
11. Колпаков, А. Особенности параллельного соединения модулей IGBT / А. Колпаков. – Текст : непосредственный // Компоненты и технологии. – 2008. – Вып. 8. – С. 134–139.
12. Проблемы параллельного и последовательного соединения IGBT. Часть 1. Параллельная работа IGBT / В. Арндт, А. Винтрих, У. Николаи [и др.]. – Текст : непосредственный // Силовая электроника. – 2013. – Вып. 4. – С. 67–74.
13. Хофштоттер, Н. Параллельная работа IGBT при различных способах управления затворами / Н. Хофштоттер, Й. Ламп, А. Колпаков. – Текст : непосредственный // Силовая электроника. – 2017. – Вып. 4. – С. 12–23.
14. Яговкин, Д. А. Разработка математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока и его блока управления в режиме тяги / Д. А. Яговкин. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – Вып. 47. – С. 197–202.

References

1. RZHD v tsifrakh [Russian Railways in numbers]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9377> (accessed 20 January 2022).
2. Abdrimova M. Record transit. Russian Railways OJSC records an increase in traffic volumes along the New Silk Road [Rekordnyy tranzit. V OAO «RZHD» fiksiruyut rost ob'yomov perevozok po Novomu sholkovomu puti]. Available at: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1558260/> (accessed 15 February 2022).
3. *Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K): Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 1. Opisaniye i rabota. Elektricheskiye skhemy* (Main electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Manual. Book 1. Description and work. Electrical circuits.). Novocherkassk: VELNII Publ., 2005, 252 p. (In Russian).
4. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty : Rasporyazheniye OAO «RZHD» № 867r ot 12.05.2016 (Rules of traction calculations for train work: Order of JSC "Russian Railways" No. 867r dated 12.05.2016), Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200079084> (accessed 20 December 2021).
5. *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. (In Russian).
6. Kapustin L.D., Kopanov A.S., Lozanovsky A.L. Nadezhnost' i effektivnost' elektrovov VL80r v ekspluatatsii [Reliability and efficiency of VL80r electric locomotives in operation]. Moscow: Transport Publ., 1986, 240 p. (In Russian).
7. National Standard 55364-2013. Electric locomotives. General technical requirements. Moscow, Standardinform Publ., 2013, 36 p. (In Russian).

8. Mel'nichenko O.V., Yagovkin D.A., Portnoi A.Yu. Razrabotka novogo energosberegayushchego algoritma upravleniya VIP elektrovoza na IGBT modulyakh [Development of a new energy-saving control algorithm of the reversible converter of the electric locomotive using IGBT modules]. Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava: mezhvuz. sb. nauch. tr. [Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock: Interuniversity proc.]. In Stetsyuk A.E. and Gamolya Yu.A. (eds.) DVGUPS Publ., 2013, Iss. 9, pp. 17-24 (In Russian).

9. Mel'nichenko O.V., Portnoi A.Yu., Yagovkin D.A., Shramko S.G. Novyi vypryamitel'no-invertornyi preobrazovatel' dlya tyagovogo podvizhnogo sostava peremennogo toka s povyshennymi energeticheskimi kharakteristikami v rezhime tyagi [New reversible converter for traction rolling stock of alternating current with increased energy characteristics in traction mode]. Nauka i tekhnika transporta [Science and technology of transport], 2014, no. 3, pp. 46-51 (In Russian).

10. Tomilov V.S., Mel'nichenko O.V., Shramko S.G., Boginskii S.A. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti raboty elektrovozov peremennogo toka [AC-fed electric locomotives energy performance increase]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, vol. 65, no. 1, pp. 172-182 (In Russian).

11. Kolpakov A. Features of parallel connection of IGBT modules. *Komponenty i tekhnologii – Components and technologies*, 2008, Issue 8, pp. 134-139 (In Russian).

12. Arendt V., Vintrich A., Nicolai U., Tursky V., Reiman T., Kolpakov A., Kartashov E. Problems of parallel and serial connection of IGBT. Part 1. IGBT parallel work. *Silovaya elektronika – Power electronics*, 2013, Issue 4, pp. 67-74 (In Russian).

13. Hofstotter N., Lamp J., Kolpakov A. Parallel operation of IGBT with different gate control methods. *Silovaya elektronika – Power electronics*, 2017, Issue 4, pp. 12-23 (In Russian).

14. Yagovkin D.A. Development of a mathematical model of a rectifier-inverter converter based on igbt transistors for an alternating current electric locomotive and its control unit in traction mode. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2015, Issue 47, pp. 197-202 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Знаенко Вячеслав Николаевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-950-126-23-70.

E-mail: znaenock@yandex.ru

Мельниченко Олег Валерьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-902-170-24-37.

E-mail: olegmelnval@mail.ru

Линьков Алексей Олегович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-924-709-52-99.

E-mail: linkovalex@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Znaenok Vyacheslav Nikolaevich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

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

Postgraduate student of the department «Electric rolling stock».

Phone: 8-950-126-23-70

E-mail: znaenock@yandex.ru

Melnichenko Oleg Valerevich

Irkutsk State Transport University.

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

Doctor of Sciences in Engineering, head of the department of Electric Rolling Stock.

Phone: 8-902-170-24-37.

E-mail: olegmelnval@mail.ru

Linkov Alexey Olegovich

Irkutsk State Transport University (IrSTU).

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

Ph. D in Engineering, associate professor of the department of Electric Rolling Stock.

Phone: 8-924-709-52-99.

E-mail: linkovalex@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Знаенко, В. Н. Влияние конструкции силовых шин на токовую симметрию в ветвях плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах при их параллельном включении / В. Н. Знаенко, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 74 – 85.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Znaenok V.N., Melnichenko O.V., Linkov A.O. Influence of the design of power buses on the current symmetry in the branches of the arm of the rectifier-inverter converter on IGBT transistors when they are connected in parallel. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 2 (50), pp. 74-85 (In Russian).

УДК 629.4:519.246.8

С. О. Подгорная, Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов

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

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. Существенная доля расходов ОАО «РЖД» приходится на закупку дизельного топлива и электрической энергии на тягу поездов. В связи с этим особую важность приобретает задача обеспечения рационального потребления энергоресурсов. Ее решение невозможно без четко отлаженной системы планирования и прогнозирования показателей энергетической эффективности локомотивов. В статье предложен метод прогнозирования удельного расхода энергии (УРЭ) на тягу поездов, основанный на определении прогнозных значений перевозочной работы и расхода топливно-энергетических ресурсов методом экстраполяции временных рядов, который заключается в распространении тенденций изменения величин, установленных в прошлом, на будущий период. Отличительными особенностями разработанного метода являются определение индексов сезонности и учет ритмичности изменения показателей. В случаях, если прогнозный период включает в себя месяцы первого или четвертого кварталов, предложена формула для определения прогнозного значения УРЭ с учетом влияния температуры атмосферного воздуха. Выполненные расчеты показали, что применение предложенного метода для структурных подразделений с разным объемом и характером перевозочной работы и уровнем УРЭ обеспечивает достаточно высокую точность прогнозирования энергозатрат на тягу поездов. Метод включен в состав разработанной в ОмГУПСе Методики анализа и прогнозирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, внедренной на сети железных дорог Российской Федерации.

Ключевые слова: топливно-энергетические ресурсы, перевозочная работа, удельный расход энергии, прогнозирование, математическая модель, экстраполяция, временный тренд.

Svetlana O. Podgornaya, Elena A. Sidorova, Alexey I. Davydov

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

PREDICTION OF ENERGY EFFICIENCY INDICATOR FOR LOCOMOTIVES

Abstract. A significant share of JSCo «Russian Railways» expenses falls on the purchase of diesel fuel and electric power for train traction. In this connection, the task of ensuring rational consumption of energy resources acquires special importance. Its solution is impossible without a well-functioning system for planning and forecasting the energy efficiency of locomotives. The article proposes a method for predicting specific energy consumption (SEC) for train traction, based on determining predicted values of transportation work and fuel and energy resources consumption by extrapolating time series, which consists in spreading the trends in changes in the values established in the past to the future period. A distinctive features of the developed method is the determination of seasonality indices and consideration of the rhythm of changes in the indicators. In cases where the forecast period includes months of the first or fourth quarters, a formula is proposed for determining the forecast value of the SEC, taking into account the influence of the atmospheric air temperature. The calculations performed showed that the application of the proposed method for structural divisions with different volume and nature of transportation work and the level of the SEC ensures a sufficiently high accuracy of train traction energy cost forecasting. The method is included in the Methodology for Analysis and Prediction of Fuel and Energy Resources Consumption for Traction of Trains developed by OmGUPS and implemented in the railroad network of the Russian Federation.

Keywords: fuel and energy resources, transportation work, specific energy consumption, forecasting, mathematical model, extrapolation, time trend.

В связи с постоянным ростом стоимости топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) проблема их эффективного использования во всех сферах производственной деятельности имеет особую остроту. Одной из наиболее существенных статей расходов ОАО «РЖД» является закупка дизельного топлива и электрической энергии на тягу поездов. На эти цели ежегодно затрачивается более 100 млрд рублей. Энергоэффективность перевозочного процесса определяется удельным расходом энергии (УРЭ) на единицу выполняемой работы [1]. Среди важнейших мер, ориентированных на рациональное потребление ТЭР, – четко отлаженная, научно обоснованная система планирования, нормирования, учета и анализа УРЭ.

Расчет плановых значений УРЭ в разных видах движения и в целом по структурным подразделениям железнодорожного транспорта производится на основе технически обоснованных норм энергозатрат с учетом ожидаемых значений различных эксплуатационных факторов – средней массы поезда, средней технической скорости движения, нагрузки на ось грузового вагона и др. При выполнении перевозочного процесса фактические значения показателей могут отличаться от запланированных. Для решения задачи эффективного управления ресурсами на предприятии любого уровня необходимо учесть эти отличия, в связи с чем возникает необходимость качественного прогнозирования показателей энергопотребления с целью объективной корректировки их плановых значений.

Для прогнозирования показателей энергоэффективности на сети железных дорог используют разные методы, однако они не всегда обеспечивают достаточную точность. В некоторых случаях для прогнозирования УРЭ применяют модели множественной линейной регрессии, причем для разных видов движения виды математической модели различаются. Результаты исследований авторов статьи по прогнозированию УРЭ при помощи регрессионных моделей представлены в работе [2]. При этом рассматривались такие влияющие на УРЭ факторы, как средняя масса грузового поезда, средняя техническая скорость движения, коэффициент участковой скорости, средняя нагрузка на ось грузового вагона, доля порожнего пробега грузовых вагонов, количество остановок поездов, среднемесячная температура атмосферного воздуха и др. Все показатели проверялись на соответствие нормальному закону распределения. Оценка адекватности предложенных моделей при помощи F -критерия Фишера показала, что все рассматриваемые зависимости адекватны. Статистическая значимость коэффициентов регрессии полученных моделей выполнена с помощью t -критерия Стьюдента [3], в результате было выявлено, что некоторые коэффициенты регрессии не являются статистически значимыми. Согласно положениям математической статистики при адекватности математической модели, но присутствии в ней отдельных статистически незначимых коэффициентов она может быть пригодна для принятия некоторых решений, но не для прогнозирования. Анализ значений коэффициентов детерминации полученных регрессионных зависимостей по всем железным дорогам Российской Федерации за несколько лет показал, что в 10 % случаев они имеют низкие значения, что не позволяет обеспечить достаточную точность прогнозирования УРЭ при их применении. Попытка исключить из моделей факторы, регрессионные коэффициенты для которых не являются статистически значимыми, не привела к улучшению результатов.

С учетом того, что полученные результаты оказались неоднозначными (точность и надежность прогнозирования УРЭ в ряде случаев невысокая), проведен ряд дополнительных исследований по формированию регрессионных моделей, в состав которых включены не только качественные показатели использования локомотивов, но и такие факторы, как рабочий и эксплуатируемый парк локомотивов, а также различные их комбинации. Однако это также не привело к повышению точности прогнозирования УРЭ. Следует отметить, что одной из основных проблем при применении регрессионных моделей для прогнозирования УРЭ на тягу поездов является необходимость определения прогнозных значений входящих в них эксплуатационных показателей. В связи с этим возникает задача поиска других путей обеспечения качественного прогнозирования УРЭ.

Показатели энергопотребления зависят от объема перевозочной работы, для прогнозирования которого авторами статьи предложено применять метод экстраполяции временных рядов, заключающийся в распространении тенденций, установленных в прошлом, на будущий период [4]. Временной ряд представляет собой последовательно измеренные через некоторые промежутки времени данные. Основная тенденция изменения значений временного ряда называется временным трендом (далее – тренд) [5]. Построение трендов объемов перевозочной работы в каждом виде движения основано на выполнении ретроспективного анализа динамики их изменения по единицам времени, составляющим прогнозный период – отрезок времени, на который выполняется прогнозирование (в общем случае он равен плановому периоду). По сложившейся практике, если длительность прогнозного периода не превышает одного месяца, то единицей времени прогнозирования являются сутки, в остальных случаях – месяц. При определении тренда используются данные об объемах выполненной работы за базовый период, в который включаются соответствующие данные за прошлый календарный год, предшествующий прогнозируемому, а также могут включаться данные за предыдущие годы в случае, если в них не было существенного изменения характера перевозочного процесса относительно прошлого года. Прогнозирование выполняется при условии, что от начала прогнозного периода прошло: при прогнозировании на месяц – не менее 15 дней, при прогнозировании на квартал – не менее двух месяцев, при прогнозировании на год – не менее шести месяцев (далее – прошедшая часть прогнозного периода). Схематично временные периоды приведены на рисунке 1.

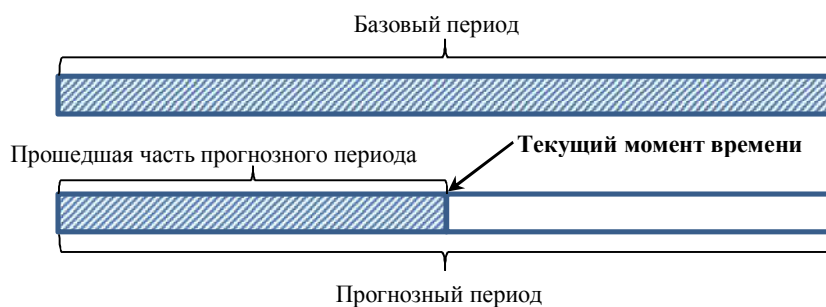


Рисунок 1 – Наименования периодов времени при прогнозировании

Для построения тренда объемов перевозочной работы предложен алгоритм, графическая схема которого представлена на рисунке 2.

С целью определения тенденции изменения объемов перевозочной работы и нивелирования случайных «выбросов» значений данные об объемах работы за одинаковые календарные единицы времени в наборах данных за однотипные календарные периоды, аналогичные прогнозируемому периоду (далее – однотипный набор данных), осредняются. В этом случае данные в базовом периоде за каждую единицу времени представляют собой соответствующие средние значения объемов перевозочной работы из однотипных наборов данных.

Построение тренда выполняется на основе расчета индексов сезонности изменения объемов перевозочной работы (далее – индекс сезонности), которые характеризуют в процентах долю объема перевозочной работы за i -ю единицу времени относительно среднего арифметического значения этого показателя для всех рассматриваемых единиц времени.

Для выявления значений объемов перевозочной работы, нарушающих сложившуюся тенденцию, производится оценка колеблемости индексов сезонности по каждой i -й единице времени в однотипных наборах данных с помощью коэффициента вариации [6], который определяется по формуле:

$$v_i = \sqrt{\frac{\sum_j (A_{ij} - \bar{A}_i)^2}{n_i - 1}} \cdot 100, \quad (1)$$

где A_{ij} – индекс сезонности за i -ю единицу времени в j -м однотипном наборе данных, %; n_i – количество значений индексов сезонности за i -ю единицу времени; $\bar{A}_i$ – среднее значение индекса сезонности за i -ю единицу времени, %.

Если коэффициент вариации v_i превышает максимально допустимое значение $v_{\max}$, установленное на соответствующем уровне управления ОАО «РЖД», с целью повышения достоверности прогнозирования принимается решение об исключении «проблемного» значения показателя из комплекта исходных данных. Затем осредненный объем перевозочной работы определяется заново без учета исключенных значений.

Далее определяются индексы сезонности изменения осредненного объема перевозочной работы по i -й единице времени. Полученные на их основе значения представляют собой тренд изменения объемов перевозочной работы, с помощью которого осуществляется ее прогнозирование.

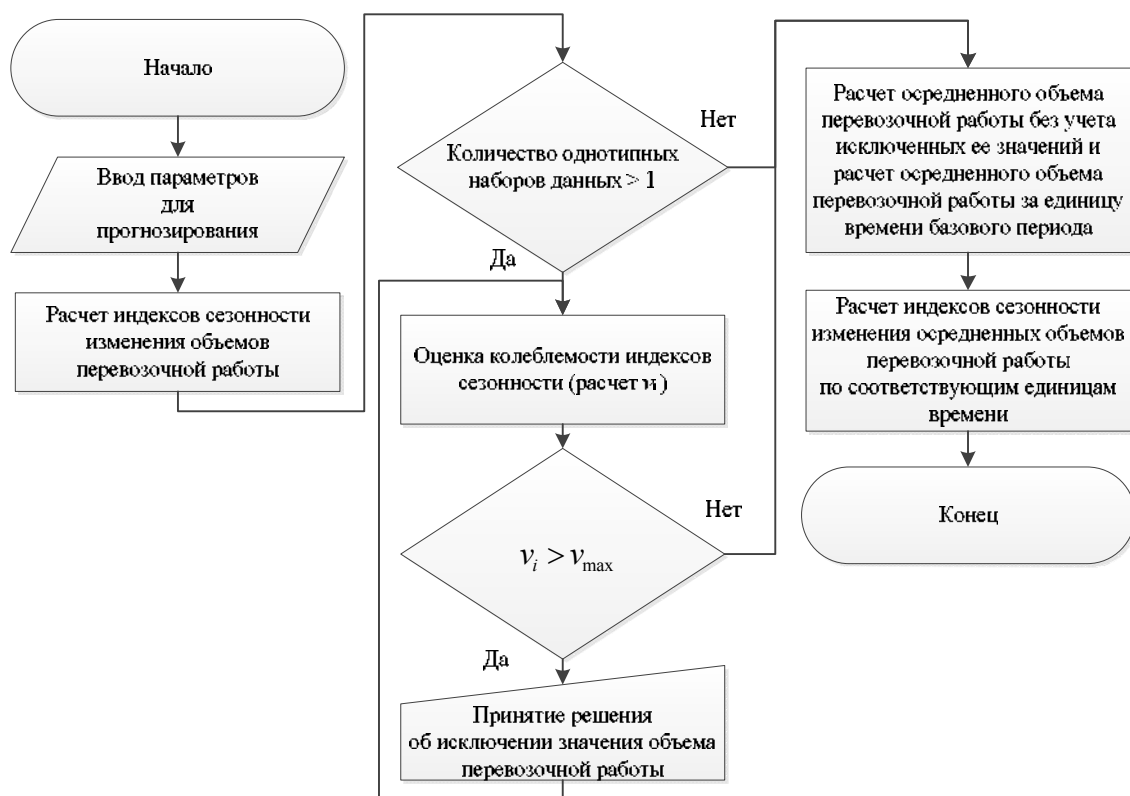


Рисунок 2 – Графическая схема алгоритма построения тренда объемов перевозочной работы

Необходимым условием для прогнозирования объемов перевозочной работы на основе тренда является наличие фактических ее значений за каждую единицу времени прошедшей части прогнозного и аналогичной ей части базового периода. Вид (сутки или месяц) и количество единиц времени в базовом и прогнозном периодах должны быть одинаковыми.

Отличительной особенностью предложенного метода прогнозирования является учет ритмичности выполнения перевозочной работы, которая характеризуется коэффициентом рит-

мичности. Этот коэффициент определяет равномерность распределения значений объемов перевозочной работы в каждом временном интервале и рассчитывается в безразмерных единицах по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^k S'_i}{\sum_{i=1}^m S'_i}, \quad (2)$$

где S'_i – индекс сезонности изменения осредненного объема работы за i -ю единицу времени базового периода, %; k – количество единиц времени в части базового периода, аналогичной прошедшей части прогнозного периода; m – количество единиц времени в базовом периоде.

Прогнозное значение объема перевозочной работы на прогнозный период в целом рассчитывается по формуле:

$$\tilde{A} = \frac{\sum_{i=1}^k A_{i \text{ ч. п.}}}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где $A_{i \text{ ч. п.}}$ – фактическое значение работы за i -ю единицу времени прошедшей части прогнозного периода, 10 тыс. т · км брутто; ε – коэффициент ритмичности работы в базовом периоде.

На основе полученного тренда перевозочной работы определяются прогнозные значения объемов перевозочной работы на каждую i -ю единицу времени оставшейся части прогнозного периода по формуле:

$$\tilde{A}_i = \frac{\tilde{A}}{m} \cdot \frac{S'_i}{100}. \quad (4)$$

С целью апробации предложенного метода определены прогнозные значения объемов перевозочной работы во всех видах движения на электрической и дизельной тяге по статистическим отчетным данным за 2018 и 2019 гг. по всем железным дорогам России. Расхождение фактических отчетных данных с соответствующими прогнозными значениями во всех случаях не превышает 5 % [4].

Так как прогнозирование объемов перевозочной работы на основе метода экстраполяции временных рядов показало хорошие результаты, применим указанный метод для прогнозирования расхода ТЭР. С этой целью обработаны данные в грузовом движении на электрической тяге для железной дороги N по месяцам за 2018 г., 2019 г. и январь – июнь 2020 г. За базовый период приняты 2018 и 2019 гг., в качестве прошедшей части прогнозного периода выступал период январь – июнь 2020 г. Прогнозирование расхода ТЭР выполнялось в начале июля на июль – декабрь 2020 г.

Оценка точности прогнозирования любого показателя осуществлялась на основе анализа расхождения соответствующих фактических и прогнозных величин по формуле:

$$\delta = \left| \frac{X_i - \tilde{X}_i}{X_i} \right| \cdot 100, \quad (5)$$

где X_i , $\tilde{X}_i$ – фактическое и прогнозное значения анализируемого показателя X за i -ю единицу времени прогнозного периода соответственно.

Прогнозные значения перевозочной работы и расхода ТЭР, полученные с помощью метода экстраполяции временных рядов, представлены в таблице 1 (выделены полужирным начертанием).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Прогнозирование объемов перевозочной работы, расхода ТЭР и УРЭ в грузовом движении на электрической тяге на железной дороге *N*

Ме- сяц	Перевозочная работа, 10 тыс. ткм брутто			Расход ТЭР, кВт · ч			УРЭ, кВт·ч/10 тыс. ткм брутто				
	прогноз	факт	δ , %	прогноз	факт	δ , %	план	прогноз	факт	δ , %	δ^* , %
1	929026	917394	1,3	104928226	105793324	0,8	112,7	110,9	115,3	4,0	2,3
2	837647	833000	0,6	93174143	94400550	1,3	111,1	109,2	113,3	3,8	2,0
3	934283	944485	1,1	111591378	110937314	0,6	120,1	117,3	117,5	0,2	2,2
4	879534	880990	0,2	97711328	96550937	1,2	108,1	109,0	109,6	0,6	1,4
5	867989	880873	1,5	94800054	95067963	0,3	108,7	107,2	107,9	0,7	0,7
6	806212	797950	1,0	88334144	87789185	0,6	109,1	107,6	110,0	2,2	0,8
7	836982	845287	1,0	93371380	93598184	0,2	112,4	109,5	110,7	1,1	1,5
8	850701	836644	1,7	93897132	92258807	1,8	109,7	108,4	110,3	1,8	0,5
9	854143	860668	0,8	96111396	95987585	0,1	107,8	110,5	111,5	0,9	3,4
10	902604	889407	1,5	99323410	98581384	0,8	109,3	108,0	110,8	2,6	1,4
11	869745	857231	1,5	99115101	97730957	1,4	114,7	111,9	114,0	1,9	0,6
12	921478	919476	0,2	108502236	109330449	0,8	120,0	115,6	118,9	2,9	0,9
В среднем за месяц	874195	871950	0,3	98404994	98168887	0,2	113,8	110,4	112,5	1,0	1,1

По окончании прогнозного периода из форм статистической отчетности ОАО «РЖД» получены фактические значения перевозочной работы и расхода ТЭР. В графах 4, 7 таблицы 1 приведены расхождения фактических и прогнозных величин δ , диапазон разброса которых для перевозочной работы составляет от 0,2 до 1,7 %, для расхода ТЭР – от 0,1 до 1,8 %.

Для обобщенной оценки качества прогнозирования по формуле (1) рассчитан коэффициент вариации, значение которого для перевозочной работы на оставшуюся часть прогнозного периода составило 1,2 %, для расхода ТЭР – 1 %. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что прогнозные значения расхода ТЭР определены с достаточно высокой точностью.

Аналогичным образом применим метод экстраполяции временных рядов (далее – метод прямого прогнозирования (ПП)) для прогнозирования УРЭ. Результаты расчетов приведены в графах 8 – 12 таблицы 1. При применении метода ПП для прогнозирования УРЭ прогнозные значения показателя существенно отличаются от фактических, а в семи месяцах из 12 оказались хуже, чем плановые. Значение коэффициента вариации на оставшуюся часть прогнозного периода составило 2 %. Диапазон разброса фактических и прогнозных значений УРЭ составил от 0,2 до 4 %, фактических и плановых значений (графа 12 таблицы 1) – от 0,5 до 3,4 %. Разброс значений при прогнозировании УРЭ в среднем в 1,6 раза больше, чем при прогнозировании тем же методом объемов перевозочной работы, т. е. качество прогнозирования УРЭ оказалось ниже. Возможно, такое различие обусловлено тем, что объем перевозочной работы, расход ТЭР и удельный расход энергоресурсов имеют разные темпы изменения, которые характеризуются цепным темпом прироста τ . Он показывает, на сколько процентов значение рассматриваемого показателя в следующем месяце отличается от его значения в предыдущем месяце [3].

Цепной темп прироста значений показателя Π рассчитывается по формуле:

$$\tau = \left(\frac{\Pi_i}{\Pi_{i-1}} - 1 \right) \cdot 100, \quad (6)$$

где Π_i , Π_{i-1} – значения показателя в текущем и предыдущем месяцах соответственно.

Изменение цепного темпа прироста объемов перевозочной работы, расхода ТЭР и УРЭ приведено на рисунке 3.

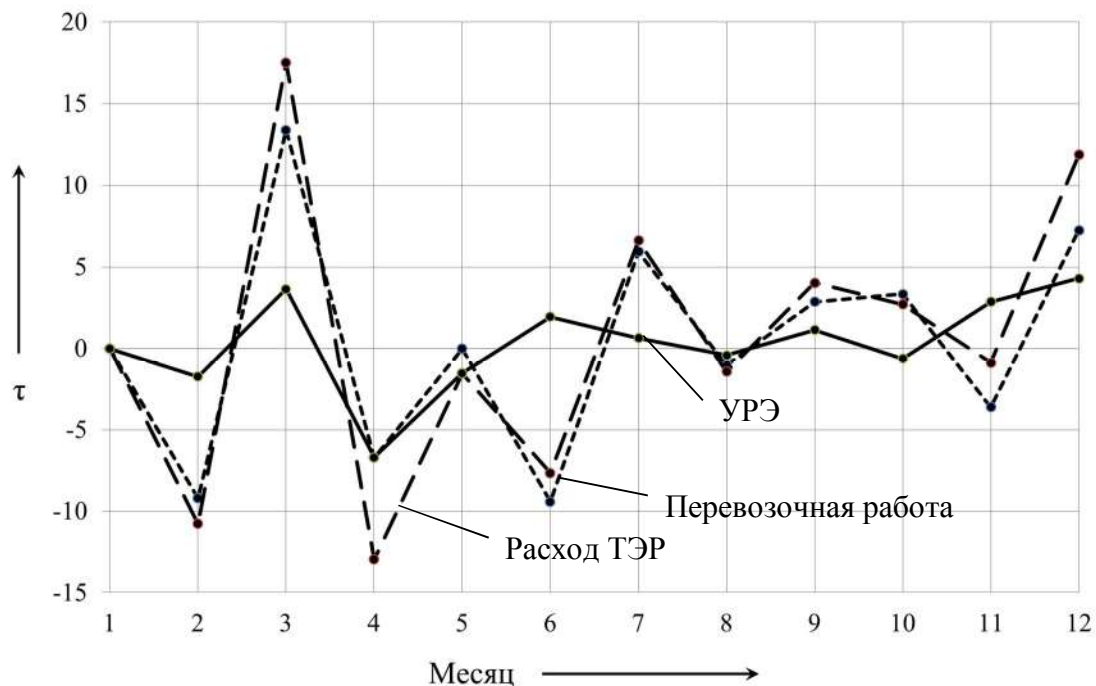


Рисунок 3 – Изменение цепного темпа прироста объемов перевозочной работы, расхода ТЭР и УРЭ на железной дороге N в 2020 г.

Как следует из рисунка 3, цепной темп прироста представленных показателей разный и колеблется в диапазоне от -13 до $17,5$ %. В отдельные месяцы τ для УРЭ находится в противофазе с цепными темпами прироста объемов перевозочной работы и расхода ТЭР вследствие изменения структуры грузопотока или условий эксплуатации. В связи с этим предложено определять прогнозные значения удельного расхода ТЭР на основе спрогнозированных методом экстраполяции временных рядов показателей выполненной работы и расхода ТЭР по традиционным формулам:

в k -м виде движения (кроме маневровой работы) –

$$\tilde{b}_k = \frac{\tilde{B}_k}{\tilde{A}_k}, \quad (7)$$

где $\tilde{B}_k$, $\tilde{A}_k$ – прогнозные значения расхода ТЭР, кВт · ч (кг), и объема перевозочной работы, 10 тыс. ткм брутто, соответственно;

на маневровой работе (МР) –

$$\tilde{b}_{\text{МР}} = \frac{100 \cdot \tilde{B}}{\tilde{L}_{\text{усл}}}, \quad (8)$$

где $\tilde{B}$, $\tilde{L}_{\text{усл}}$ – прогнозные значения расхода ТЭР, кВт · ч (кг), и условного пробега, лок. · км, на маневровой работе соответственно.

Прогнозные значения всех фигурирующих в формулах (7) и (8) показателей определяются методом экстраполяции временных рядов.

Для структурного подразделения (СП) в целом прогнозное значение УРЭ на тягу поездов можно вычислить по формуле:

$$\tilde{b}_{\text{СП}} = \frac{\sum_k \tilde{b}_k \cdot \tilde{A}_k + \tilde{b}_{\text{МР}} \cdot \frac{\tilde{L}_{\text{усл}}}{100}}{\sum_k \tilde{A}_k}. \quad (9)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Учитывая тот факт, что прогнозное значение УРЭ определяется не в результате применения ПП, а на основе спрогнозированных методом ПП показателей работы и расхода ТЭР, предложенный метод его расчета предложено называть методом косвенного прогнозирования (КП). Для апробации метода КП выполнен расчет прогнозных значений УРЭ в грузовом движении на электрической тяге на железной дороге *N* на июль – декабрь 2020 г. на основе данных по месяцам за 2018, 2019 гг. и январь – июнь 2020 г. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Прогнозирование УРЭ в грузовом движении на электрической тяге на железной дороге *N*

Месяц	Прогноз			Фактический УРЭ, кВт · ч/10 тыс. ткм брутто	δ , %	Плановый УРЭ, кВт · ч/10 тыс. ткм брутто	δ^* , %
	работа, 10 тыс. ткм брутто	расход ТЭР, кВт · ч	УРЭ, кВт · ч/10 тыс. ткм брутто				
1	929026	104928226	112,9	115,3	2,1	112,7	2,3
2	837647	93174143	111,2	113,3	1,8	111,1	2,0
3	934283	111591378	119,4	117,5	1,7	120,1	2,2
4	879534	97711328	111,1	109,6	1,4	108,1	1,4
5	867989	94800054	109,2	107,9	1,2	108,7	0,7
6	806212	88334144	109,6	110,0	0,4	109,1	0,8
7	836982	93371380	111,6	110,7	0,7	112,4	1,5
8	850701	93897132	110,4	110,3	0,1	109,7	0,5
9	854143	96111396	112,5	111,5	0,9	107,8	3,4
10	902604	99323410	110,0	110,8	0,7	109,3	1,4
11	869745	99115101	114,0	114,0	0,0	114,7	0,6
12	921478	108502236	117,7	118,9	1,0	120,0	0,9
В среднем за месяц	874195	98404994	112,6	112,5	0,1	113,8	1,1

В 70 % случаев прогнозные значения УРЭ, определенные методом КП, оказались ближе к фактическим и в половине случаев расхождение их с фактом ниже, чем факта с планом (δ^*), т. е. точность прогнозирования данным методом выше по сравнению с методом ПП. Расхождения прогноза и факта не превышают 2,1 %, коэффициент вариации равен 0,7 %, что меньше, чем при прогнозировании методом ПП.

Для подтверждения достоверности метода КП выполнен расчет прогнозных значений удельных энергозатрат в грузовом движении на электрической тяге по всем железным дорогам РФ по данным, приведенным выше, на 2020 г. Расхождения прогнозных и фактических значений УРЭ для железных дорог с разным объемом перевозочной работы и уровнем энергопотребления не превышают 2 %, что свидетельствует о высокой точности прогнозирования.

Для примера приведем результаты прогнозирования УРЭ методами ПП и КП, когда прошла не половина прогнозного периода, а только его четверть. На рисунке 4 представлены расхождения фактических и прогнозных значений УРЭ при прогнозировании его двумя указанными методами на период с апреля по декабрь 2020 г. в разных видах движения по сети железных дорог РФ.

Как следует из рисунка 4, расхождения фактических и прогнозных величин УРЭ методом КП почти во всех случаях ниже, чем методом ПП. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что предложенный способ прогнозирования УРЭ методом КП позволяет с достаточно высокой точностью определять его ожидаемые значения.

По мере истечения каждой последующей единицы времени прогнозного периода прогнозные значения УРЭ могут уточняться рассмотренным выше методом в зависимости от сложившихся условий выполнения перевозочного процесса. Для этого необходимо выполнить процедуру прогнозирования заново с учетом большей длительности прошедшей части прогнозного периода.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

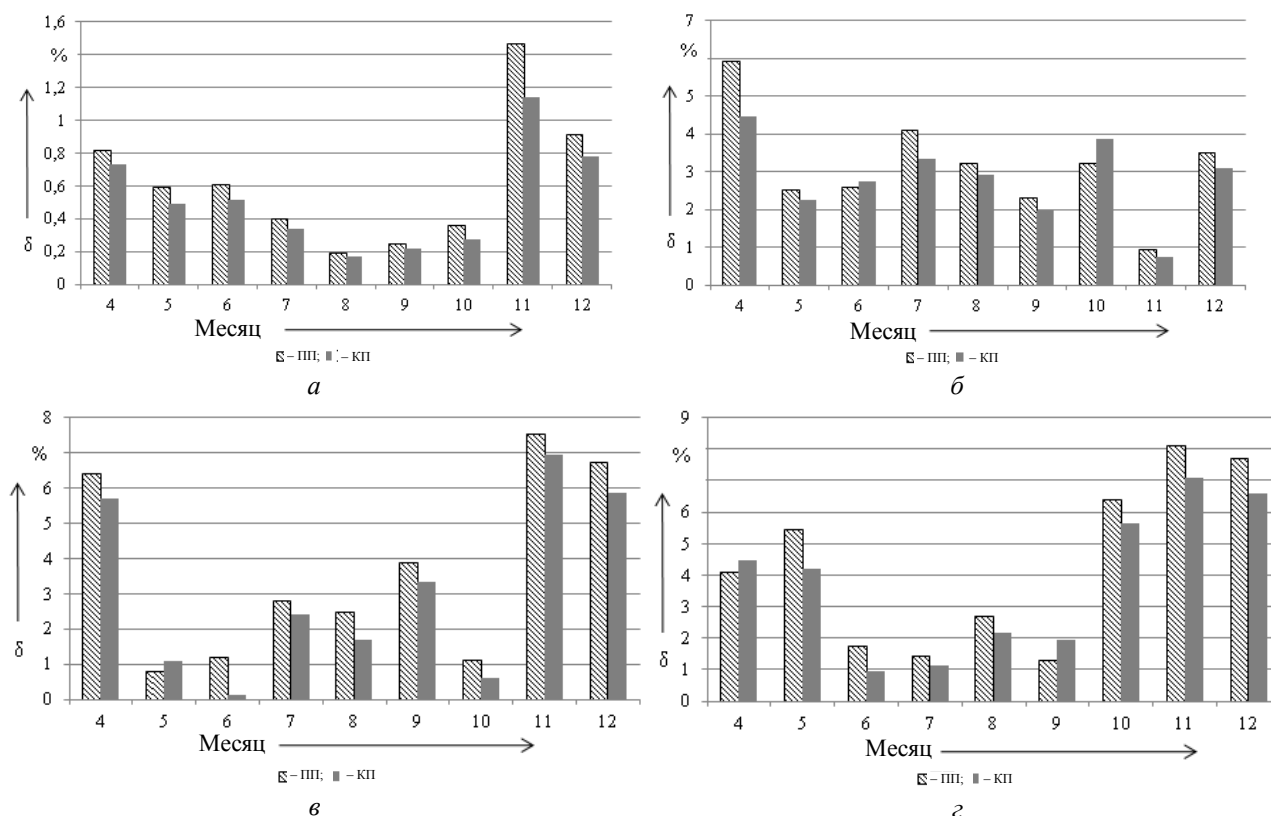


Рисунок 4 – Погрешность прогнозирования УРЭ методами ПП и КП:
грузовое (а), пассажирское (б), хозяйственное (в) движение и маневровая работа (г)

В Омском государственном университете путей сообщения в 2010 г. выполнены детальные исследования по определению зависимости УРЭ от температуры атмосферного воздуха, на основе которых разработана Методика оценки влияния температуры атмосферного воздуха на расход ТЭР на тягу поездов [7]. С учетом положений этой Методики, если прогнозный период включает в себя месяцы первого или четвертого кварталов, в которых ожидается существенное изменение средней температуры атмосферного воздуха относительно соответствующей температуры в базовом периоде, то прогнозные значения УРЭ на каждый такой месяц необходимо уточнить, рассчитав их по формуле:

$$\tilde{b}_{ki}^{\tau} = \tilde{b}_{0ki}^{\tau} \cdot \left(1 + \frac{\beta_{\tau} \cdot (t_i^{\text{баз.}\tau} - \tilde{t}_i^{\tau})}{100} \right), \quad (10)$$

где $\tilde{b}_{0ki}^{\tau}$ – прогнозное значение УРЭ на i -й месяц оставшейся части прогнозного периода;
 β_{τ} – коэффициент влияния температуры атмосферного воздуха на УРЭ, %/°С;
 $t_i^{\text{баз.}\tau}$ – среднемесячная температура атмосферного воздуха за i -й месяц базового периода, °С;
 $\tilde{t}_i^{\tau}$ – ожидаемое значение среднемесячной температуры атмосферного воздуха в i -м месяце прогнозного периода.

Для мониторинга энергетической эффективности перевозочного процесса, проводимого вышестоящими подразделениями, важнейшим показателем является прогнозное значение УРЭ в целом по эксплуатационному локомотивному (моторвагонному) депо. Это значение является индикатором внедрения программ повышения энергоэффективности. С учетом корректировки по температуре атмосферного воздуха прогнозное значение УРЭ для структурного подразделения на период прогнозирования можно определить по формуле:

$$\tilde{b}_{\text{сп}} = \frac{B^{\Phi} + \sum_i \left(\sum_k \tilde{b}_{ki}^{\tau} \cdot \tilde{A}_{ki}^{\tau} + \tilde{b}_{\text{МП}i}^{\tau} \cdot \frac{\tilde{L}_{\text{усл}i}}{100} \right)}{\sum_i \sum_k \tilde{A}_{ki}}, \quad (11)$$

где B^{Φ} – фактический расход ТЭР за время, прошедшее от начала прогнозного периода до момента прогнозирования; $\tilde{A}_{ki}^{\tau}$ – прогнозное значение работы в k -м виде движения на i -й месяц оставшейся части прогнозного периода.

Результаты многочисленных расчетов, выполненных для всех видов движения и в целом для разных структурных подразделений по месяцам 2018 – 2020 гг., показали высокую сходимость фактических и спрогнозированных методом КП значений УРЭ. В ряде случаев прогнозные значения УРЭ отличались от запланированных более чем на 3 %, что обусловило необходимость выполнения корректировки плановых норм УРЭ [8].

Разработанный авторами статьи метод прогнозирования показателя энергетической эффективности локомотивов внедрен на сети железных дорог РФ и за время использования показал высокую работоспособность.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года / Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. – Москва : 2016. – 76 с. – Текст : непосредственный.
2. Сидорова, Е. А. Применение регрессионных моделей для прогнозирования удельного расхода электроэнергии на тягу поездов / Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов, С. О. Подгорная. – Текст : непосредственный // Новая наука: стратегии и векторы развития : в 3 ч. – Sterlitamak : ООО «Агентство международных исследований», 2016. – Ч. 2. – С. 233–239.
3. Годин, А. М. Статистика / А. М. Годин. – Москва : Дашков и К°, 2017. – 412 с. – Текст : непосредственный.
4. Сидорова, Е. А. Методология прогнозирования объемов перевозочной работы на основе построения временных трендов / Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов, С. О. Вялкова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19). – С. 119–126.
5. Афанасьев, В. Н. Анализ временных рядов и прогнозирование / В. Н. Афанасьев, М. М. Юзбашев. – Москва : Финансы и статистика; Инфра-М, 2010. – 320 с. – Текст : непосредственный.
6. Халафян, А. А. Статистический анализ данных / А. А. Халафян. – Москва : Бином-Пресс, 2007. – 512 с. – Текст : непосредственный.
7. Методика оценки влияния температуры атмосферного воздуха на расход топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов / Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 02 апреля 2012. № 640р. – Москва : 2012. – Текст : непосредственный.
8. Сидорова, Е. А. Оценка необходимости корректировки плановой нормы удельного расхода энергоресурсов на тягу поездов / Е. А. Сидорова, С. О. Подгорная. – Текст : непосредственный // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте : материалы II всерос. науч.-практ. конф. – Самара : Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 82–84.

References

1. Energy Strategy of JSCo RZD until 2020 and towards 2030. No. 2537r. Moscow, 2016. 76 p. (In Russian).
2. Sidorova E. A., Davydov A. I., Podgornaya S. O. [Application of regression models for forecasting specific electricity consumption for train traction]. *Novaya nauka: strategii i vektory razvitiya: v 3 chastiakh* [New Science: strategies and vectors of development: in 3 parts]. Sterlitamak, 2016, vol. 2, pp. 233-239 (In Russian).

3. Godin A. M. *Statistika* [Statistics]. Moscow, Dashkov & Co, 2017, 412 p. (In Russian).
4. Sidorova E. A., Davydov A. I., Vyalkova S. O. Methodology of forecasting the volume of transportation work based on the construction of time trends. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 3 (19), pp. 119-126 (In Russian).
5. Afanas'ev V. N., Iuzbashev M. M. *Analiz vremennykh riadov i prognozirovanie* [Time Series Analysis and Forecasting]. Moscow, INFRA-M, 2010, 320 p. (In Russian).
6. Khalafian A. A. *Statisticheskii analiz dannykh: uchebnik, vtoroe izdanie* [Statistical analysis of the data]. Moscow, Binom, 2007, 512 p. (In Russian).
7. Methodology for assessing the impact of atmospheric air temperature on the consumption of fuel and energy resources for traction trains. No. 640r. Moscow, 2012 (In Russian).
8. Sidorova E. A., Podgornaya S. O. [Assessment of the need to adjust the planned norm of specific consumption of energy resources for traction trains]. *Mehatronika, avtomatizacija i upravlenie na transporte: II-j Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija* [Mechatronics, automation and control on transport: II-nd All-Russian scientific-practical conference]. Samara, 2020, pp. 82-84 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Подгорная Светлана Олеговна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Старший преподаватель кафедры «Информатика и компьютерная графика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: ps.light@mail.ru

Сидорова Елена Анатольевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, заведующая кафедрой «Информатика и компьютерная графика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: armsid@mail.ru

Давыдов Алексей Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: DavydovAI@bk.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Подгорная, С. О. Прогнозирование показателя энергетической эффективности локомотивов / С. О. Подгорная, Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 85 – 95.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Podgornaya Svetlana Olegovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Senior teacher of the department «Computer science and computer graphics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: ps.light@mail.ru

Sidorova Elena Anatolievna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, head of the department «Computer science and computer graphics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: armsid@mail.ru

Davydov Alexey Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Computer science and computer graphics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: DavydovAI@bk.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Podgornaya S. O., Sidorova E. A., Davydov A. I. Prediction of energy efficiency indicator for locomotives. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 85-95 (In Russian).

УДК 656.2.022.846:629.4.024.1

Р. Ш. Бозоров

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

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА «AFROSIYOB» НА ВСТРЕЧНЫЕ ПОЕЗДА

Аннотация. В настоящее время высокоскоростной пассажирский поезд «Afrosiyob» курсирует на участках Ташкент – Самарканд, Самарканд – Кариши, Самарканд – Бухара. В ближайшем будущем планируется запустить грузовые поезда на участках маршрута Бухара – Мискен. На высокоскоростных двухпутных участках Ташкент – Самарканд, Самарканд – Навои предусмотрено движение грузовых поездов совмещенно с пассажирскими поездами, что отрицательно сказывается на пропускной способности станций и перегонов. В связи с этим актуальным вопросом является движение грузовых поездов на этих участках. Необходимы дополнительные исследования по увеличению пропускной способности участков, где курсируют грузовые и высокоскоростные пассажирские поезда.

В статье рассматриваются варианты аэродинамического взаимодействия грузовых и высокоскоростных пассажирских поездов, движущихся в попутном или встречном направлении. При этом была выдвинута идея безопасной организации движения грузовых поездов при встречном и попутном движении высокоскоростных пассажирских поездов. Результатом данного исследования является определение возможности движения грузовых поездов в одном направлении или в противоположном направлении при обеспечении безопасности движения на двухпутных участках, по которым курсируют высокоскоростные электропоезда «Afrosiyob». Это дает возможность выработать рекомендации по более эффективному использованию пропускной способности участков.

При расчете аэродинамического взаимодействия выполнен анализ научных идей, выдвинутых учеными Европы, США, России и других стран. Описаны способы решения уравнений Навье – Стокса с использованием существующих моделей программирования.

Ключевые слова: аэродинамика, уравнение Навье – Стокса, программный модуль, участок, сила, давление.

Ramazon Sh. Bozorov

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

AERODYNAMIC IMPACT OF THE HIGH-SPEED ELECTRIC TRAIN «AFROSIYOB» ON OPPOSITE TRAINS

Abstract. At present, the “Afrosiyob” high-speed passenger train runs on the Tashkent – Samarkand, Samarkand – Karshi, Samarkand – Bukhara sections. In the near future, it is planned to launch freight trains on sections of the Bukhara – Miskin route. On high-speed double – track sections Tashkent – Samarkand, Samarkand – Navoi, the movement of freight trains is combined with passenger trains. Which, in turn, negatively affects the throughput of stations and hauls. In connection with this, the actual issue is the movement of freight trains on these sections. Additional research is needed to increase the capacity of sections where freight and high-speed passenger trains run.

The article considers options for the aerodynamic interaction of freight and high – speed passenger trains moving in one or the opposite direction. At the same time, the idea of the safe organization of freight trains during the movement of high-speed passenger trains was put forward. As a result of this study, the possibilities of carrying cargo trains in one direction or in the opposite direction are determined by ensuring the safety of movement on two-way parcels in which high-speed “Afrosiyob” high – speed electric trains travel. This makes it possible to develop recommendations for more effective use of the ability of parcels to conduct trains.

When calculating the aerodynamic interaction, scientific ideas put forward by scientists from Europe, the USA, Russia and other countries were analyzed. Methods for solving the Navier – Stokes equations using existing programming models are described.

Keywords: aerodynamics, Navier – Stokes equation, software module model, section, force, pressure.

С целью повышения эффективности пассажирских перевозок за счет развития сети железнодорожного транспорта в Республике Узбекистан, электрификации участков и внедрения современных технологий ежедневно повышается потребность в современных электропоездах, имеющих все удобства, направленные на улучшение транспортной

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

инфраструктуры, безопасное транспортное обслуживание и оказание качественных и безопасных транспортных услуг пассажирам. В настоящее время в АО «Узбекистан темир йуллари» приоритетной задачей является обеспечение своевременного прибытия пассажиров в пункты назначения с высокой скоростью. С целью расширения области оказания современных услуг туристам, прибывшим для ознакомления с историческими достопримечательностями нашей Республики, планируется продлить движение поезда «Afrosiyob» в направлении Бухоро – Мискин до города Хива. Однако следует отметить, что повышение количества пассажирских поездов «Afrosiyob» будет отрицательно влиять на организацию движения грузовых поездов.

Анализ показателей деятельности железной дороги нашей страны указывает на повышение потребностей грузовых и пассажирских перевозок в будущем. В данном положении эффективное использование пропускной способности будет выявляться как главная задача АО «Узбекистан темир йуллари».

Проведенные исследования [14, 16, 20] показывают, что вследствие повышения количества высокоскоростных пассажирских поездов «Afrosiyob» по участку Ташкент – Самарканд с двух до шести поездов пропускная способность грузовых поездов на данном участке снижается на 62,8 – 93,2 %. В результате повышаются простой грузовых вагонов, срок доставки грузов и технико-экономические издержки перевозок грузов.

Выполняемые несколько десятилетий практические и теоретические исследования по организации движения высокоскоростных пассажирских поездов показывают, что поток аэродинамического воздуха вокруг поездов, созданный за счет повышения скорости движения, приводит к ускоренным изменениям окружающей среды, что в свою очередь отрицательно влияет на окружающую среду и деятельность работы железнодорожных устройств. Изучение потока воздуха, возникшего вокруг движущегося высокоскоростного поезда, считается актуальной задачей по обеспечению безопасности движения. В таких странах, как Япония, Франция, Испания, где высокоскоростное движение более развито, были исследованы параметры изменчивости потока воздуха возникающего в передней части поезда за счет нестационарной аэродинамики. Такие исследования ведутся в ОАО «ВНИИЖТ» [1, 14, 15] на примере электропоезда «Сапсан» на участке Москва – Санкт-Петербург. По результатам исследований были определены аэродинамические силы, воздействующие на подвижной состав соседнего пути и пассажиров на платформе, и безопасное расстояние. Значения безопасного расстояния удаления пассажиров от оси пути приведены на рисунке 1.



Рисунок 1– Безопасное расстояние пассажиров от оси пути

При внедрении высокоскоростного движения поездов в странах с развитой железнодорожной инфраструктурой пути используют по отдельной специализации, учитывая безопасность движения и комфортабельность. Сейчас в АО «Узбекистан темир йуллари» эксплуатация путей для поездов различных категорий имеет ряд трудностей при организации движения грузовых поездов.

Согласно действующей инструкции «Об организации обслуживания и пропуска высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob» по участкам Ташкент – Самарканд – Карши, Ташкент – Самарканд – Бухара» в целях обеспечения безопасности движения поездов на АО «Узбекистан темир йуллари» в период пропуска электропоезда «Afrosiyob» запрещается движение поездов по соседним путям [22]. Вследствие этого пропускная способность железнодорожных участков используется неэффективно. С целью устранения этих трудностей требуется исследовать вопрос о возможности движения грузовых поездов по соседним путям в период движения высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob».

Необходимо теоретическое обоснование аэродинамического воздействия на грузовой поезд, следующий по соседнему пути с высокоскоростным пассажирским поездом. Для этого целесообразно изучение вариантов взаимодействия грузовых и пассажирских поездов в следующих обстоятельствах.

Первый вариант.

Аэродинамическое воздействие высокоскоростного пассажирского электропоезда на встречный грузовой поезд (рисунок 2).

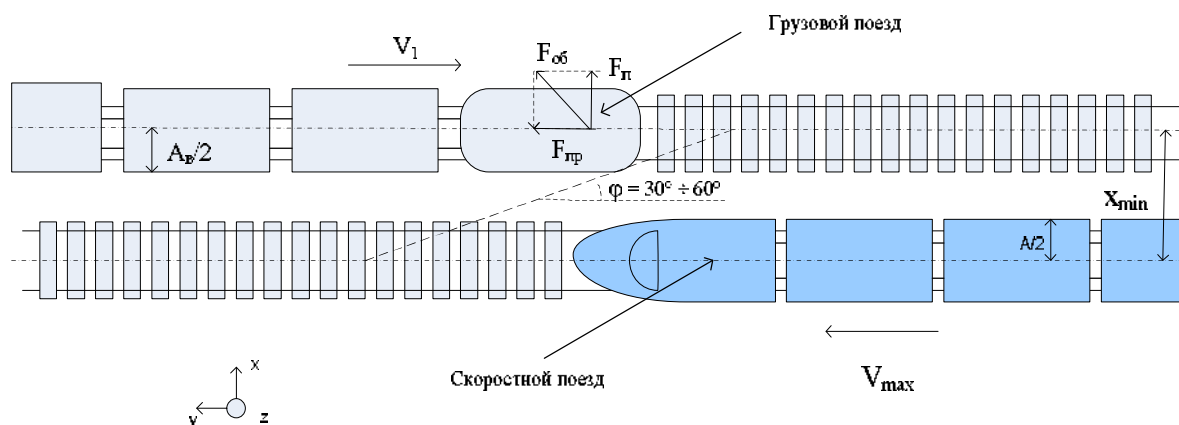


Рисунок 2 – Схема взаимного аэродинамического воздействия встречного высокоскоростного пассажирского электропоезда на полносоставный грузовой поезд

Второй вариант.

Аэродинамическое воздействие высокоскоростного пассажирского электропоезда на встречный одиночный подвижной состав (локомотивы, самоходные подвижные средства и т. п.) приведено на рисунке 3.

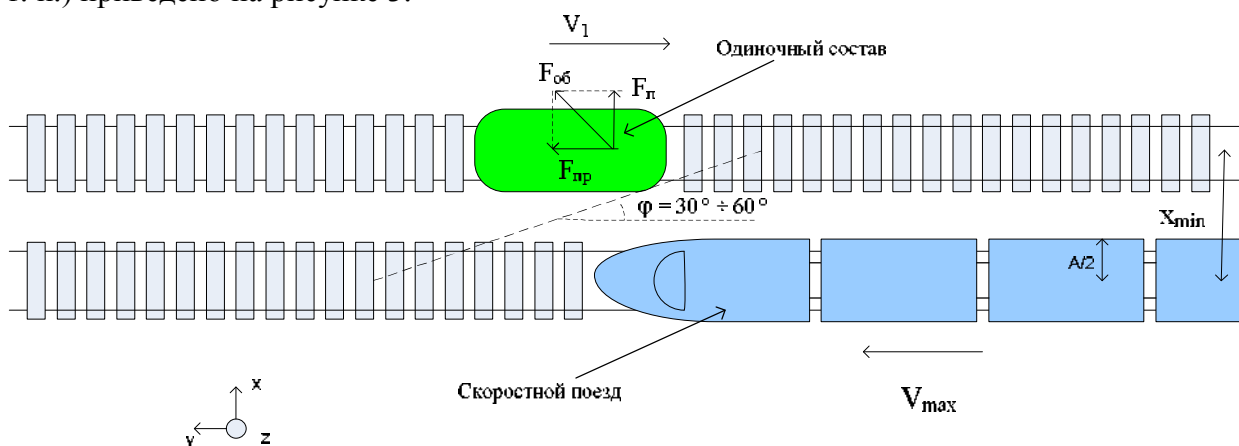


Рисунок 3 – Схема взаимного аэродинамического воздействия высокоскоростного пассажирского электропоезда на встречные одиночные подвижные составы (локомотивы, самоходные подвижные средства и т. п.)

Третий вариант.

Аэродинамическое воздействие высокоскоростного пассажирского электропоезда на встречный пассажирский поезд (состав поезда – 10 – 18 вагонов) приведено на рисунке 4.

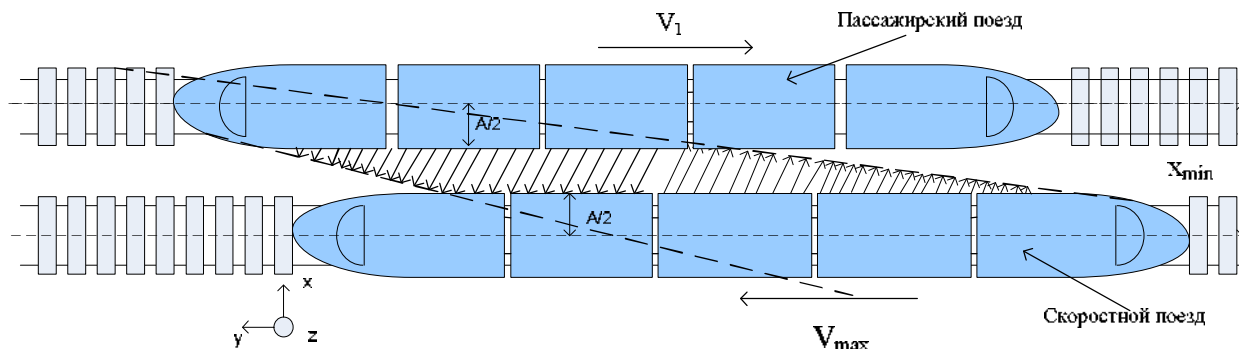


Рисунок 4 – Схема взаимного аэродинамического воздействия встречного пассажирского высокоскоростного электропоезда, местного и пригородного поездов

Четвертый вариант.

Аэродинамическое воздействие высокоскоростного пассажирского электропоезда на попутный грузовой поезд показано на рисунке 5.

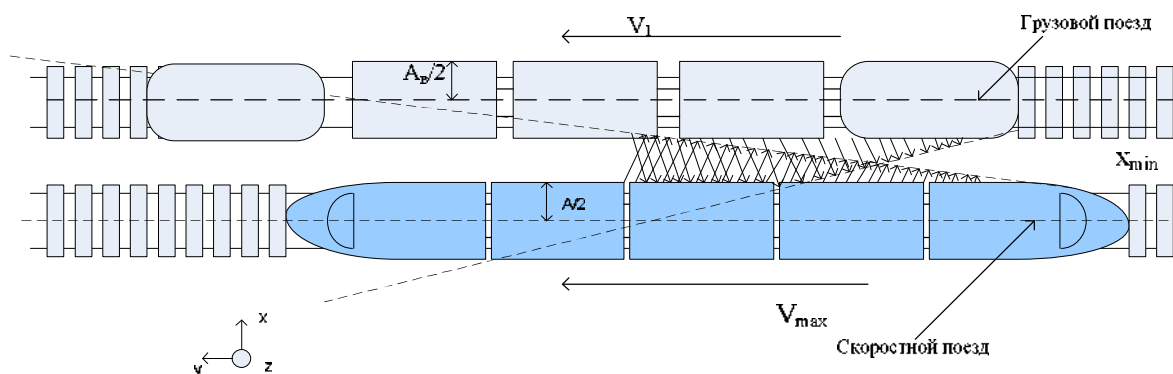


Рисунок 5 – Схема взаимного аэродинамического воздействия высокоскоростного пассажирского электропоезда на попутный грузовой поезд

Пятый вариант.

Аэродинамическое воздействие высокоскоростного пассажирского электропоезда на попутный одиночный подвижной состав (локомотивы, самоходные подвижные средства и т. п.) приведено на рисунке 6.

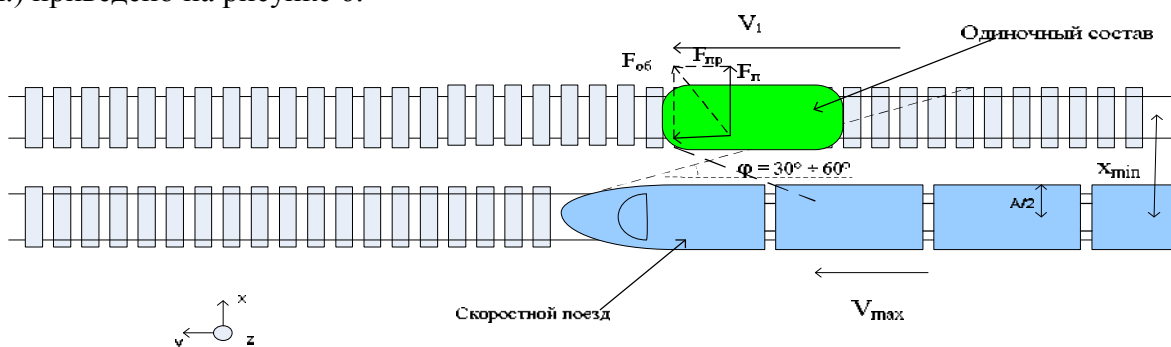


Рисунок 6 – Схема взаимного аэродинамического воздействия высокоскоростного пассажирского электропоезда на попутные одиночные подвижные составы (локомотивы, самоходные подвижные средства и т. п.)

Шестой вариант.

Аэродинамическое воздействие высокоскоростного пассажирского электропоезда на попутный пассажирский поезд (состав поезда – 10 – 12 вагонов) приведено на рисунке 7.

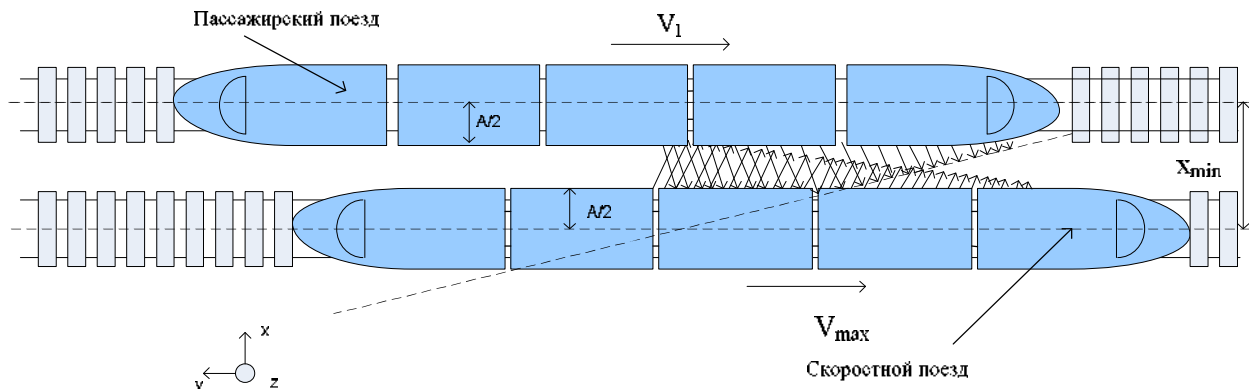


Рисунок 7 – Схема взаимного аэродинамического воздействия попутного пассажирского высокоскоростного электропоезда, местного и пригородного поездов

На рисунках 2 – 7 приняты следующие обозначения:

$V_{\max}$ – максимальная скорость движения высокоскоростного пассажирского электропоезда, км/ч;

A – ширина исследуемого объекта, м;

V_1 – скорость движения встречного или попутного подвижного состава, км/ч;

$F_{\text{пр}}, F_{\text{п}}, F_{\text{об}}$ – продольные, поперечные и аэродинамические силы, возникающие вследствие движения грузового и высокоскоростного пассажирского поездов, Н.

Вследствие попутного или встречного движения поездов образуется сложный поток воздуха. Это влияет на устойчивость подвижного состава. При выполнении исследования в условиях высокой турбулентности необходимо учитывать направление движения поездов. Соединительные точки грузового и высокоскоростного пассажирского поездов рассматриваются, как на прямом профиле участка. Высокоскоростной пассажирский поезд «Afrosiyob» и другие категории поездов могут скрещиваться между собой на перегонах двухпутного участка Ташкент – Новый Янгиер и Джизак-1 – Самарканд. Так, в открытых местах (перегоны и полевые места) и закрытых местах (тоннели, станции и др.) аэродинамические силы и нагрузки воздействуют по-разному. На кривых участках трудного профиля наблюдается влияние внешней центробежной силы. Изучается положение скрещивания грузового и пассажирского поездов на двухпутных участках открытой территории. Схемы участков Ташкент – Новый Янгиер и Джизак-1 – Самарканд приведены на рисунке 8. Длина этих участков составляет соответственно 133,4 и 112,3 км. На участках с высокоскоростным движением поездов также следует учитывать параметры путей (уклон, радиус кривой и др.) и погодные условия (ветер, осадки и др.). 14,02 % (18,7 км) и 36,2 % (40,7 км) приходится соответственно на кривые участки. Из этого следует, что необходимо учитывать скрещивания грузового и скоростного поездов на кривом участке.

Вектор скорости ветра, воздействующий на движение поездов, имеет две составляющие: перпендикулярную и поперечную (продольную) скорости направления движения. Если поперечная и продольная скорости способствуют ускорению или замедлению движения подвижного состава, то перпендикулярная действует на устойчивость вагонов. Поэтому целесообразно изучить воздействие перпендикулярных составляющих на устойчивость вагонов и безопасность движения [10 – 13].

В расчетах учитывается высокое аэродинамическое воздействие высокоскоростного поезда «Afrosiyob» на грузовой поезд из порожних универсальных крытых вагонов.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Порожние вагоны повышают достоверность исследования. Техническая характеристика высокоскоростного поезда: 11 пассажирских вагонов и два локомотива, максимальная скорость движения поезда $V_{\max} = 250$ км/ч, максимальное ускорение $a_{\max} = 1,2$ м/с², длина поезда $L_{\max} = 183$ м, длина локомотива $L_{\text{лок}} = 20$ м, ширина поезда $A = 2,96$ м, высота поезда $H = 4$ м, общий вес $Q_e = 306$ т. Техническая характеристика универсального крытого вагона: $L_v = 15,724$ м, $A_v = 2,764$ м, $H_v = 3,05$ м [18, 19].

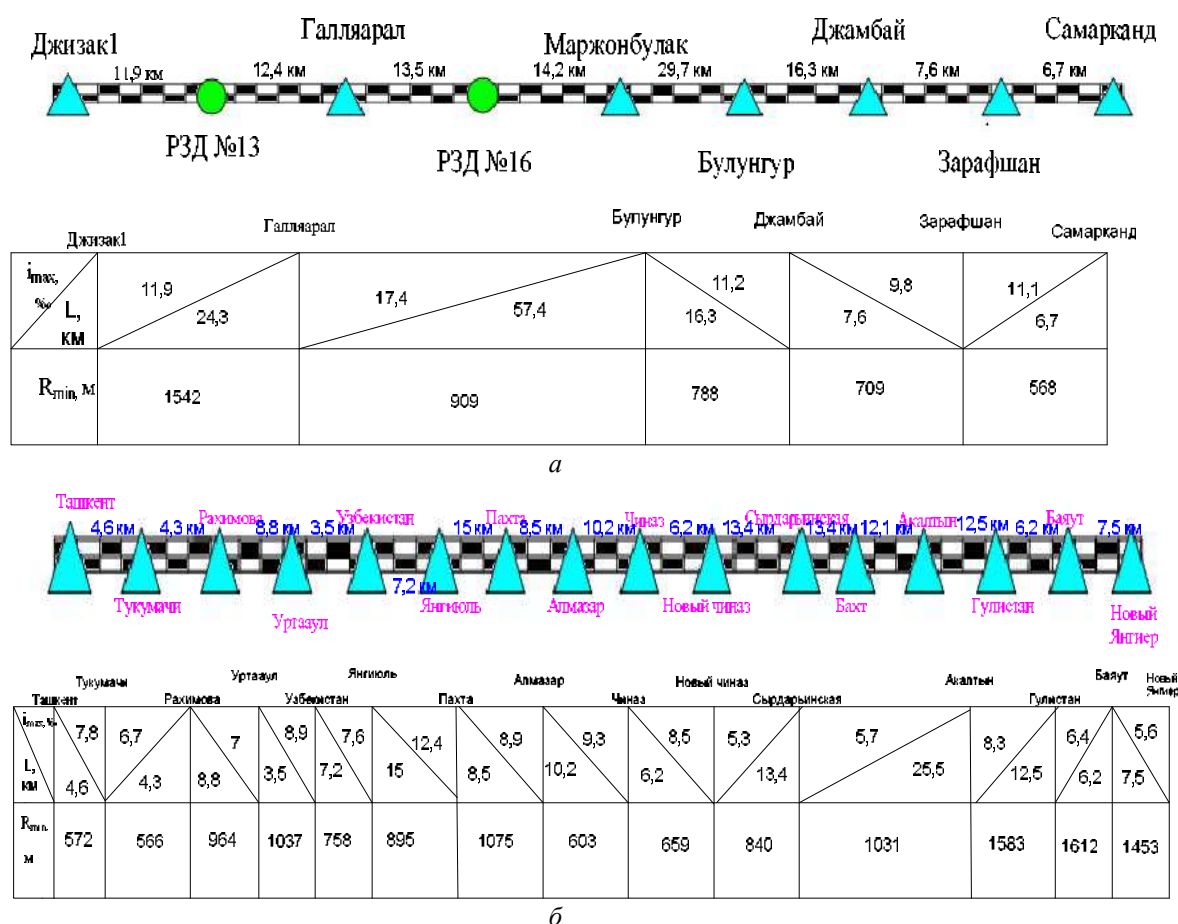


Рисунок 8 – Схемы и профили двухпутного участка Ташкент – Самарканд АО «Узбекистан темир йуллари»: а – двухпутного участка Джизак–1–Самарканд; б – двухпутного участка Ташкент – Новый Янгийер

Аэродинамика воздуха вокруг движущегося поезда на высокой скорости бывает в виде положительно сжатого (P_+) перед началом головной части поезда и после импульсов отрицательного давления (P_-) [4, 10]. В конце поезда этот процесс будет в обратном виде. Импульс давления, образовавшийся между поперечными или попутными поездами, зависит от расстояния междупутья. Давление зависит обратно от расстояния, т. е. чем больше расстояние между осями путей, тем меньше аэродинамическое воздействие:

$$P \sim \frac{1}{x^2}, \quad (1)$$

где x – расстояние между осями путей (междупутье), мм;

P – импульс давления, возникающий вследствие движения поездов, Па.

При движении двух поездов одновременно поезд с высокой скоростью принимают как проходящий, а поезд с низкой скоростью – как проводящий. Различные ученые воздействие

проводящего поезда на проходящий излагали по-разному. По результатам исследований китайских ученых указано, что при движении двух поездов с одинаковой скоростью появляется воздействие импульсов высокого давления на 15 – 27 % больше, чем при движении одного поезда [2 – 4, 9, 13].

По результатам опытов германских и французских ученых этот показатель достигает 35 – 45 % [2 – 4]. Кроме этого выполненные опыты показывают, что при расстоянии между осями путей 5 м, на расстоянии 0,5 – 1,5 м над уровнем верха головки рельса происходит максимальное изменение давления. При измерении на высоте 3 м показатель оказался на 30 – 40 % меньше [4 – 5, 8 – 9, 13]. Значит, чем выше вертикаль, тем меньше импульс давления. В настоящее время нет универсальной, стандартной формулы для расчета аэродинамических сил и давления при движении встречных поездов. Но приведенная в четвертой части европейского стандарта EN-14067 формула (2) использовалась для стоящих составов, поэтому данную формулу можно использовать и для подвижных составов [2 – 4, 10].

Значения аэродинамических давлений, действующих на подвижной состав, определяются по следующей формуле:

$$P_{\text{аэр}} = k_u f_v k_d k_{ap} k_t \left[\frac{S}{\left(x - \frac{A}{2}\right)^2} + c \right] \times \rho \frac{g^2}{2}, \quad (2)$$

где k_u – коэффициент конвертации единицы;

k_d – поправочный коэффициент для скорости проводящего поезда;

k_{ap} – коэффициент давления;

k_t – коэффициент воздействия, зависящий от геометрических данных поезда;

S – изучаемая площадь, м²;

x – расстояние между осями соседних путей, м;

A – ширина изучаемого объекта, м;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

g – скорость потока ветра вследствие движения поезда, м/с.

Значение f_v , указанное в формуле (2), рассчитывается следующим образом:

$$f_v = \frac{1}{\sqrt{1 - M^2}}. \quad (3)$$

В нашем случае из-за того, что $g_{\text{max}} = 250$ км/ч, $M < 0,3$, $f_v \approx 1$. Поправочный коэффициент для скорости поезда $1 \leq k_d \leq 1,25$. Коэффициент воздействия, зависящий от геометрических данных поезда, k_t . Тогда формула (2) будет иметь вид:

$$P_{\text{аэр}} = k_t \frac{S}{\left(x - \frac{A}{2}\right)^2} \times \rho \frac{g^2}{2}. \quad (4)$$

Давление аэродинамического импульса $P_{\text{аэр}}$, действующего на грузовой поезд, должно быть в пределах установленной нормы $P_{\text{норма}}$, т. е.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$$P_{\text{аэр}} \leq P_{\text{норма}} . \quad (5)$$

Подставляя формулу (4) в выражение (5), получаем неравенство:

$$P_{\text{аэр}} = k_t \frac{S}{\left(x - \frac{A}{2}\right)^2} \times \rho \frac{g^2}{2} \leq P_{\text{норма}} . \quad (6)$$

Из уравнения (6) можно определить значение минимального расстояния между осями путей $x_{\min}$ или максимальную скорость $g_{\max}$:

$$x \geq \frac{A}{2} + \sqrt{\frac{Sk_t \rho g^2}{2P_{\text{норма}}}} \Rightarrow x_{\min} = \frac{A}{2} + \sqrt{\frac{Sk_t \rho g^2}{2P_{\text{норма}}}} . \quad (7)$$

Максимальное значение установленной скорости определяется по формуле:

$$g_{\max} = \left(x - \frac{A}{2}\right) \times \sqrt{\frac{2P_{\text{норма}}}{Sk_t \rho}} . \quad (8)$$

В расчетной работе были приняты следующие значения: $g_{\max} = 250$ км/ч; $P_{\text{норма}} = 1800$ Па; $\rho = 1,225$ кг/м³; $S \approx 48$ м²; $k_t = 1,2$. Данные о поезде приведены выше. Результаты расчетов сведем в таблицу.

В случае расстояния между осями путей 4100 мм скорость воздействия воздушного потока на подвижной состав $g_{\max}$ должна составлять $g_{\max} \leq 19,41$ м/с.

Взаимосвязь скорости воздушного потока и расстояния между осями путей

Максимальная скорость движения грузовых поездов, км/ч	Скорость пассажирского высокоскоростного поезда, км/ч	Минимальное расстояние между осями путей, мм
100	250	4846
100	200	4014
100	160	3496

Взаимосвязь скорости воздушного потока и расстояния между осями путей приведена на рисунке 9.

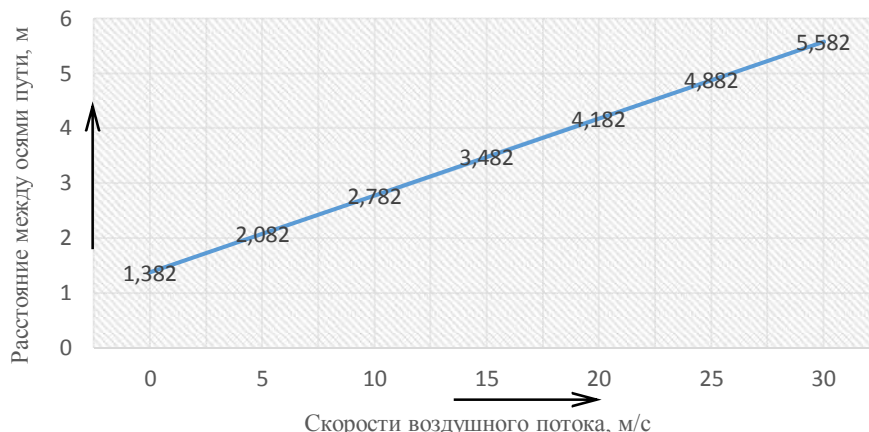


Рисунок 9 – График взаимосвязи расстояния между осями путей и скорости воздушного потока

Уравнение и график зависимости расстояния между осями путей, нормированного аэродинамического давления, скорости скрещенных грузовых и высокоскоростных пассажирских поездов на участке, а также для нелинейного уравнения Навье – Стокса в

гидрогазодинамике установленных предельных скоростей при $x = 4100$ в частном случае определяются путем трехмерного решения (9) – (11). Принимаем максимальную скорость движения электропоезда «Afrosiyob» 250 км/ч, или 69,4 м/с, тогда максимальное значение будет таким: $M = \frac{g}{c} \Rightarrow M \approx 0,21 \leq 0,3$, т. е. воздух вокруг поезда принимаем в качестве несжатого потока, поэтому уравнение запишем так:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]; \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right]; \\ \rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Запишем законы сохранения массы и газообразного состояния:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0; \quad (10)$$

$$p = \frac{\rho}{\mu_1} RT, \quad (11)$$

где u, v, ω – проекции вектора скорости на оси x, y, z ;

p – давление, ρ – плотность, T – температура, μ – коэффициент динамической вязкости воздуха.

Для начала расчетных работ определяются начальные и предельные условия. Данные формулы можно применять при расчете простых потоков, например, потока в трубах.

При расчете примеров большое значение имеет модель турбулентного воздушного потока. Существует несколько моделей турбулентного воздушного потока:

- полуэмпирический подход, основанный на равенстве Навье – Стокса и упрощенный по числам Рейнольдса;
- метод моделирования больших вихрей (Large Eddy Simulation, LES);
- метод прямого цифрового моделирования (Direct Numerical Simulation, DNS);
- гибридный метод моделирования, который состоит из нескольких моделей [23, 25].

При решении задачи вычерчивается сетка ячеек конечных объемов моделированного поезда и, используя программы моделирования ANSYS FLUENT, ANSYS CFD, получаем необходимые результаты. Полученные результаты сравниваем с результатами исследований [23, 25].

По выполненным исследованиям можно установить, что изучение аэродинамического воздействия высокоскоростного пассажирского поезда на грузовой поезд учеными из Европы, США и Китая является обоснованным. Необходимо изучать это и в местных условиях. В Европейских стандартах EN-14067 не учитывалась скорость встречного грузового поезда, следовательно, существует необходимость исследования эффективного использования пропускной способности АО «Узбекистан темир йуллари». При этом следует использовать современные программы моделирования.

1. Лазаренко Ю. М. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении / Ю. М. Лазаренко, А. Н. Капускин. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2012. – № 4. – С. 11–14.
2. “EN 14067 Railway applications – Aerodynamics – Part 2: Aerodynamics on open track”, ed: CEN/TC 256, 2010.
3. “EN 14067 Railway applications – Aerodynamics – Part 4: Requirements and test procedures for aerodynamics on open track”, ed: CEN/TC 256, 2010.
4. “EN 14067 Railway applications – Aerodynamics – Part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment”, BS EN 14067 – 6: 2018.
5. Raghu S. Raghunathan, H. D. Kim, T. Setoguchi. Aerodynamics of high-speed railway train / Progress in Aerospace Sciences 38 (2002) 469-514.
6. Bozorov R. S., Rasulov M. X., Masharipov M. N. Research on the aerodynamics of high-speed trains // Universum: технические науки : электрон. научн. журн., 2022, № 6 (99).
7. ВСН 333-Н Инфраструктура скоростной железнодорожной линии Самарканд – Карши. Общие технические требования. – Ташкент : АО «УТЙ», 2015. – Текст : непосредственный.
8. Li R., Lui J., Qi Z., and Zhang W. Air pressure pulse developing regularity of high-speed trains crossing in open air. Jixie Gongcheng Xuebao (Chinese Journal of mechanical Engineering), 2011, vol. 47, pp. 125-130.
9. Holmes T., Schroeder M., and Toma E. High-speed passenger and intercity train aerodynamic computer modeling. In *Proceedings of ME2000*, Orlando, Florida, 2000.
10. VSN-450. Departmental technical guidelines for design and construction. 1520 mm gauge railways. Tashkent, 2010 y. АО “УТЙ” (In Russian).
11. Recent development of bridge aerodynamics in China. J. Wind Eng. Industr. Aerodynamics. 2008. № 96. p. 736–768.
12. Hong-bing Xiong, Wen-guang Yu, Da-wei Chen, Xue-ming Shao. Numerical study on the aerodynamic performance and safe running of high-speed trains in sandstorms / Journal of Zhejiang University Science A. December 2011, Volume 12, Issue 12, pp. 971–978.
13. Baker C., Quinn A., Sima M., Hoefener L., and Licciardello R. Full scale measurement and analysis of train slipstreams and wakes: Part 2 Gust analysis. Proceedings of the Institute of mechanical Engineers, Part F: *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2013.
14. Р. Ш. Бозоров Способы эффективного использования пропускной способности участков в условиях пропуска высокоскоростных пассажирских поездов / М. Х. Расулов, С. Е. Бекжанова, М. Н. Машарипов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт : Актуальные вопросы и инновации. – 2021. – № 2. – С. 5–22.
15. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия 6. Ветровые нагрузки. – Москва : Центр проектной продукции, 2005. – С. 12–18. – Текст : непосредственный.
16. Бозоров, Р. Ш. Новая методика расчета времени и скорости вагона при его движении на участке первой тормозной позиции сортировочной горки при воздействии встречного ветра / Р. Ш. Бозоров, Ш. У. Саидивалиев, Э. С. Шерматов. – Текст : непосредственный // Вопросы устойчивого развития общества. – 2021. – № 6. – С. 575–586.
17. Bozorov R. Sh. A new method of calculating time and speed of a carriage during its movement on the section of the first brake position of a marshaling hump when exposed headwind / Sh. U. Saidivaliev, R. Sh. Bozorov, E. S. Shermatov. *Student*, 2021, no. 9.
18. Об отсутствии теоретической базы формулы для определения высоты первого профильного участка сортировочного горба / Р. Ш. Бозоров, Ш. У. Саидивалиев, Ш. Б. Джаббаров [и др.]. – Текст : непосредственный // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 34. – С. 1467–1481.

19. Shukhrat Saidivaliev, Ramazon Bozorov, Elbek Shermatov. Kinematic characteristics of the car movement from the top to the calculation point of the marshalling hump. *E3S Web of Conferences* 264, 05008 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126405008>.

20. Институт прогнозирования и макроэкономических исследований // ifmr.uz : сайт. – Текст: электронный. – URL: <https://www.ifmr.uz/infographics/> (дата обращения: 20.06.2022).

21. Стратегия развития АО «Узбекистон темир йуллари» на период 2015 – 2019 гг. // railway.uz : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://railway.uz/ru/gazhk/strategiya_razvitiya/ (дата обращения: 20.06.2022).

22. Инструкция «О порядке обслуживания и организации пропуска высокоскоростных электропоездов «Afrosiyob» по железнодорожным путям общего пользования на участках Ташкент – Самарканд – Карши, Ташкент – Самарканд – Бухара». – Ташкент : АО «Узбекистон темир йуллари», 2016. – Текст : непосредственный.

23. Гарбарук, А. В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений : учебное пособие / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012. – 88 с. – Текст : непосредственный.

24. Полякова, Е. Я. К вопросу об обледенении железнодорожного подвижного состава в условиях эксплуатации северного широтного хода / Е. Я. Полякова, Б. О. Поляков, С. И. Дубинский. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2021. – Т. 7. – Вып. 1. – С. 7.

25. ANSYS FLUENT 12.0 UDF Manual. – Текст : электронный. – URL: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20UDF%20Manual.pdf>. (дата обращения: 20.06.2022).

References

1. Lazarenko Y.M., Kapuskin A.N. Aerodynamic impact of the «Sapsan» high-speed electric train on passengers on platforms and on oncoming trains when crossing. *Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*, 2012, no. 4, pp.11-14 (In Russian).

2. “EN 14067 Railway applications – Aerodynamics – Part 2: Aerodynamics on open track”, ed: CEN/TC 256, 2010.

3. “EN 14067 Railway applications – Aerodynamics – Part 4: Requirements and test procedures for aerodynamics on open track”, ed: CEN/TC 256, 2010.

4. “EN 14067 Railway applications – Aerodynamics – Part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment”, BS EN 14067 - 6: 2018.

5. Raghu S. Raghunathan, Kim H.D., Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace Sciences*, 38 (2002) pp. 469-514.

6. Bozorov R.S., Rasulov M.X., Masharipov M.N. Research on the aerodynamics of high-speed trains. *Universum: Technical science : electronic scientific journal*, 2022, no. 6(99).

7. VSN 333-N Infrastructure of the high-speed railway line Samarkand–Karshi. General technical requirements. Tashkent, 2015. JSC “O‘TY”. (In Russian).

8. Li R., Lui J., Qi Z., and Zhang W. Air pressure pulse developing regularity of high-speed trains crossing in open air. Jixie Gongcheng Xuebao (Chinese Journal of mechanical Engineering), 2011, vol. 47, pp. 125-130.

9. Holmes T., Schroeder M., and Toma E. High-speed passenger and intercity train aerodynamic computer modeling. *In Proceedings of ME2000*, Orlando, Florida, 2000.

10. VSN-450. Departmental technical guidelines for design and construction. 1520 mm gauge railways. Tashkent, 2010 y. AO “UTY” (In Russian).

11. Recent development of bridge aerodynamics in China. *J. Wind Eng. Industr. Aerodynamics*. 2008. № 96. p. 736–768.

12. Hong-bing Xiong, Wen-guang Yu, Da-wei Chen, Xue-ming Shao. Numerical study on the aerodynamic performance and safe running of high-speed trains in sandstorms / *Journal of Zhejiang University Science A*. December 2011, Volume 12, Issue 12, pp. 971–978.

13. Baker C., Quinn A., Sima M., Hoefener L., and Licciardello R. Full scale measurement and analysis of train slipstreams and wakes: Part 2 Gust analysis. *Proceedings of the Institute of mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2013.

14. Bozorov R.Sh. Methods for the efficient use of the capacity of sections in the conditions of the passage of high-speed passenger trains / Bozorov R.Sh., Rasulov M.Kh., Bekzhanova S.E., Masharipov M.N. –Text : immediate // Railway transport: Topical issues and innovations, 2021, no. 2, pp. 5-22 (In Russian).
15. CSaR 2.01.07–85. Loads and actions 6. Wind loads. Moscow : FGUP SPP, 2005, pp. 12-18 (In Russian).
16. Bozorov R.Sh., Saidivaliev Sh.U., Shermatov E.S. A new method for calculating the time and speed of a wagon during its movement on the site of the first brake position of a marshalling hump under the influence of a headwind. *Issues of Sustainable Development of Society*, 2021, no. 6, pp. 575-586 (In Russian).
17. Bozorov R.Sh., Saidivaliev Sh.U., Shermatov E.S. A new method of calculating time and speed of a carriage during its movement on the section of the first brake position of a marshaling hump when exposed headwind. *Student*, 2021, no. 9.
18. Bozorov R.Sh., Saidivaliev Sh.U., Jabbarov Sh.B. and oth On the absence of a theoretical basis for the formula for determining the height of the first profile section of the sorting hump. *Innovations. The science. Education*, 2021, no. 34, p. 1467-1481 (In Russian).
19. Shukhrat Saidivaliev, Ramazon Bozorov, Elbek Shermatov. Kinematic characteristics of the car movement from the top to the calculation point of the marshalling hump. *E3S Web of Conferences* 264, 05008 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126405008>.
20. Institute for Forecasting and Macroeconomic Research. Available at: <https://www.ifmr.uz/infographics/> (accessed: 20.06.2022).
21. Development strategy of JSC “O‘zbekiston temir yo‘llari” for the period 2015–2019 y. Available at: https://railway.uz/ru/gazhk/strategiya_razvitiya/ (date of the application: 20.06.2022).
22. INSTRUCTION “On the procedure for servicing and organizing the passage of high-speed electric trains “Afrosiyob” on public railway tracks on the section Tashkent–Samarkand–Karshi, Tashkent–Samarkand–Bukhara”, –Tashkent: JSC “O‘TY” 2016 (In Russian).
23. Garbaruk A.V., Strelets M.X., Shur M.L. Modeling turbulence in complex flow calculations: tutorial: Tutorial. St. Petersburg State Polytechnic University, 2012, 88 p. (In Russian).
24. Polyakova E.Y., Polyakov B.O., Dubinskiy S.I. On the issue of icing of railway rolling stock in the conditions of operation of the northern latitudinal way. Proceedings of the St. Petersburg University of Communications. SPb.: PGUPS, 2021, vol. 7, rel. 1, p. 7 (In Russian).
25. ANSYS FLUENT 12.0 UDF Manual. Available at: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20UDF%20Manual.pdf> (accessed 20.06.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бозоров Рамазон Шамилович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТУ.

Тел.: +998 (91) 251-33-77.

E-mail: ramazon-bozorov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Bozorov Ramazon Shamilovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lichiler st., 1, Tashkent City, the Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (91) 251-33-77.

E-mail: ramazon-bozorov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Бозоров, Р. Ш. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob» на встречные поезда / Р. Ш. Бозоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 96 – 107.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Bozorov R. Sh. Aerodynamic impact of the high-speed electric train «Afrosiyob» on opposite trains. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 96-107 (In Russian).

И. И. Галиев, В. Н. Ушак

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

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭКИПАЖА И ПУТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЭЛЕКТРОВОЗА ЭП2К В КРИВЫХ МАЛОГО РАДИУСА

Аннотация. В статье рассматриваются особенности конструкции механической и экипажной частей пассажирского электровоза постоянного тока ЭП2К, которые непосредственно оказывают или обуславливают воздействие на рельсовый путь. Цель работы – рассмотреть особенности взаимодействия экипажа и пути при движении данного электровоза в кривых малого радиуса путем оценки сил, возникающих в контакте «колесо – рельс» трехосных тележек электровоза ЭП2К в данных условиях. Необходимость решения такой задачи вызвана результатами анализа статистических данных по износу гребней колес электровозов ЭП2К. Данные электровозы эксплуатируются на объединенном полигоне железных дорог, где встречается большое число криволинейных участков, в том числе и кривые малого радиуса.

Для достижения поставленной цели составлена расчетная схема трехосной тележки электровоза ЭП2К, позволяющая выполнить количественную оценку сил, действующих в контакте гребней колес с головками рельсов. По расчетной схеме составлена система уравнений, решение которой и позволяет оценить силы между гребнем и внутренней гранью головки рельса.

На основании результатов расчета направляющих сил колесных пар трехосной тележки электровоза ЭП2К сделан вывод о том, что значения направляющей силы, действующей на вторую колесную пару, сопоставимы с усилиями воздействия на первую и третью колесные пары, а в некоторых вариантах даже превышают значения данных усилий.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших исследований по разработке мероприятий, направленных на снижение износа гребней колес электровозов серии ЭП2К в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: кривая, направляющие силы, гребень, вписывание, разбег колесной пары, колея, зазор в колее.

Ilkham I. Galiev, Victor N. Ushak

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

FEATURES OF THE INTERACTION OF THE CREW AND THE PATH WHEN MOVEMENT OF THE EP2K ELECTRIC LOCOMOTIVE IN SMALL RADIUS CURVES

Abstract. The article discusses the design features of the mechanical and crew parts of the passenger electric locomotive DC EP2K, which directly have or causes an impact on the rail track. The purpose of the work is to consider the features of the interaction of the crew and the track when moving this electric locomotive in small radius curves by evaluating the forces arising in the "wheel-rail" contact of the three-axle bogies of the EP2K electric locomotive under these conditions. The need to solve such a problem is caused by the results of the analysis of statistical data on the wear of the ridges of the wheels of EP2K electric locomotives. These electric locomotives are operated at the united railway landfill, where there are a large number of curved sections, including curves of small radius.

To achieve this goal, a design scheme of a three-axle trolley of an EP2K electric locomotive has been compiled, which allows a quantitative assessment of the forces acting in contact with the wheel ridges with the relay heads. According to the calculation scheme, a system of equations has been compiled, the solution of which makes it possible to estimate the forces between the ridge and the inner face of the rail head.

Based on the results of the calculation of the guiding forces of the wheel pairs of the three-axle bogie of the EP2K electric locomotive, it is concluded that the values of the guiding force acting on the second wheel pair are comparable to the forces acting on the first and third wheel pairs, and in some variants even exceed the values of these forces.

The obtained results can be used for further research on the development of measures aimed at reducing the wear of the ridges of the wheels of electric locomotives of the EP2K series under operating conditions.

Keywords: curve, guiding forces, ridge, fitting, wheelset run-up, track, track clearance.

Конструкция пассажирского электровоза постоянного тока ЭП2К имеет некоторые особенности:

локомотив односекционный, 6-осный с двумя 3-осными тележками, тяговым приводом 3-го класса с опорно-рамным подвешиванием тяговых двигателей и редукторов, двухступенчатым рессорным подвешиванием из пружин и гидравлических гасителей колебаний;

средние колесные пары тележек имеют поперечный разбег 14 мм в буксах для облегчения вписывания в кривые участки пути;

кузов опирается на тележки с помощью винтовых пружин;

передача тяговых и тормозных усилий от тележек на кузов осуществляется с помощью двухсторонних тяг и механизма параллелограммного типа.

С началом эксплуатации электровозов серии ЭП2К на полигонах Западно-Сибирской и Свердловской железной дороги с 2010 по 2015 г. интенсивность износа гребней бандажей колесных пар составляла не более 0,157 мм/10 тыс. км пробега. В 2015 г. полигон обращения был увеличен на Южно-Уральскую и Куйбышевскую железные дороги. С 2015 г. произошло увеличение интенсивности износа гребней с 0,178 мм/10 тыс. км пробега до 0,475 мм/10 тыс. км пробега в 2021 г. Таким образом, произошло снижение ресурса бандажа с 1523 тыс. км в 2010 г. до 606 тыс. км в 2021 г.

По данным ООО «ЛокоТех-Сервис» большая часть всех обточек колесных пар (46 % от общего количества) приходится на вторую и пятую колесные пары по причине предельного износа гребня бандажа.

С расширением полигона эксплуатации электровозов ЭП2К возросло количество участков пути со сложным профилем, характеризующимся наличием большого количества кривых малых радиусов (менее 350 м).

Необходимо исследовать влияние условий эксплуатации электровозов ЭП2К, обусловленных профилем пути в плане, на интенсивность износа гребней колес.

В Правилах эксплуатации железных дорог (ПТЭ) [1] при укладке пути для кривых малого радиуса выполняется дополнительное уширение колеи. В зависимости от радиуса кривой это уширение составляет 15, 10 и 0 мм. В связи с этим колея в кривых малого радиуса шире, чем в прямолинейных участках пути. Для численной оценки приняты кривые с радиусами 200, 250, 300, 350 м, альбомные и максимальные зазоры в колее.

В дальнейших расчетах будем считать, что электровоз движется в криволинейном участке пути по круговой кривой с постоянной скоростью. Путь принимается жестким в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях. Движение считается квазистатическим, т. е. установившимся с точки зрения колебаний. Физические параметры всей механической системы известны. Электровоз имеет трехосные тележки, максимальная скорость движения в кривых принята в расчетах 100 км/ч.

Целями расчетных исследований являются составление расчетной схемы и математической модели динамического вписывания экипажа в кривую, оценка направляющих сил, действующих на тележку, построение графиков этих сил в функции скорости и определение основных критериев безопасности движения.

Расчеты представлены для геометрического и квазистатического вписывания экипажа в круговую кривую. Геометрическое вписывание выполнено для этих же радиусов кривых параболическим способом [2] при наибольших и альбомных зазорах в контакте «колесо – рельс» (с учетом уширения Δ). При этом определялись смещения средней колесной пары тележки и углы поворота продольной оси тележек относительно оси кузова. Результаты построений и анализа приведены в таблицах 1 и 2.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Параметры геометрического вписывания электровоза ЭП2К в кривых малого радиуса

Параметры Радиус, м		φ , рад	φ_1 , рад	Y_1 , м	Y_2 , м	Y_2 , м	f_l , м
1	200	0,020	–	$(2\sigma+\Delta)$	0,012	0,00	–
	250	0,020	–	$(2\sigma+\Delta)$	0,012	0,00	–
	300	0,019	–	$(2\sigma+\Delta)$	0,012	0,00	–
	350	0,017	–	$(2\sigma+\Delta)$	0,012	0,00	–
2	200	–	–	$(2\sigma+\Delta)$	0,0056	$(2\sigma+\Delta)$	0,013
	250	–	–	$(2\sigma+\Delta)$	0,0045	$(2\sigma+\Delta)$	0,012
	300	–	–	$(2\sigma+\Delta)$	0,0045	$(2\sigma+\Delta)$	0,011
	350	–	–	$(2\sigma+\Delta)$	0,0032	$(2\sigma+\Delta)$	0,0075

Таблица 2 – Смещения средней колесной пары и углы поворота продольной оси тележек электровоза ЭП2К относительно оси кузова в кривых малого радиуса

Параметры Радиус, м		f , м	Φ_1 , рад	Φ_2 , рад	Φ_T , рад	Δ_x , м	$\Delta_{пор}$, м	$\Delta_{пр}$, м	$S_{пр}$, кН	$S_{пор}$, кН
200	По оси пути	0,066	0,038	0,0031	0,012	0,041	0,016	0,0124	5,602	5,602
	Сдвиг – 60 мм	0,005	0,033	0,00002	0,012	0,0035	0,00001	0,011	2,533	2,533
250	По оси пути	0,053	0,030	0,00197	0,0099	0,033	0,00099	0,099	4,904	4,904
	Сдвиг – 60 мм	0,007	-0,042	0,00004	0,0099	-0,0046	0,00002	-0,014	2,095	2,095
300	По оси пути	0,044	0,025	0,0014	0,00833	0,028	0,00069	0,082	4,087	4,087
	Сдвиг – 60 мм	-0,016	0,009	0,00019	0,00833	0,010	0,00009	-0,030	1,511	1,511
350	По оси пути	0,038	0,021	0,001	0,00714	0,024	0,00051	0,071	3,503	3,503
	Сдвиг – 60 мм	-0,022	-0,013	0,00004	0,00714	-0,014	0,00018	-0,042	3,065	3,065
400	По оси пути	0,033	0,019	0,00077	0,00625	0,021	0,00038	0,062	0,694	0,694
	Сдвиг – 60 мм	-0,027	-0,016	0,00053	0,00625	-0,017	0,00026	-0,051	0,487	0,487

В таблицах 1 и 2 приняты следующие обозначения:

f – смещение оси шкворней от оси пути внутрь, к центру кривой, м;

Φ_1 – угол поворота продольной тяги, рад;

Φ_2 – угол поворота рычагов шкворней, рад;

Φ_T – угол поворота продольной оси тележки относительно оси пути, рад;

$\Delta_{пор}$ – поперечное смещение пружин центрального подвешивания на тележке, м;

$\Delta_{пр}$ – продольное смещение пружин центрального подвешивания на тележке, м;

$S_{пр}$ – продольная сила в тягах (механизма передачи сил тяги – МПСТ), кН;

$S_{пор}$ – поперечная сила в тягах МПСТ, кН.

Квазистатическим считается движение тележки электровоза в круговой кривой с постоянной скоростью. При этом представляются три возможных положения [3, 4] тележки в колее: наибольший перекося (НП), свободная установка (СУ) и хордовая (Хорд.). Различие этих положений характеризуется тем, как располагается в колее последняя колесная пара. В первом случае гребень прижат к головке внутреннего рельса и воспринимает направляющую силу Y_3 . Во втором – гребни колес этой колесной пары не воспринимают направляющих сил, а могут только соприкасаться с головками рельсов. В третьем положении гребень колеса начинает воспринимать направляющую силу Y_3 со стороны наружного рельса.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для количественной оценки направляющих сил составлена расчетная схема, представленная на рисунке 1.

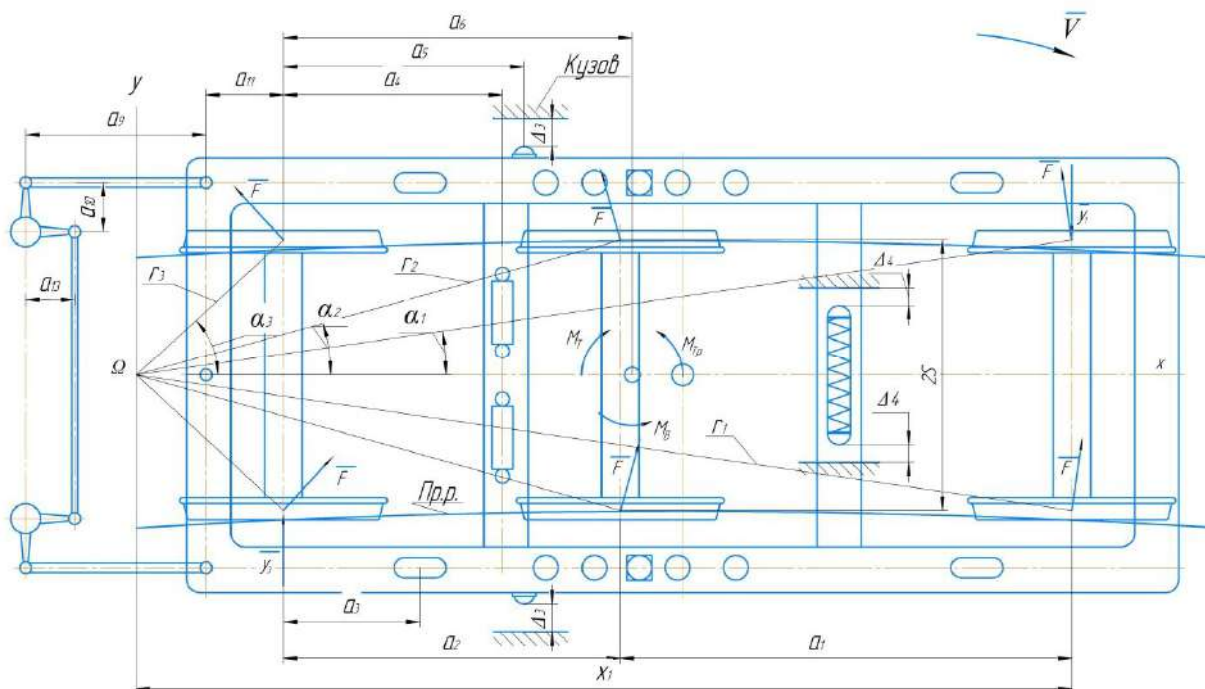


Рисунок 1 – Расчетная схема движения тележки в кривой (положение наибольшего перекоса в рельсовой колее)

На расчетной схеме (см. рисунок 1) и далее в уравнения приняты следующие обозначения:

M_k, m_T, m_{kp} – массы кузова, рамы тележки и колесной пары соответственно;

Y_1, Y_3 – направляющие силы первой и третьей колесных пар соответственно, кН;

Π – эквивалентная центробежная сила, действующая на тележку, кН;

T – эквивалентная тангенциальная сила, возникающая из-за возвышения наружного рельса над внутренним, от действия силы тяжести, приходящейся на тележку, кН.

F – сила трения скольжения колеса по головке рельса, ($F_{Tp} = \mu P_k$), кН;

P_k – сила статического вертикального воздействия колеса на рельс, кН;

M_{Tp}, M_g – моменты сил трения между кузовом и рамой тележки и возвращающих устройств;

R – радиус круговой кривой, м;

$2S$ – расстояние между кругами катания, м;

$2a$ – колесная база тележки, м;

H – возвышение наружного рельса над внутренним, м;

r_1, r_2, r_3 – расстояние от полюса поворота до точки опоры каждого колеса на головку рельса, м;

x_1 – полюсное расстояние, м;

n_2 – число колесных пар в тележке;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – углы между продольной осью тележки и радиусом, соединяющим полюс поворота с точкой опоры каждого колеса на рельс;

μ – коэффициент трения скольжения ($\mu = 0,25$);

Δ – дополнительное уширение колеи, м;

V – скорость движения, км/ч.

На расчетной схеме (см. рисунок 1) представлены силы, как угодно расположенные на плоскости.

По расчетной схеме составлена математическая модель, т. е. система уравнений, решение которой дает результаты расчетов направляющих сил, действующих со стороны пути (головок рельсов). Система алгебраических уравнений имеет вид:

$$\sum F_x = 0; \quad (1)$$

$$-Y_1 + Y_2 + C - T / 2 + 2 \cdot F \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3) = 0; \quad (2)$$

$$-Y_1 \cdot x_1 + Y_2 \cdot (X_1 - \alpha) + M_{Tp} + M_g + 2 \cdot F(r_1 + r_2 + r_3) = 0. \quad (3)$$

Система уравнений составлена для положения наибольшего перекоса с учетом направляющих сил, действующих на крайние колесные пары. Чтобы использовать эти уравнения и для других положений тележки в колее, необходимо учесть, что в общем случае имеется четыре неизвестных: положение тележки в колее, зависящее от x_1 – полюсного расстояния; направляющие силы первой и последней колесных пар; скорости движения тележки в кривой. Решение этой системы уравнений возможно в следующем порядке. Определяются граничные скорости движения в кривой, когда происходит переход из одного положения в следующее. Это связано со скоростью движения, так как она определяет центробежные силы, действующие на все конструктивные элементы тележки. В результате расчетов получим граничные скорости движения перехода от наибольшего перекоса к свободной установке и далее к хордовой.

Условия для определения граничных скоростей аналогичны: принимаются значения направляющих сил последней колесной пары, равные нулю. Одновременно принимаются значения полюсных расстояний x_1 для положения наибольшего перекоса и, соответственно, для хордовой установки, в результате получим граничные скорости V_1 и V_2 . При построении графиков направляющих сил как функций скорости **уже будем** иметь четыре точки будущих линий графиков. В зависимости от значений этих скоростей осуществляется дальнейшее действие по расчету направляющих сил для всех положений тележки в колее. При решении данной задачи возможен вариант, когда граничная скорость V_1 является мнимой. Это означает, что положения наибольшего перекоса для этих исходных значений всех параметров не существует. Следовательно, для расчетов остаются свободная и хордовая установки.

Для каждого положения тележки в колее разрабатывается программное вычисление величин исходя из условий решения системы в общем случае (в буквенных обозначениях). Результаты представляются в виде графиков, построенных с помощью математических программ или другим методом.

Квазистатический способ вписывания экипажа в кривую позволяет определять силы взаимодействия в первую очередь для крайних колесных пар. Как правило, деформация упругих связей между кузовом и рамой тележки в поперечном направлении не учитывается. Оцениваются обычно направляющие силы всей тележки по крайним колесным парам. При выполнении расчетов в данном случае определялись возможности силового взаимодействия гребня средней колесной пары с головкой наружного рельса. Для этого рассматривалась схема возможных перемещений элементов электровоза в поперечном направлении. Схема приведена на рисунке 2, где обозначены поперечные перемещения соответственно: u_k – кузова; u_r – рамы тележки; y_1 – первой колесной пары; y_2 – второй колесной пары; y_3 – третьей колесной пары.

Указанные взаимные перемещения появляются за счет поперечной упругости связей. Вычисление этих перемещений позволяет сделать предварительную физическую оценку происходящих процессов. Во-первых, крайние колесные пары при жестком пути сразу прижаты к головкам наружных рельсов. Во-вторых, рама тележки, перемещаясь к наружному рельсу за счет центробежной силы (с «помощью» кузова), начинает деформировать рессорное подвешивание. По этой причине возникает воздействие на колесные пары с тяговыми электродвигателями (ТЭД), прижимая их к наружному рельсу.

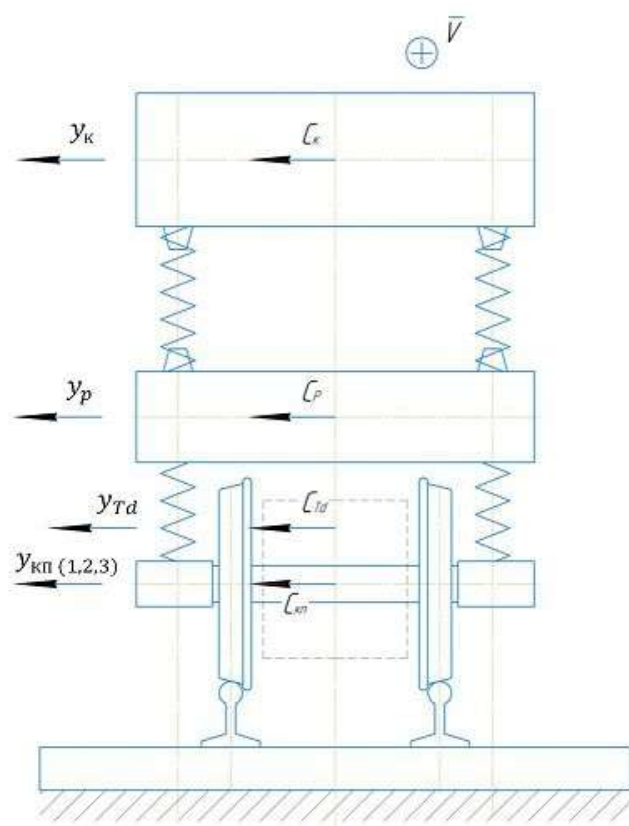


Рисунок 2 – Схема поперечных перемещений элементов тележки и кузова

Воздействие кузова на раму тележки действительно способствует увеличению силовой нагрузки.

Целью настоящего анализа является определение направляющей силы воздействия на вторую колесную пару. Необходимо при этом доказать, что вторая колесная пара действительно будет передавать силу на головку наружного рельса.

Особенностью второй колесной пары тележек электровоза ЭП2К является то, что колесная пара в буксах имеет относительно свободный поперечный разбег (± 14 мм). При нахождении колесной пары в кривой имеется дополнительный зазор между гребнем и головкой рельса, который рассчитывается в зависимости от радиуса кривой R и колесной базы тележки.

Расчет направляющих сил при хордовой установке тележки в кривой с изменением знака направляющей силы для оценки перемещения и сил взаимодействия между элементами электровоза ЭП2К проводится по схеме, приведенной на рисунке 1.

В связи с обозначенным для средней колесной пары перемещением возникает условие, когда сумма всех перемещений этой колесной пары станет больше нуля с учетом свободного разбега и зазора, зависящего от радиуса кривой.

Расчеты показывают, что формирование направляющих сил для всех колесных пар определяется главным образом центробежными силами, которые зависят от скорости движения и радиуса кривой. Соотношение их с другими силами представлено на графиках рисунка 3.

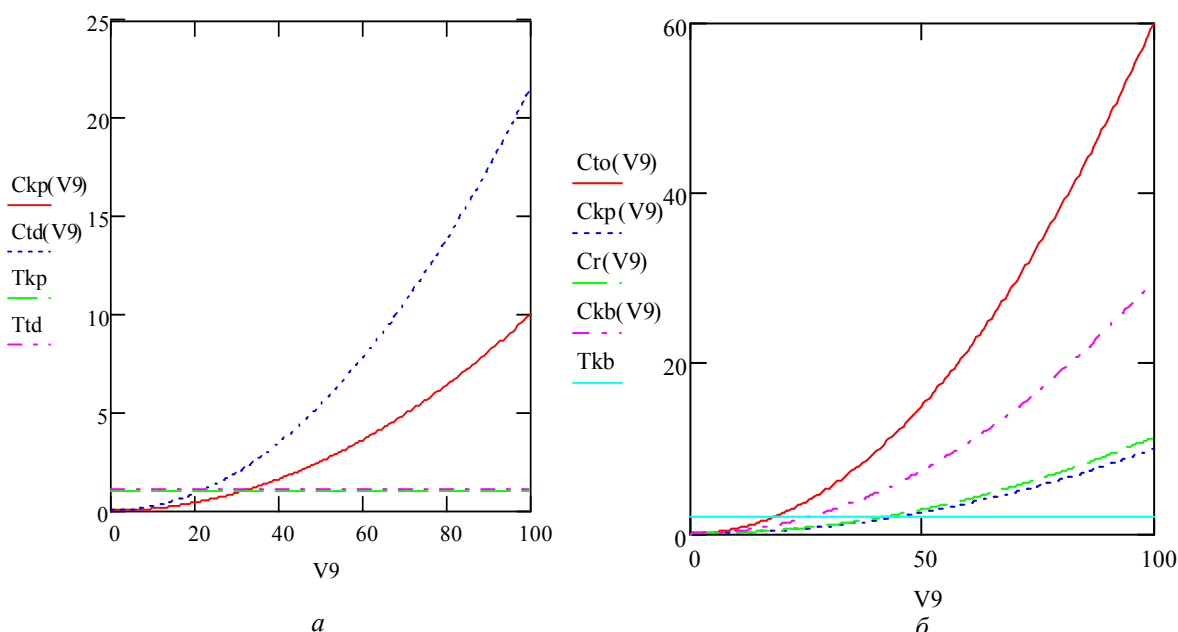


Рисунок 3 – Центробежные и тангенциальные силы элементов электровозов
(кр – колесной пары, td – ТЭД, r – рамы тележки, kb – колесно-моторного блока)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Решение системы уравнений при определении граничных скоростей V_1 и V_2 сводится к вычислению скорости V , направляющей силы для первой колесной пары (направляющая сила третьей колесной пары равна нулю) и соответствующих значений x_1 : для наибольшего перекоса и хордовой установки. Результаты расчетов V_1 и V_2 , выбранных для анализа параметров кривых, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет граничных скоростей V_1 и V_2

Положение Кривая		Наибольший перекос			Свободная установка	Хордовая установка		
Радиус	Зазор	Y_3 , кН	Y_1 , кН	V_1 , км/ч	—	V_2 , км/ч	Y_1 , кН	Y_3 , кН
200	max	0	84.909	19.06 i	—	71.485	84.707	0
	min	0	84.909	19.06 i	—	71.485	84.707	0
250	max	0	90.406	42.72 i	—	79.829	84.418	0
	min	0	79.391	40.579	—	79.829	84.418	0
300	max	0	99.869	49.95 i	—	87.391	84.230	0
	min	0	79.277	44.68	—	87.391	84.230	0
350	max	0	91.859	51.07 i	—	94.438	84.081	0
	min	0	79.674	60.92	—	94.438	84.081	0

Из анализа данных таблицы 3 следует, что для больших зазоров в колее положения наибольшего перекоса для выбранных радиусов кривых **не существует**, так как значение первой граничной скорости V_1 представляет собой мнимое число. Граничная скорость V_2 и направляющие силы Y_1 и Y_3 зависят только от радиуса кривой, а от зазора в колее не зависят (см. таблицу 3). При этом значение граничной скорости V_2 пропорционально радиусу кривой (в этих условиях движения).

Расчеты показали, что при действии только центробежных сил даже для $R = 200$ м перемещение средней колесной пары в пределах зазоров могло бы проходить и далее, деформируя рельс, при условии, что путь упругий. Так как при решении этой задачи путь принят жестким, то тележка переходит в несколько другое положение хордовой установки при действии направляющих сил на все колесные пары. При этом направляющие силы могут перераспределяться по своим значениям. Конструкцией предусмотрено разное расстояние крайних колесных пар от средней ($a_2 = 1950$ и $a_1 = 2650$ мм). Поэтому направляющие силы и становятся действующими на первую и вторую колесные пары. Пример для одного из вариантов расчетов для направляющих сил приведен на рисунке 4.

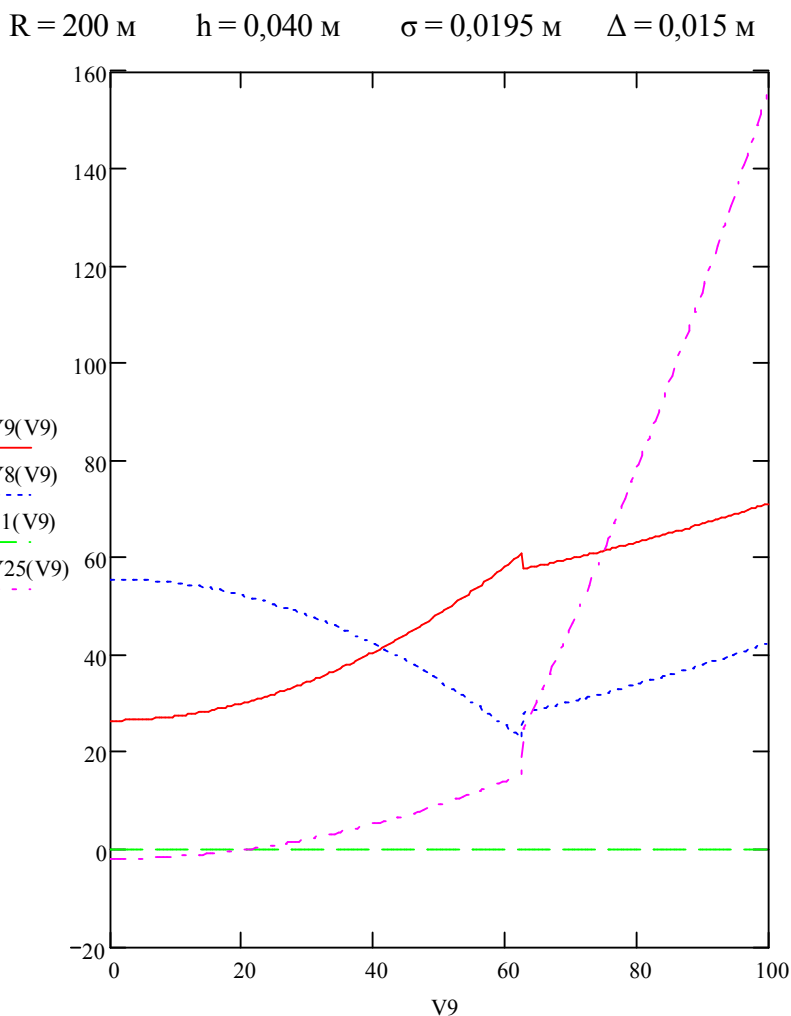


Рисунок 4 – Направляющие силы первой Y_1 (Y_9), второй Y_2 (Y_{25}) и третьей Y_3 (Y_8) колесных пар

На основании выполненных расчетов и анализа графиков, представленных на рисунке 4, можно сделать следующие выводы.

1. В классической методике решения такой задачи (квазистатический способ) не представляется возможности оценить взаимодействие второй колесной пары с головкой рельса для трехосной тележки.

2. Оценка направляющей силы для второй колесной пары проведена с учетом поперечной упругости рессорного подвешивания. При этом силы, действующие на раму тележки и колесные пары, позволяют второй колесной паре прижиматься к головке наружного рельса.

3. Значения направляющей силы, действующей на вторую колесную пару, сопоставимы со значениями усилий воздействия на первую и третью колесные пары, а в некоторых вариантах даже превышают их.

Список литературы

1. Приказ Минтранса РФ от 21 декабря 2010 г. № 286 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями) // base.garant.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://base.garant.ru/55170488/> (дата обращения: 20.06.2022).

2. Николаев, И. И. Динамика локомотивов / И. И. Николаев. – Москва : Транспорт, 1962. – 319 с. – Текст : непосредственный.

3. Ушкалов, В. Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько. – Киев : Наукова думка, 1982. – 359 с. – Текст : непосредственный.

4. Медель, В. Б. Подвижной состав электрических железных дорог: конструкция и динамика / В. Б. Медель. – Москва : Транспорт, 1974. – 232 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Prikaz Mintransa RF ot 21 dekabria 2010 g. N 286 «Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii» (s izmeneniiami i dopolneniiami)* (Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 286 dated December 21, 2010 "On Approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation" (with amendments and additions)), Available at: <https://base.garant.ru/55170488/> (accessed 20.06.2022).

2. Nikolaev I. I. *Dinamika lokomotivov* (Locomotive dynamics). Moscow: Transport Publ., 1962, 319 p.

3. Ushkalov V. F., Reznikov L. M., Red'ko S. F. *Statisticheskaya dinamika rel'sovykh ekipazhei* (Statistical dynamics of rail crews). Kyiv: Naukova dumka Publ., 1982, 359 p.

4. Medel V. B. *Podvizhnoi sostav elektricheskikh zheleznykh dorog: konstruktsiia i dinamika* (Rolling stock of electric railways: design and dynamics). Moscow: Transport Publ., 1974, 232 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галиев Ильхам Исламович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galiev Ilkham Islamovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: Prezident@omgups.ru

Ушак Виктор Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: UshakVN@omgups.ru

Ushak Viktor Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: UshakVN@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Галиев, И. И. Особенности взаимодействия экипажа и пути при движении электровоза ЭП2К в кривых малого радиуса / И. И. Галиев, В. Н. Ушак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 108 – 116.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Galiev I. I., Ushak V. N. Features of the interaction of the crew and the path when movement of the EP2K electric locomotive in small radius curves. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 2 (50), pp. 108-116 (In Russian).

УДК 629.424.15:629.4.016.015

С. М. Овчаренко¹, И. С. Ринг¹, С. С. Овчаренко²

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

²Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОВОЗОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. Надежность работы тепловозного дизеля в значительной степени зависит от его температурных режимов. Стабильность температурных режимов должна обеспечивать система охлаждения, которая регулирует отвод тепла от охлаждающей жидкости в зависимости от ее температуры и режима работы дизеля. В процессе эксплуатации при существующих алгоритмах работы штатных систем охлаждения наблюдаются существенные перепады температуры охлаждающей жидкости за довольно короткие интервалы времени. Это негативно сказывается на надежности работы дизеля. На различных сериях тепловозов система регулирования работы вентиляторов холодильника может существенно различаться. Для регулирования потока воздуха через секции холодильника применяется алгоритм включения или выключения определенного количества мотор-вентиляторов или изменения потока масла через гидромашину аксиально-поршневого типа, или регулирования уровня масла в гидротрансформаторе. Для разработки алгоритма управления работой системы охлаждения с целью стабилизации температурных режимов необходимо изучить процессы, реализуемые в эксплуатации.

В статье приведены результаты исследования температурных колебаний охлаждающей жидкости в процессе эксплуатации тепловозов. По результатам исследования установлены реализуемые скорости увеличения и уменьшения температуры охлаждающей жидкости с учетом инерционности процесса. Установлено, что штатные системы охлаждения не допускают превышения установленных ограничений, но не исключают значительных перепадов температуры охлаждающей жидкости при смене режима работы дизеля. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования управления теплообменными процессами с целью стабилизации температурных режимов дизеля, что позволит повысить надежность его работы.

Ключевые слова: тепловозный дизель, система охлаждения, температура охлаждающей жидкости, теплообменный процесс, режим работы дизеля.

Sergey M. Ovcharenko¹, Ivan S. Ring¹, Sergey S. Ovcharenko²

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

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), St. Petersburg, the Russian Federation

INVESTIGATION OF TEMPERATURE MODES OF OPERATION OF DIESEL LOCOMOTIVE COOLING SYSTEMS DURING OPERATION

Abstract. The reliability of diesel locomotive operation largely depends on its temperature conditions. The stability of temperature conditions should be provided by the cooling system, which regulates the heat removal from the coolant depending on its temperature and the operating mode of the diesel engine. During operation, with the existing algorithms for the operation of standard cooling systems, significant temperature drops of the coolant are observed over fairly short time intervals. This negatively affects the reliability of the diesel engine. On different series of diesel locomotives, the system for regulating the operation of refrigerator fans may differ significantly. To regulate the air flow through the refrigerator sections, an algorithm is used to turn on or off a certain number of motor fans or to change the oil flow through an axial piston type hydraulic machine, or to regulate the oil level in a torque converter. To develop an algorithm for controlling the operation of the cooling system in order to stabilize temperature conditions, it is necessary to study the processes implemented in operation. The article presents the results of the study of temperature fluctuations of the coolant during the operation of locomotives. According to the results of the study, the realizable rates of increase and decrease in the temperature of the coolant, taking into account the inertia of the process, are established. It has been established that standard cooling systems do not allow exceeding the established limits, but do not exclude significant changes in the temperature of the coolant when changing the operating mode of the diesel engine. The obtained results can be used to improve the management of heat exchange processes in order to stabilize the temperature conditions of the diesel engine, which will increase the reliability of its operation.

Keywords: diesel locomotive, cooling system, coolant temperature, heat exchange process, diesel operating mode.

Использование на тепловозе дизель-генераторной установки в качестве источника энергии предполагает наличие системы охлаждения (рисунок 1), на работу которой затрачивается до 10 % выработанной энергии.

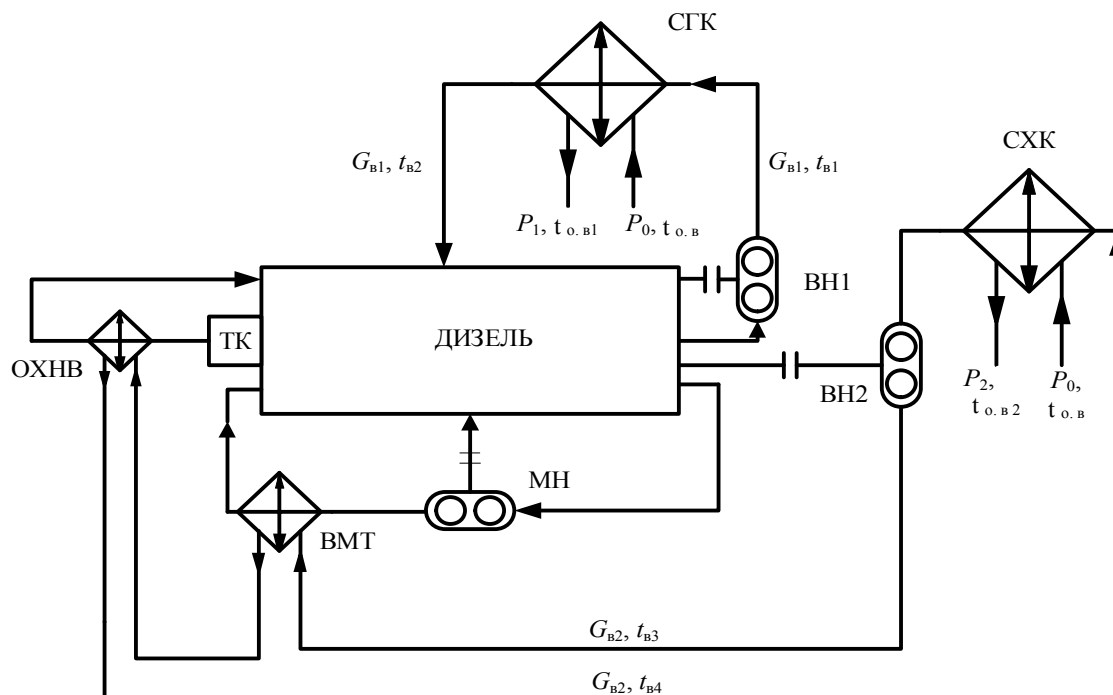


Рисунок 1 – Расчетная схема системы охлаждения тепловоза ТЭМ18ДМ: ОХНВ – охладитель наддувочного воздуха; ТК – турбокомпрессор; БМТ – водомасляный теплообменник; СГК – секции горячего контура; СХК – секции холодного контура; ВН – водяной насос; МН – масляный насос; G – расход воды; t – температура воды; P – расход воздуха; $t_{o.в}$ – температура охлаждающего воздуха

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для анализа использовались поездки как в теплый период года (лето), так и в холодный период (зима). Стабильность поддержания температурного режима дизеля оценивалась по таким параметрам, как количество случаев повышения и понижения температуры охлаждающей жидкости, разница температур в начале и в конце интервала, скорость повышения (снижения) температуры, данные параметры отслеживались и фиксировались бортовой системой тепловоза по температуре охлаждающей жидкости с дискретностью в одну минуту. Следует отметить, что инерционность процессов нагрева и охлаждения охлаждающей жидкости вносит дополнительные сложности в обеспечение стабильности поддержания температурного режима. В зависимости от режима работы дизель-генераторной установки (ДГУ) в охлаждающую жидкость выделяется различное количество теплоты, кДж/ч:

$$Q = 0,01 \cdot q_v \cdot Q_d, \quad (1)$$

где q_v – теплоотвод в охлаждающую жидкость дизеля, %.

Количество тепла, вводимого в дизель с топливом, определяется по выражению, кДж/ч:

$$Q_d = b_e \cdot N_e \cdot H_u, \quad (2)$$

где b_e – удельный расход топлива дизелем, кг/(кВт · ч); N_e – эффективная мощность дизеля, кВт; H_u – низшая теплота сгорания дизельного топлива, кДж/кг.

При механическом приводе частота вращения вентилятора холодильника пропорциональна частоте вращения коленчатого вала дизеля. При повышении позиции контроллера машиниста и увеличении тепла, отводимого в охлаждающую жидкость, увеличиваются частота вращения вентилятора и скорость воздуха, проходящего через секции охлаждения. По этой причине увеличивается и количество тепла, отводимого от охлаждающей жидкости в окружающую среду, кДж/ч:

$$Q_v = 0,5 \cdot F \cdot K \cdot z_g \cdot (t_1 + t_2 - t_{o.v1} - t_{o.v2}), \quad (3)$$

где F – общая поверхность теплообмена, м²; K – коэффициент теплопередачи, кДж/(м² · ч · К); z_g – число секций горячего контура; t_1 – температура воды на выходе из дизеля, °С; t_2 – температура воды на выходе из системы охлаждения, °С; $t_{o.v1}$ – температура воздуха перед секциями, °С; $t_{o.v2}$ – температура воздуха после прохождения воздуха через секции охлаждения, °С;

Частые изменения режима работы ДГУ, особенно маневровых тепловозов (рисунок 3), приводят к значительному количеству перепадов температуры охлаждающей жидкости за поездку.

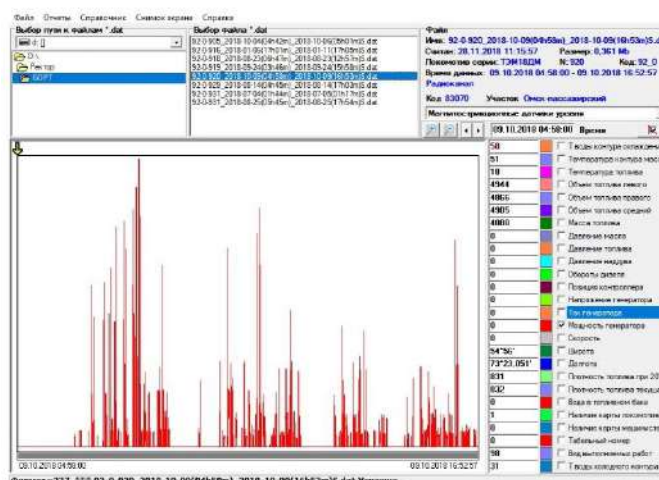


Рисунок 3 – Рисунок 3 – Реализация мощности ДГУ за поездку с системой «БОРТ» разработки НИИТКД, г. Омск

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Фрагмент нескольких поездок с параметрами работы системы охлаждения приведен в таблице. В статье представлены результаты обработки, полученные по итогам 50 поездок.

Характеристика температурных режимов маневровых тепловозов серии ТЭМ18 ДМ за поездку

Номер поездки	Кол-во интервалов интенсивного повышения температуры	Кол-во интервалов интенсивного понижения температуры	Диапазон изменения температуры, °С
1	10	12	46 – 89
2	7	11	55 – 87
3	10	12	46 – 89
4	8	8	49 – 82
5	12	13	50 – 81
6	7	13	48 – 79

Как показывает опыт эксплуатации тепловозов, повышенный износ деталей цилиндро-поршневой группы и возникновение трещин по адаптерным отверстиям во многом определяются температурными перепадами между внутренней и наружной стенками цилиндровой втулки [10]. Поэтому для повышения надежности работы деталей цилиндропоршневой группы важно обеспечить стабильность температурного режима. В процессе исследования по результатам анализа параметров температуры охлаждающей жидкости тепловозов ТЭМ18ДМ установлены скорости повышения и снижения температуры охлаждающей жидкости при стохастическом характере формирования режимов работы ДГУ тепловоза и штатном алгоритме работы системы регулирования температуры охлаждающей жидкости. Периоды повышения и снижения температуры охлаждающей жидкости аппроксимировались линейными уравнениями (рисунок 4), что позволило сформировать массив коэффициентов, характеризующих реализованные скорости изменения температуры в реальных условиях эксплуатации. Следует уточнить, что полученные уравнения описывают изменение температуры охлаждающей жидкости в интервале изменения от 50 до 90 °С.

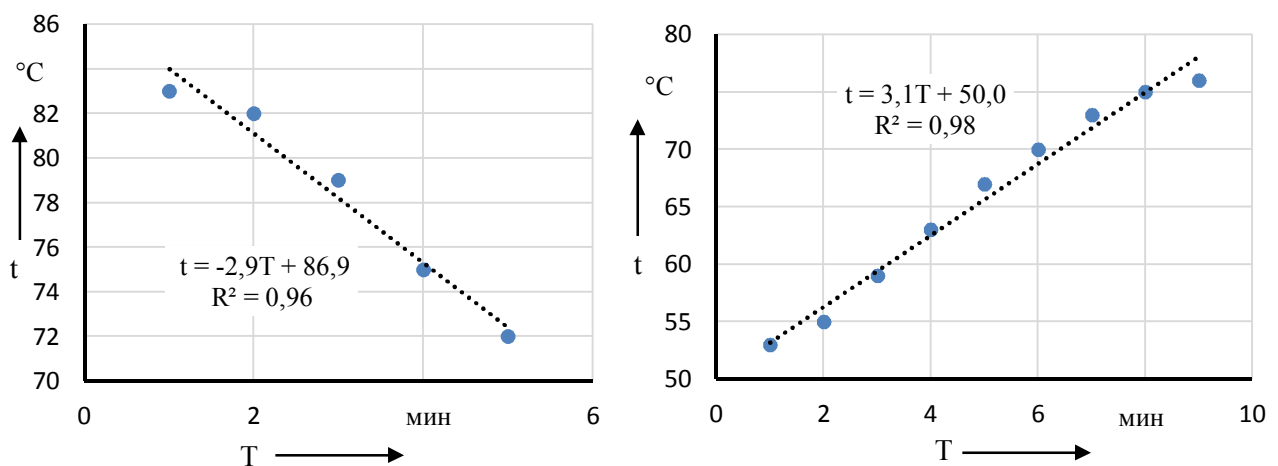


Рисунок 4 – Пример аппроксимации увеличения и уменьшения температуры охлаждающей жидкости

Несогласованность интенсивности поступления тепла в охлаждающую жидкость и тепла, отводимого из охлаждающей жидкости, приводит к росту или снижению температуры охлаждающей жидкости. Скорость изменения температуры будет определяться несколькими факторами, такими как температура окружающего воздух, режим работы ДГУ, скорость вращения вентиляторов и т. д. На рисунке 5 представлено распределение скоростей увеличения и снижения температуры охлаждающей жидкости при различных режимах работы ДГУ и внешних условий.

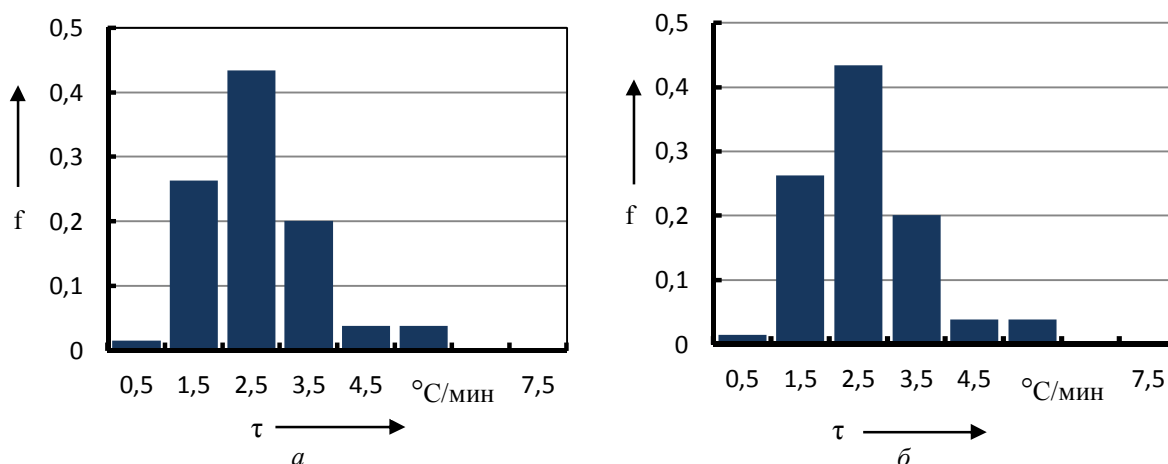


Рисунок 5 – Распределение скорости температуры охлаждающей жидкости:
 а – математическое ожидание скорости увеличения температуры – 2,63 °C/мин; $\sigma = 1,00$ °C/мин;
 б – математическое ожидание скорости снижения температуры – 2,58 °C/мин; $\sigma = 1,04$ °C/мин

Для стабилизации температуры охлаждающей жидкости должно соблюдаться условие:

$$\int_{T_1}^{T_2} Q dT = \int_{T_1}^{T_2} Q_{\text{с}} dT. \quad (4)$$



Рисунок 6 – Пример схемы формирования алгоритма управления стабилизацией температурного режима

При стабилизации процессов отвода тепла в охлаждающую жидкость и отвода тепла от охлаждающей жидкости это условие может соблюдаться. Однако специфика реализации режимов работы тепловозного дизеля и системы охлаждения существенно рассогласована, что и приводит к наличию интервалов интенсивного повышения и понижения температуры охлаждающей жидкости.

Инерционность реагирования существующих систем охлаждения может быть компенсирована применением интеллектуальных систем управления режимами работы систем охлаждения, учитывающих прогнозные значения температуры охлаждающей жидкости при реализации заданного режима работы дизеля.

В качестве исходных данных для формирования управляющего воздействия на работу системы охлаждения необходимо принять: текущий режим работы дизеля (позиция контроллера машиниста, нагрузка или холостой ход), текущую температуру охлаждающей жидкости, температуру окружающей среды, установленные ограничения по верхней и нижней границам температуры охлаждающей жидкости. Схема формирования алгоритма управляющего воздействия (частота вращения вентилятора, открытие или закрытие жалюзи, скорость течения охлаждающей жидкости) должна предусматривать инерционность процессов нагрева или охлаждения

жидкости (рисунок 6). Данная схема представлена на примере тепловоза ТЭМ18ДМ, но применима для любых локомотивов, использующих в качестве силовой установки ДГУ.

Нестабильность температурных режимов, которая наблюдается при работе ДГУ тепловозов в процессе эксплуатации, несомненно требует более детального изучения тепловых процессов и разработки технологии и алгоритмов работы системы регулирования температуры охлаждающей жидкости для стабилизации процессов и обеспечения оптимальных температурных режимов с целью повышения как экономичности работы тепловозов, так и надежности работы дизелей за счет уменьшения количества интенсивных перепадов температур и предотвращения возникновения связанных с ними неисправностей.

Результаты исследования, приведенные в статье, позволяют предварительно оценить процессы формирования температурных режимов системы охлаждения и использовать их для разработки модели управления стабилизации температурного режима, а также для совершенствования существующих алгоритмов управления температурными режимами.

Список литературы

1. Тепловоз 2ТЭ116 / С. П. Филонов, А. И. Гибалов, И. А. Черноусов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1977. – 320 с. – Текст : непосредственный.
2. Тепловоз 2ТЭ10М, 3ТЭ10М: Устройство и работа / С. П. Филонов, А. З. Зибиров, В. В. Ренкунас [и др.]. – Москва : Транспорт, 1986. – 288 с. – Текст : непосредственный.
3. Пассажирский тепловоз ТЭП70 / В. Г. Быков, Б. Н. Морошкин, Г. Е. Серделеви [и др.]. – Москва : Транспорт, 1976. – 232 с. – Текст : непосредственный.
4. Тепловоз ТЭМ18ДМ: Руководство по эксплуатации. – ЗАО «УК БМЗ», 2009 г. – Текст : непосредственный.
5. Балагин, О. В. Контроль загрязнения радиаторных секций тепловозов / Балагин О. В. – Текст : непосредственный // Материалы всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием. Красноярск : Филиал Иркутского гос. ун-та путей сообщения, 2005. – С. 55.
6. Балагин, О. В. Определение максимально допустимого количества загрязненных радиаторных секций в системе охлаждения тепловоза / О. В. Балагин. – Текст : непосредственный // Молодежь наука, творчество-2005 : материалы науч.-практ. конф. – Омск : Омский гос. ин-т сервиса, 2005. – С. 234.
7. Выбор рациональных параметров оребренной трубы для теплообменных аппаратов вязких жидкостей ДВС транспортных машин / Ю. А. Куликов, А. В. Гончаров, А. Г. Ажиппо, Т. А. Оробцов. – Текст : непосредственный // Вестник национального транспортного университета. – Киев : Национальный транспортный университет, 2012. – № 25. – С. 99–102.
8. Рубан, И. Н. Исследование причин отказов цилиндропоршневой группы среднеоборотных двигателей / И. Н. Рубан, В. П. Булгаков. – Текст : непосредственный // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2020. – № 3. – С. 64–70.
9. Гогричиани, Г. В. Метод расчета вероятности перегрева теплоносителей систем охлаждения тепловозных дизелей / Г. В. Гогричиани, А. В. Горин. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – №1. – С. 60–66.
10. Влияние режимов эксплуатации на ресурс дизельных двигателей / Ж. А. Алиев, И. А. Пак, Т. М. Мухтаров, М. К. Турдыбеков. – Текст : непосредственный // Международный журнал экспериментального образования. – 2017. – № 1. – С. 52–56.

References

1. Filonov S.P., Gibalov A.I., Chernousov I.A., etc. *Teplovoz 2TE116* (Diesel locomotive 2TE116). Moscow : Transport Publ., 1977, 320 p. (In Russian).
2. Filonov S.P., Zibirov A.Z., Renkunas V.V., etc. *Teplovoz 2TE10M, 3TE10M: Ustroistvo i rabota* (Diesel locomotive 2TE10M, 3TE10M: Device and work). Moscow: Transport Publ., 1986, 288 p. (In Russian).
3. Bykov V.G., Moroshkin B.N., Serdelevi G.E., etc. *Passazhirskii teplovoz TEP70* (Passenger diesel locomotive TEP70). Moscow: Transport, 1976, 232 p. (In Russian).
4. TEM18DM diesel locomotive: Operation Manual. CJSC «BMZ Management Company», 2009 (In Russian).
5. Balagin O.V. Pollution control of radiator sections of locomotives. Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. Branch of Irkutsk State University of Railways. Krasnoyarsk, 2005, p. 55 (In Russian).

6. Balagin O.V. Determination of the maximum permissible number of contaminated radiator sections in the cooling system of a locomotive. *Molodezh' nauka, tvorchestvo-2005 : materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii* («Youth science, creativity-2005»: materials of scientific and practical conference). Omsk State Institute of Service. Omsk, 2005, p. 234 (In Russian).

7. Kulikov Yu.A., Goncharov A.V., Azhippo A.G., Orobtsov T.A. The choice of rational parameters of a finned pipe for heat exchangers of viscous liquids of internal combustion engines of transport vehicles. *Vestnik natsional'nogo transportnogo universiteta – Bulletin of the National Transport University*, 2012, no. 25, pp. 99-102.

8. Ruban I.N., Bulgakov V.P. Investigation of the causes of failures of the cylinder-piston group of medium-speed engines. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya – Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology*, 2020, no. 3. pp. 64-70 (In Russian).

9. Gogrichiani G.V., Gorin A.V. Method of calculating the probability of overheating of coolant cooling systems of diesel locomotives. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*, 2013, no. 1, pp. 60-66 (In Russian).

10. Aliyev J. A., Pak I. A., Mukhtarov T. M., Turdybekov M. K. The influence of operating modes on the resource of diesel engines. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniia – International Journal of Experimental Education*, 2017, no. 1, pp. 52-56 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Овчаренко Сергей Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Ректор ОмГУПСа, заведующий кафедрой «Локомотивы».

Тел.: +7 (9609) 83 -75-89.

E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

Ринг Иван Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (913) 660-22-87

E-mail: ring088@yandex.ru

Овчаренко Сергей Сергеевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, Россия, 190031.

Аспирант кафедры «Локомотивы», ПГУПС.

Тел.: +7 (911) 155-14-95.

E-mail: ss211090@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Овчаренко, С. М. Исследование температурных режимов работы систем охлаждения тепловозов в процессе эксплуатации / С. М. Овчаренко, И. С. Ринг, С. С. Овчаренко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 116 – 123.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ovcharenko Sergey Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Rector Of OSTU, head of the department of «Locomotives».

Phone: +7 (9609) 83 -75-89.

E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

Ring Ivan Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student at the Department of «Locomotives» OSTU.

Phone: +7 (913) 660-22-87

E-mail: ring088@yandex.ru

Ovcharenko Sergey Sergeevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).

9, Moskovsky av., St. Petersburg, Russia, 190031.

Postgraduate student of the department «Locomotives», PGUPS.

Тел.: +7 (911) 155-14-95

E-mail: ss211090@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ovcharenko S. M., Ring I. S., Ovcharenko S. S. Investigation of temperature modes of operation of diesel locomotive cooling systems during operation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 116-123 (In Russian).

В. В. Томилов¹, О. А. Сидоров¹, С. М. Утепбергенова²

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

²АО «Академия логистики и транспорта», г. Алматы, Республика Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯГОВОГО ТОКА ВДОЛЬ ПОЛОЗА ТОКОПРИЕМНИКА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. Резистивный нагрев полоза токоприемника, обусловленный протеканием тягового тока по токопроводящим элементам верхнего узла, имеет неравномерное распределение вдоль конструкции каркаса и зависит от места расположения контактного провода на вставке. Целью работы является разработка математической модели расчета потерь мощности в полозе токоприемника, позволяющая оценить ее величину с учетом зигзага контактного провода при движении электроподвижного состава. Предметом исследования является полость токоприемника. В работе приведен пример расчета каркасного полоза токоприемника, оснащенного угольными вставками. Экспериментальные исследования распределения тока по шунтам полоза в зависимости от положения контактного провода выполнены в феврале 2021 г. в лаборатории «Конструкции контактных сетей, линий электропередачи и устройств токосъема» с использованием комплекса для испытания устройств токосъема. Расчет величины мощности нагрева полоза определяется по закону Джоуля – Ленца. Результаты расчета показали, что максимальная величина мощности нагрева наблюдается при положении контактного провода в середине полоза, при этом места наибольших потерь, расположенных по его краям, – над местами крепления шунтов. Модель позволяет получить функциональную зависимость величины нагрева вдоль полоза. Полученные результаты распределения мощности нагрева полоза позволяют дополнить комплексную модель теплового состояния токоприемника, разработанную в Омском государственном университете путей сообщения с участием авторов статьи. Универсальность разработанной модели позволяет исследовать различные зигзаги контактного провода и оценивать влияние положения контактного провода в плане на распределение тягового тока по полозу в зависимости от мест установки шунтов и их количества.

Ключевые слова: токоприемник, полость, тяговый ток, моделирование, электроподвижной состав, мощность, сопротивление, шунт, зигзаг.

Valerii V. Tomilov¹, Oleg A. Sidorov¹, Sandugash M. Utepbergenova²

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

² Academy of logistics and transport, Almaty, Republic of Kazakhstan

STUDY OF THE TRACTION CURRENT DISTRIBUTION ALONG THE PANHEAD OF THE ROLLING STOCK PANTOGRAPH IN THE MOTION MODE

Abstract. Resistive heating of the pantograph head due to the flow of traction current through the conductive elements of the upper node, has an uneven distribution along the frame structure and depends on the location of the contact wire on the insert. The aim of the work is to develop a mathematical model for calculating power losses in the pantograph panhead, allowing to estimate its value, taking into account the zigzag of the contact wire during the movement of electric rolling stock. The subject of the study is the pantograph panhead. The paper gives an example of calculating the frame skid of a pantograph equipped with carbon strips. Experimental studies of the current distribution over the shunts of the panhead depending on the position of the contact wire were carried out in February 2021 in the laboratory "Designs of contact networks, power lines and current collection devices" using a complex for testing current collection devices. The calculation of the heating power of the panhead is determined by the Joule-Lenz law. The results of the calculation showed that the maximum heating power is observed when the contact wire is in the middle of the panhead, while the places of the greatest losses located along its edges are above the places where the shunts are attached. The model makes it possible to obtain a functional dependence of the heating value along the panhead. The obtained results of the skid heating power distribution make it possible to supplement the complex model of the thermal state of the pantograph developed at the Omsk State Transport University with the participation of the authors of the article. The versatility of the developed model makes it possible to investigate various zigzags of the contact wire and evaluate the effect on the distribution of traction current along the panhead, depending on the location of the shunts and their number.

Keywords: pantograph, pantograph head, traction current, modeling, electric rolling stock, power, resistance, shunt, stagger.

Существующая система электроснабжения напряжением 3,3 кВ характеризуется высокими значениями тягового тока, величины которых особенно высоки на грузовом и высокоскоростном железнодорожных составах. Тенденции к увеличению потребления электроэнергии подвижным составом обусловлены вводом электропоездов повышенной мощности для перевозки большего числа грузовых вагонов повышенной массы.

Потребление тягового электрического тока подвижным составом приводит к нагреву его токопроводящих элементов. При повышении температуры элементов токоприемника снижаются их прочностные характеристики, что приводит к увеличению износа контактных материалов – вставок, деформации каркаса полоза и, как следствие, к сокращению срока службы устройства токосъема. Перегрев элементов токоприемника может привести к их разрушению. Отсутствие превышения предельно допустимого нагрева материалов устройств токосъема обеспечивает их надежность и продолжительный срок службы. Мероприятия по обеспечению нормативного теплового режима устройств токосъема являются актуальными, и им посвящено много работ [1 – 5]. Для разработки конкретных технических решений необходимо глубокое понимание физики тепловых процессов в токоприемнике и в том числе его наиболее ответственного узла – полоза.

Основными причинами нагрева полоза токоприемника являются электрические потери мощности в контакте «провод – вставка» и резистивный нагрев полоза [12]. Под резистивным нагревом полоза понимается процесс, при котором тепловая энергия вырабатывается путем пропускания электрического тока через электропроводящие элементы полоза (вставки, каркас и подложка между ними). Многочисленные испытания токоприемников в лаборатории «Контактные сети, линии электропередачи и токосъема» Омского государственного университета путей сообщения позволяют сделать вывод об отсутствии значимого повышения температуры контактных элементов за счет трения двойного контактного провода МФ-95 и вставок (угольных и металлокерамических) без потребления тягового тока и без встречного набегающего потока воздуха от аэродинамической трубы. Нагрев условиями окружающей среды – температура воздуха и излучение солнца – носит относительный характер, в результате чего зарубежные методики оценки электрических характеристик токоприемников оценивают величину превышения температуры их элементов над температурой окружающей среды, а в отечественной практике учитываются стандартом [6], так как эти величины неуправляемые и запас прочности элементов должен быть соблюден для наиболее тяжелых условий эксплуатации.

Нагрев вставок и каркаса полоза токоприемника от переходного сопротивления в контакте к настоящему времени изучен в работах [7 – 11], оценка резистивного нагрева полоза указана в статьях сотрудников УрГУПС [12] и ВНИИЖТа [2]. Представленные математические модели токораспределения в полозе хорошо иллюстрируют распределение суммарной тепловой мощности полоза [2, 12] и его сопротивления [12] в зависимости от положения контактного провода, однако не показывают характер распределения мощности нагрева вдоль конструкции полоза. Действительно, при расположении контактного провода в середине полоза потери электроэнергии наибольшие (рисунок 5), но каково распределение потерь вдоль полоза, модели не дают ответа. Авторы работы [12], ссылаясь на анализ эпюр полей объемной плотности мощности резистивного нагрева полоза от собственных сопротивлений, лишь указывают на ее значительную часть вблизи мест подключения шунтов. Кроме того, указанные выше модели не учитывают влияния сопротивления шунтов.

Для определения максимума резистивной мощности полоза составлена расчетная схема определения сопротивления верхнего узла токоприемника (рисунок 1) с учетом принятых допущений: электрическое сопротивление полоза R_n представляет собой эквивалентное сопротивление вставок, подложки и каркаса; сопротивление R_n однородное вдоль полоза; переходное сопротивление в местах крепления шунтов не учитывается; переходное сопротивление «контактный провод – вставка» не является объектом исследования в данной работе и не учитывается. Учет сопротивления шунтов в схеме и модели, а также результаты расчета распределенного нагрева вдоль полоза токоприемника являются научной новизной.

Сопротивление полза R_{Π} для протекающего тягового тока I определяется суммой его двух частей, левого плеча $r_{\text{л}}$ и правого – $r_{\text{пр}}$:

$$R_{\Pi} = r_{\text{л}} + r_{\text{пр}}. \quad (1)$$

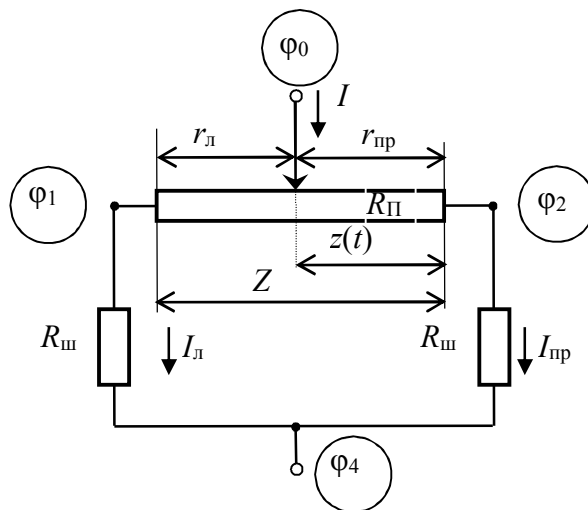


Рисунок 1 – Расчетная схема определения сопротивления полза токоприемника

При этом тяговый ток полза распределяется обратно пропорционально сопротивлению этих плеч и равен сумме токов левого и правого шунтов (см. рисунок 1):

$$I = I_{\text{л}} + I_{\text{пр}}. \quad (2)$$

Сопротивления в расчетной схеме (см. рисунок 1) для протекания токов левого $I_{\text{л}}$ и правого $I_{\text{пр}}$ шунтов определяются следующими формулами:

$$R(z_{\text{л}}) = r_{\text{л}} + R_{\text{ш}}; \quad (3)$$

$$R(z_{\text{пр}}) = r_{\text{пр}} + R_{\text{ш}}. \quad (4)$$

С учетом переменной величины сопротивлений плеч, принятых долями от полного сопротивления полза R_{Π} в зависимости от положения провода $z(t)$ при $Z = \pm 300$ мм:

$$r_{\text{л}} = R_{\Pi} z(t)/Z; \quad (5)$$

$$r_{\text{пр}} = R_{\Pi} [Z - z(t)]/Z, \quad (6)$$

формулы для определения сопротивлений (3) и (4) с учетом (5) и (6) имеет вид

$$R(z_{\text{л}}) = R_{\Pi} z(t)/Z + R_{\text{ш}}; \quad (7)$$

$$R(z_{\text{пр}}) = R_{\Pi} [Z - z(t)]/Z + R_{\text{ш}}. \quad (8)$$

Общая величина резистивной мощности на пути протекания тягового тока

$$R = 1 / [1/R(z_{\text{л}}) + 1/R(z_{\text{пр}})]. \quad (9)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

График собственного сопротивления полоза приведен на рисунке 2 при следующих значениях: $R_{ш} = 60$ мкОм, $R_{п} = 40$ мкОм, $I = 1600$ А. Тип подвески – вертикальная с зигзагом $Z = \pm 300$ мм.

Ток левого и правого плеч (рисунок 3) определяется по формуле:

$$I_{л} = I / [R(z_{л}) / R(z_{пр}) - 1]; \quad (10)$$

$$I_{пр} = I / [R(z_{пр}) / R(z_{л}) - 1]. \quad (11)$$

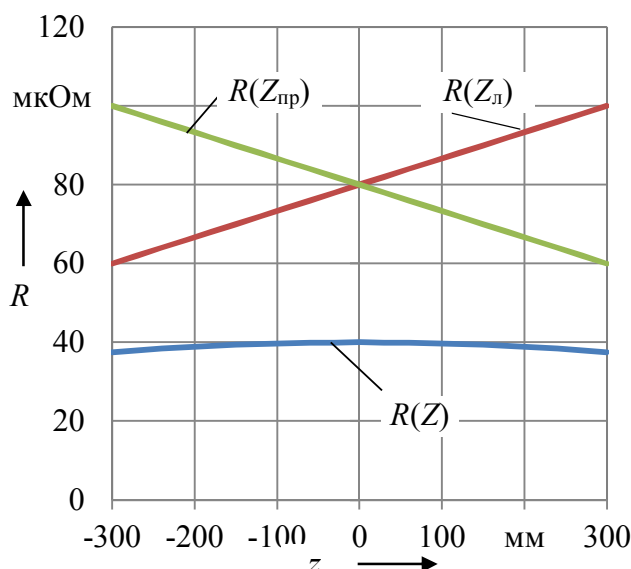


Рисунок 2 – График собственного сопротивления полоза относительно контактной вставки

Экспериментальное определение растекания токов токоприемника для различных положений контактного провода по полозу показало высокую сходимость экспериментальных исследований с теоретическими данными (см. рисунок 3). Измерения производились токовыми клещами на шунтах каркасного трехрядного угольного полоза отечественного производства для тягового тока величиной 1600 А.

Мощность резистивного нагрева (рисунок 4) от протекания токов левого и правого плеч рассчитывается по формулам:

$$P_{л} = I_{л}^2 R(z_{л}); \quad (12)$$

$$P_{пр} = I_{пр}^2 R(z_{пр}). \quad (13)$$

Общая мощность нагрева

$$P(Z) = P_{л} + P_{пр}. \quad (14)$$

Из рисунка 2 видно, что наибольшие значения собственных сопротивлений полоза $R(Z)$ относительно контактной вставки и наибольший суммарный резистивный нагрев полоза $P(Z)$ от этих сопротивлений (см. рисунок 4) будут, когда контактный провод расположен на середине полоза $z = 0$. Наименьшие суммарные значения $R(Z)$ и $P(Z)$ наблюдаются, когда контактный провод смещен от центра полоза на величину зигзага $z = \pm 300$ мм.

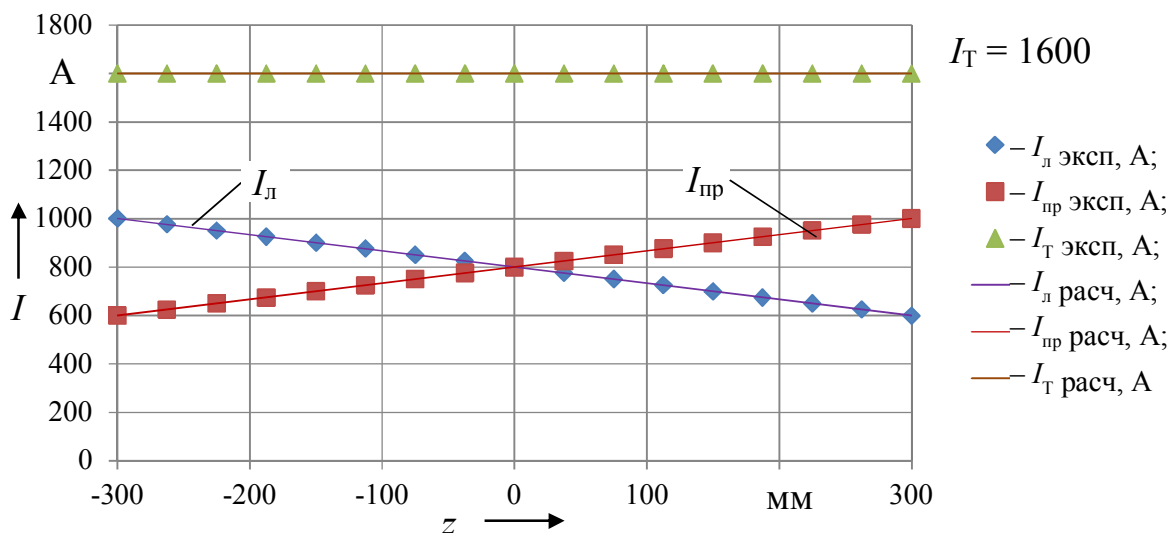


Рисунок 3 – Экспериментальные и расчетные значения тока шунтов каркасного трехрядного угольного полоза отечественного производства

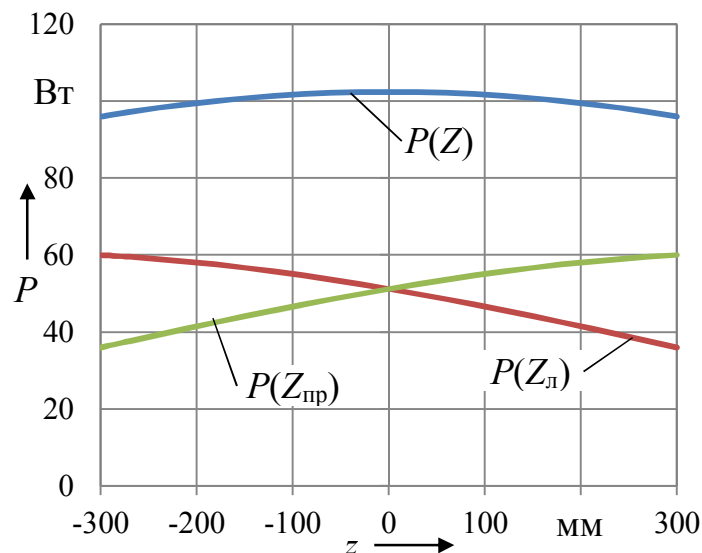


Рисунок 4 – График суммарной мощности резистивного нагрева полоза с шунтами от собственного сопротивления

Поскольку места подключения токоотводящих проводников к полозу разнесены в стороны от центра полоза, то при $z = 0$ путь протекания тока по полозу наибольший. Соответственно сопротивление $R(Z)$ и нагрев $P(Z)$ также наибольшие, при $z = \pm 300$ мм наоборот.

График суммарной мощности резистивного нагрева полоза без шунтов при протекании тока через собственное сопротивление, приведенный на рисунке 5, совпадает с результатами расчета [2, 12].

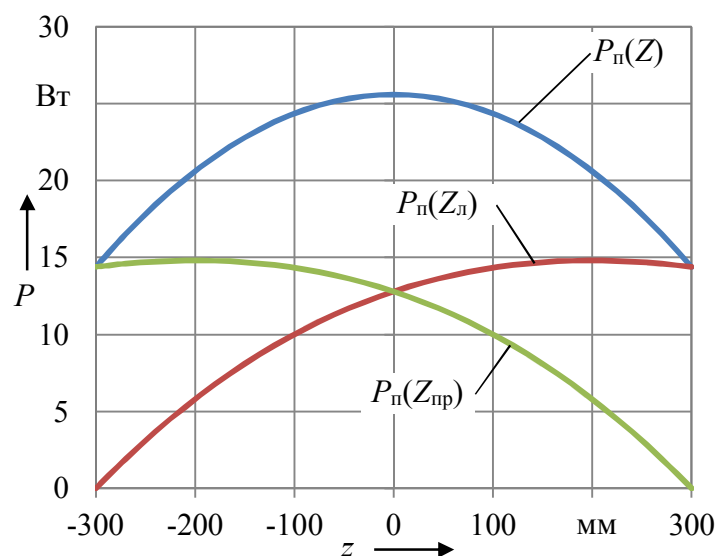


Рисунок 5 – График суммарной мощности резистивного нагрева полоза без шунтов при протекании тока через собственное сопротивление

График суммарной мощности резистивного нагрева шунтов при протекании тока через их сопротивление приведен на рисунке 6.

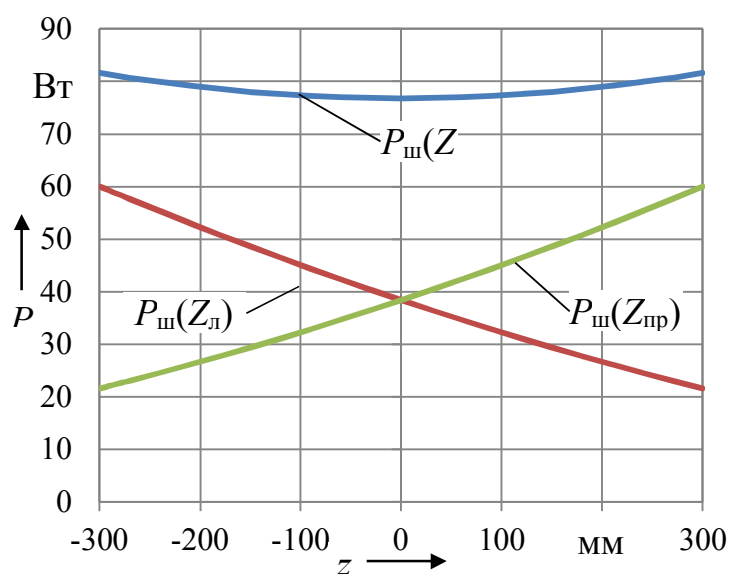


Рисунок 6 – График суммарной мощности резистивного нагрева шунтов

Нагрев шунтов в зависимости от положения контактного провода имеет обратный характер по сравнению с ползом: нагрев шунтов осуществляется сильнее при крайнем положении провода.

Величина суммарной резистивной мощности нагрева полоза в точках пролета как среднее значение мощности нагрева полоза приведена на рисунке 7. Для удобства восприятия информации приведены значения мощности полоза по отношению к положению токоприемника в пролете длиной 60 м. В середине пролета, где провод расположен по оси пути и в центре полоза, весь полз нагревается сильнее и меньше в крайних положениях провода – над шунтами.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Зная величины токов плеч $I_{\text{л}}$ и $I_{\text{пр}}$ для различного положения токоприемника в пролете, определим распределение потерь мощности вдоль полоза $P(z; l)$ с учетом расчетной величины его элемента $Z_i = 30$ мм [6], $i = 600 / 30 = 20$ шт., сопротивления $R_i = 40/20 = 2$ мкОм:

$$P(z; l) = P_{\text{л}}(z; l) + P_{\text{пр}}(z; l), \quad (15)$$

где $P_{\text{л}}(z; l)$, $P_{\text{пр}}(z; l)$ – мощности потерь вдоль полоза от тока левого и правого плеч соответственно:

$$P_{\text{л}}(z; l) = I_{\text{л}}^2 R_i; \quad (16)$$

$$P_{\text{пр}}(z; l) = I_{\text{пр}}^2 R_i. \quad (17)$$

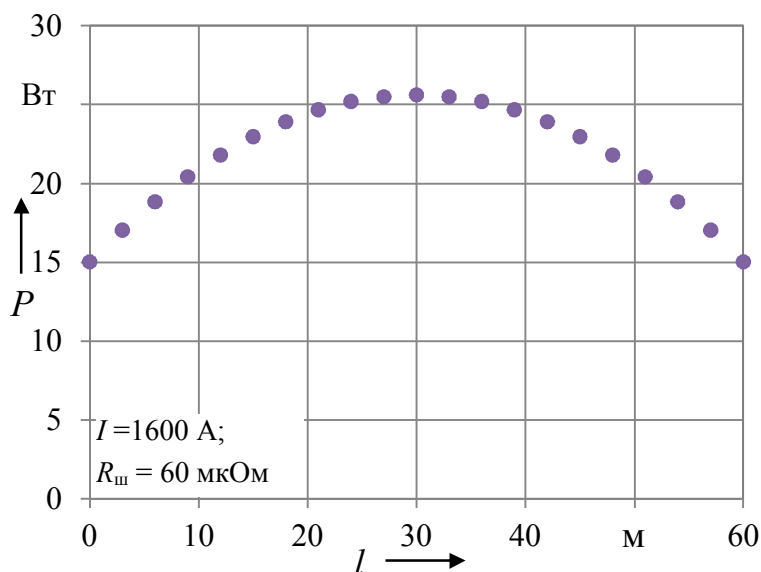


Рисунок 7 – График суммарной резистивной мощности нагрева полоза в пролете

Изменение величины резистивной мощности токами правого $P_{\text{пр}}(z; l)$ и левого $P_{\text{л}}(z; l)$ плеч вдоль полоза при перемещении токоприемника в пролете представлено матрицей $P(z; l)$ в таблице. Правые элементы диагонали – значения мощности нагрева током правого $P_{\text{пр}}(z; l)$ плеча, элементы слева – левого $P_{\text{л}}(z; l)$.

Матрица распределения резистивной мощности нагрева вдоль полоза в пролете контактной сети

$l, \text{ м}$	$z, \text{ мм}$																					$P_z(l)$
	-300	-270	-240	-210	-180	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0	1,30	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	15,01
3	1,83	1,28	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	17,02
6	1,76	1,76	1,27	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	18,82
9	1,68	1,68	1,68	1,26	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	20,41
12	1,61	1,61	1,61	1,61	1,25	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	21,79
15	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,24	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	22,95
18	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,23	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	23,91
21	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,23	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	24,65
24	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,22	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	25,18
27	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,22	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	25,49
30	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	25,60
33	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,22	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	25,49
36	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,22	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	25,18

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
39	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,23	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	24,65
42	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,23	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	23,91
45	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	1,24	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	22,95
48	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	1,25	1,61	1,61	1,61	1,61	21,79
51	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	1,26	1,68	1,68	1,68	20,41
54	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	1,27	1,76	1,76	18,82
57	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	1,28	1,83	17,02
60	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	1,30	15,01
$P_l(z)$	25,58	24,42	23,38	22,47	21,68	21,01	20,46	20,03	19,73	19,54	19,48	19,54	19,73	20,03	20,46	21,01	21,68	22,47	23,38	24,42	25,58	-

График изменения величины резистивной мощности $P(z; l)$ вдоль полоза при перемещении в пролете согласно формуле (15) приведен на рисунке 8.

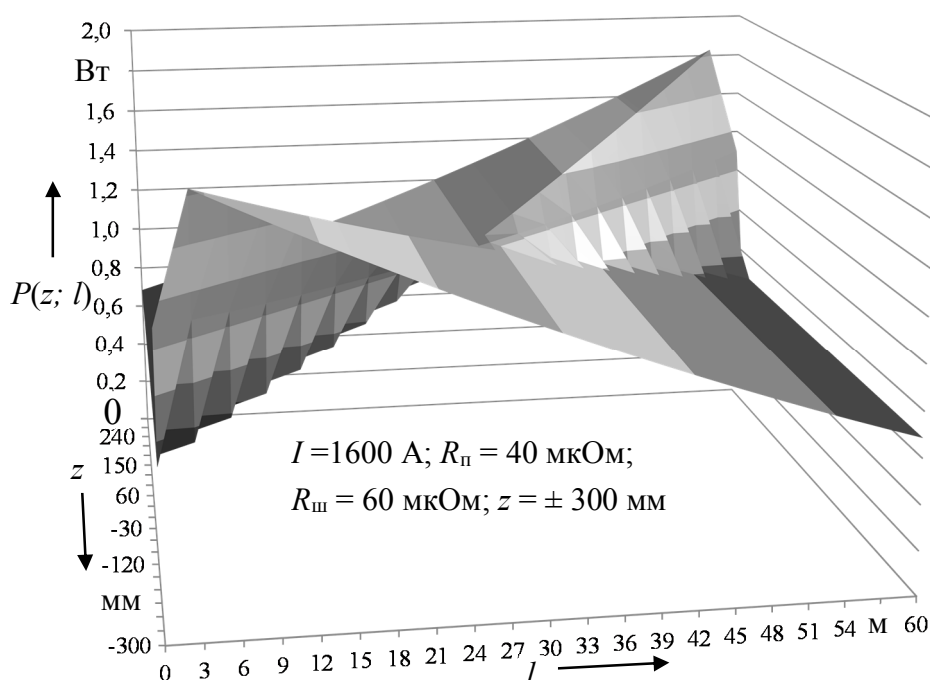


Рисунок 8 – График изменения величины резистивной мощности вдоль полоза при перемещении в пролете

По «диагонали» графика рисунка 8 значения потерь выше, так как элемент полоза под проводом нагрет общим током (суммой двух плеч), стекающим в данной точке (или растекающимся от этой точки).

Суммарная мощность по элементам полоза за один пролет контактной сети

$$P_l(z) = \sum_{l=0}^{60} P_l(z; l). \quad (18)$$

График распределения резистивной мощности вдоль полоза, определяемой потерями в его элементах за один пролет контактной сети, приведен на рисунке 9.

Необходимо отметить, что резистивная мощность полоза значительно меньше мощности переходного контакта, распределение которого в большей степени зависит от контактного нажатия токоприемника на подвеску [3, 8, 9].

Нагрев всей конструкции полоза осуществляется сильнее, когда провод находится в его середине (см. рисунок 5), однако при этом распределение нагрева вдоль полоза неравномерно

и наибольшая мощность резистивного нагрева наблюдается над шунтами – в местах стока тягового тока (см. рисунок 9).

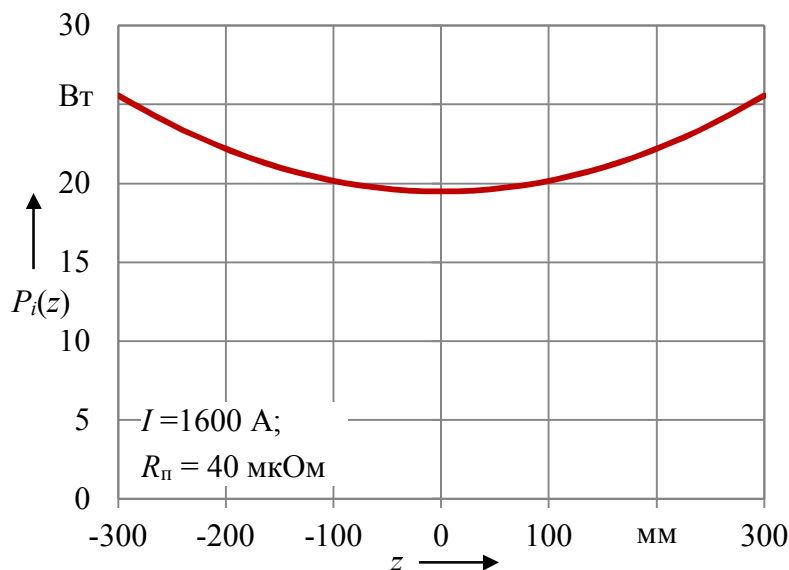


Рисунок 9 – График распределения резистивной мощности вдоль полоза

Предлагаемый расчет распределения плотности тягового тока вдоль полоза токоприемника подвижного состава в режиме движения, выполняемый без применения трехмерных моделей, осуществляется мгновенно и не требует значительных ресурсов.

Полученная закономерность распределения резистивной мощности вдоль полоза по его элементам позволяет усовершенствовать математическую модель теплового состояния полоза токоприемника ОмГУПС [3, 8, 9].

В заключение можно сделать следующие выводы.

Предлагаемая модель распределения тягового тока вдоль полоза токоприемника подвижного состава в режиме движения является универсальной и может быть использована для расчета потерь тепла в отношении любых видов верхних узлов устройств токосъема магистрального электроподвижного состава. Относительная простота модели, высокая скорость расчета и иллюстративность являются преимуществами рассмотренной модели.

Полученные графики суммарной резистивной мощности нагрева полоза в пролете и его сопротивления хорошо согласуются с данными расчетов УрГУПС [12] и ВНИИЖТа [2].

Экспериментальные исследования, проведенные в лаборатории ОмГУПС, подтверждают расчетное распределение тока, полученное по результатам моделирования.

Полученные численные результаты распределения нагрева вдоль полоза с наибольшей мощностью резистивного нагрева над шунтами объясняют результаты расчета модели УрГУПС [12].

Полученные закономерности неравномерного распределения резистивной мощности вдоль полоза позволяют усовершенствовать математическую модель теплового состояния полоза токоприемника ОмГУПС [3, 8, 9].

Расчетная схема определения сопротивления полоза токоприемника подразумевает моделирование аварийных режимов работы – обрыв шунта. Модель может быть использована для расчета работы полоза с различными контактными подвесками, отличающимися способом организации зигзага и его траекторией.

Список литературы

1. Увеличение нагрузочной способности токоприемников / И. А. Беляев, Е. А. Вологин, Ю. Е. Купцов [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 1974. – № 8. – С. 51–54.
2. Тартынский, Д. В. Исследование износа контактных токосъемных элементов на основе моделирования токораспределения в полозе токоприемника / Д. В. Тартынский, М. Н. Емельянова, А. Т. Тибилов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2015. – № 2. – С. 53–56.
3. Томилов, В. В. Математическая модель системы охлаждения полоза токоприемника в режиме движения магистрального электроподвижного состава / В. В. Томилов, С. М. Утепбергенова, О. А. Сидоров. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2020. – № 2 (65). – С. 86–92.
4. Сидоров, О. А. Исследование температуры нагрева полоза токоприемника и способы ее снижения / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. В. Томилов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – Омск. – 2017. – № 4 (32). – С. 25–34.
5. Утепбергенова, С. М. Исследование систем охлаждения полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава / С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов, О. А. Сидоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 2 (38). – С. 66–75.
6. ГОСТ 32204–2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 24 с. – Текст : непосредственный.
7. Томилов, В. В. Особенности теплового расчета токоприемников магистрального электроподвижного состава / В. В. Томилов, А. В. Тарасенко, А. Н. Кутькин. – Текст : непосредственный // Материалы шестого междунар. симпозиума «Eltrans'2011». – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 526–536.
8. Утепбергенова, С. М. Методика расчета теплового состояния полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава с учетом изменения положения контактного провода в плане / С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов, О. А. Сидоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 4 (40). – С. 43–53.
9. Смердин, А. Н. Совершенствование методики определения нагрузочных показателей токоприемников магистрального электроподвижного состава / А. Н. Смердин, В. В. Томилов, В. М. Павлов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 3 (39). – С. 99–110.
10. Проверка токовой нагрузочной способности токоприемников ТАС 24 и ЛАС 25 / В. М. Павлов, П. В. Попов [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ВЭЛНИИ. – 2015. – № 2 (70). – С. 33–43.
11. Исследования токовой нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава / В. М. Павлов, О. А. Сидоров [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2015. – № 4. – С. 19–24.
12. Паранин, А. В. Расчет распределения тока в контактном проводе и полозе токоприемника при токосъеме / А. В. Паранин, Д. А. Ефимов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2009. – № 4 (23). – С. 81–84.
13. Паранин, А. В. Математическое моделирование тепловых процессов при взаимодействии токоприемника и контактного провода / А. В. Паранин. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2009. – № 4 (23). – С. 85–88.

References

1. Belyaev I.A., Vologin E.A., Kuptsov Yu.E., Kolcov V.P., Petrovsky V.M. Increasing the load capacity of current collectors. *The Railway Transport magazine*, 1974, no. 8. pp. 51-54 (In Russian).
2. Tartinsky D. V., Emelyanova M.N., Tibilov A.T. Research of running contacts wear based on simulation of current distribution in the pantograph slide. *The Russian Railway Science Journal*, 2015, no 2, pp. 53-56.
3. Tomilov V.V., Utepbergenova S.M., Sidorov O.A. Pantograph cooling system mathematical model during motion of the railway electric transport. *Transport of the Urals – Scientific-technical journal*, 2020. no 2 (65), pp. 86-92.
4. Sidorov O.A., Smerdin, A. N., Tomilov V.V. Research of temperature distribution inequality of a panhead and its reduction methods. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 4, no. 32, pp. 25-34.
5. Utepbergenova S.M., Tomilov V.V., Sidorov O.A. Research of cooling system for pantograph head of electric train. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 2, no. 38, pp. 66-75.
6. National Standard 32204-2013 Current collectors of railway electric rolling stock. General specification. Moscow, Standardinform Publ., 2013, 24 p. (In Russian).
7. Tomilov V.V., Tarasenko A.V., Kyutkin A. N. [Features of thermal calculation of current collectors of main electric rolling stock]. *Materialy Shestogo Mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans'2011»* [Materials of the Sixth International Symposium «Eltrans'2011»]. S. Petersburg, 2013, pp. 526-536 (In Russian).
8. Utepbergenova S. M., Tomilov V.V., Sidorov O. A. Method for the heat state calculating of pantograph head of a mainline electric rolling stock taking account the contact wire stagger *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 4, no. 40, pp. 43-53.
9. Smerdin, A. N., Tomilov V. V., Pavlov V. M. Improvement of the method for determining load indicators of current collectors of main electric rolling stock. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 99-110.
10. Pavlov V. M., Popov P. V., Sidorov O. A., Smerdin A. N., Tomilov V.V. Continuous current-carrying capacity test of TAs 24 and LAs 25 current-collectors. *Vestnik VELNII - The journal of the Railway Research Institute*, 2015, no 2 (70), pp. 33-43.
11. Pavlov V.M., Sidorov O.A., Smerdin A.N., Golubkov A.S., Tartynskiy D.V, Tomilov V.V. Current-Loading Capacity Investigations of Current Collector Operated with Mainline Electric Motive Power, *The Russian Railway Science Journal*, 2015, no 4, pp. 19-24.
11. Paranin A.V., Yefimov D.A. Calculation of current distribution in contact wire and current collector runner at current pickup. *Transport of the Urals – Scientific-technical journal*, 2009, no. 4 (23), pp. 81-84.
12. Paranin A.V. Mathematical modeling of thermal processes at interaction of a current collector and a contact wire. *Transport of the Urals – Scientific-technical journal*, 2009, no. 4 (23), pp. 85-88.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Томилов Валерий Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (913) 610-62-67.

E-mail: tomilov_omsk@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Tomilov Valerii Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: +7 (913) 610-62-67

E-mail: tomilov_omsk@mail.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: egt@omgups.ru

Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, professor of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

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

E-mail: egt@omgups.ru

Утепбергенова Сандугаш Мырзабековна

АО «Академия логистики и транспорта» (АО «АЛТ»).

Шевченко ул., д. 97, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан.

Кандидат технических наук, старший преподаватель АО «АЛТ».

Тел.: +7 (778) 412-08-67.

E-mail: sandee86@mail.ru

Utepbergenova Sandugash Myrzabekovna

Academy of logistics and transport (ALT).

97, Shevchenko st., Almaty, 050012, the Republic of Kazakhstan.

Ph. D. in Engineering, Senior Lecturer of the Academy of logistics and transport.

Phone: +7 (778) 412-08-67.

E-mail: sandee86@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Томилов, В. В. Исследование распределения плотности тягового тока вдоль полоза токоприемника подвижного состава в режиме движения / В. В. Томилов, О. А. Сидоров, С. М. Утепбергенова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 124 – 135.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tomilov V.V., Sidorov O. A., Utepbergenova S. M. Study of the traction current density distribution along the pantograph of the rolling stock in the motion mode. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 2 (50), pp. 124-135 (In Russian).

УДК 65.011.56

С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустян, А. В. Обрывалин, А. А. Евсеев

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. В статье приведены результаты разработки и внедрения методики управления технологическими процессами ремонта локомотивов на основе сетевого планирования. Методика позволяет в режиме онлайн отслеживать «узкие» места при производстве текущих ремонтов и сокращать продолжительность критического пути за счет варьирования временными показателями событий и работ, использования агрегатно-узлового метода ремонта, перераспределения ресурсов между критическими и некритическими работами. В основе разработанной методики лежит корректировка базовых сетевых графиков ремонта с учетом загруженности технологического оборудования и ремонтного персонала, наличия запасных частей и материалов, необходимости проведения внеплановых работ при плановой постановке в ремонт конкретного локомотива. Данный подход был реализован в рамках автоматизированной системы управления (АСУ) «Сетевой график» и обеспечивает контроль и корректировку выполнения технологических операций по показателям технологической подготовки ремонта. Разработан алгоритм определения обобщенного показателя эффективности при оценке качества функционирования автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом локомотив в сервисных локомотивных депо.

Ключевые слова: качество ремонта локомотива, сервисное локомотивное депо, сетевое планирование, управление технологическими процессами ремонта, автоматизированная система управления, корректировка сетевого графика, обобщенный показатель эффективности, алгоритм, методика расчета.

Sergey G. Shantarenko, Mihail F. Kapustyan, Aleksey V. Obryvalin, Aleksey A. Evseev

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

MANAGEMENT EFFICIENCY LOCOMOTIVE MAINTENANCE AND REPAIR

Abstract. *The article presents the results of the development and implementation of a method for controlling the technological processes of repairing locomotives based on network planning. The methodology allows you to track online bottlenecks during current repairs and reduce the duration of the critical path by varying the time indicators of events and works, using the aggregate-nodal repair method, redistributing resources between critical and non-critical works. The developed methodology is based on the adjustment of basic repair networks, taking into account the workload of process equipment and repair personnel, the availability of spare parts and materials, the need for unscheduled work during the planned installation of a particular locomotive for repair. This approach was implemented within the framework of the automated control system (ACS) «Network Schedule» and provides control and adjustment of the implementation of technological operations according to the indicators of technological preparation of repairs. An algorithm has been developed for determining a generalized performance indicator when assessing the quality of functioning of an automated maintenance and repair control system for a locomotive in service locomotive depots.*

Keywords: *quality of locomotive repair, service locomotive depot, network planning, repair process control, automated control system, network schedule correction, generalized efficiency indicator, algorithm, calculation method.*

Одной из задач локомотиворемонтного комплекса ОАО «РЖД» является управление технологическими процессами обслуживания и ремонта подвижного состава с целью повышения качества ремонтно-восстановительных работ. Решение этой задачи позволяет сокращать время проведения периодических видов технического обслуживания и ремонта локомотивов, снижать количество сверхурочных работ, своевременно пополнять материально-технические запасы, обеспечивать качества выполнения технологических процессов. Благодаря этому значительно повышается производительность труда, сокращаются затраты локомотиворемонтных предприятий, снижается себестоимость ремонта [1, 2].

Важно отметить, что автоматизация управления технологическими процессами позволяет повысить коэффициент готовности локомотивов как одного из основных показателей качества выполняемого ремонта.

Одним из вариантов реализации управления технологическими процессами ремонта локомотивов является применение сетевого планирования. Задача сетевого планирования состоит в том, чтобы наглядно и системно отобразить и оптимизировать последовательность и взаимозависимость работ, действий или мероприятий, обеспечивающих своевременное и планомерное достижение конечных целей. Для отображения и алгоритмизации тех или иных действий или ситуаций используются экономико-математические или динамические модели, простейшие из которых – сетевые графики [3].

Использование сетевого планирования на локомотиворемонтных предприятиях позволяет значительно упростить процесс технологической подготовки ремонтного производства, сделать его прозрачным и легко перестраиваемым за счет строго прописанных норм времени на выполнение технологических операций, норм расхода материалов, режимов обработки и методов контроля [4].

В Омском государственном университете путей сообщения разработана методика управления технологическими процессами ремонта локомотивов, реализация которой позволяет в режиме онлайн отслеживать «узкие» места при производстве текущих ремонтов и сокращать продолжительность критического пути за счет варьирования временными показателями событий и работ, использования агрегатно-узлового метода ремонта, перераспределения ресурсов между критическими и некритическими работами. В основе методики лежит корректировка базовых сетевых графиков ремонта с учетом загруженности технологического оборудования и ремонтного персонала, наличия запасных частей и материалов, необходимости проведения внеплановых работ при плановой постановке в ремонт конкретного локомотива (рисунок 1) [2].

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Данный подход был реализован в рамках автоматизированной системы управления «Сетевой график» (АСУ СГ), он обеспечивает контроль и корректировку выполнения технологических операций по показателям технологической подготовки ремонта.

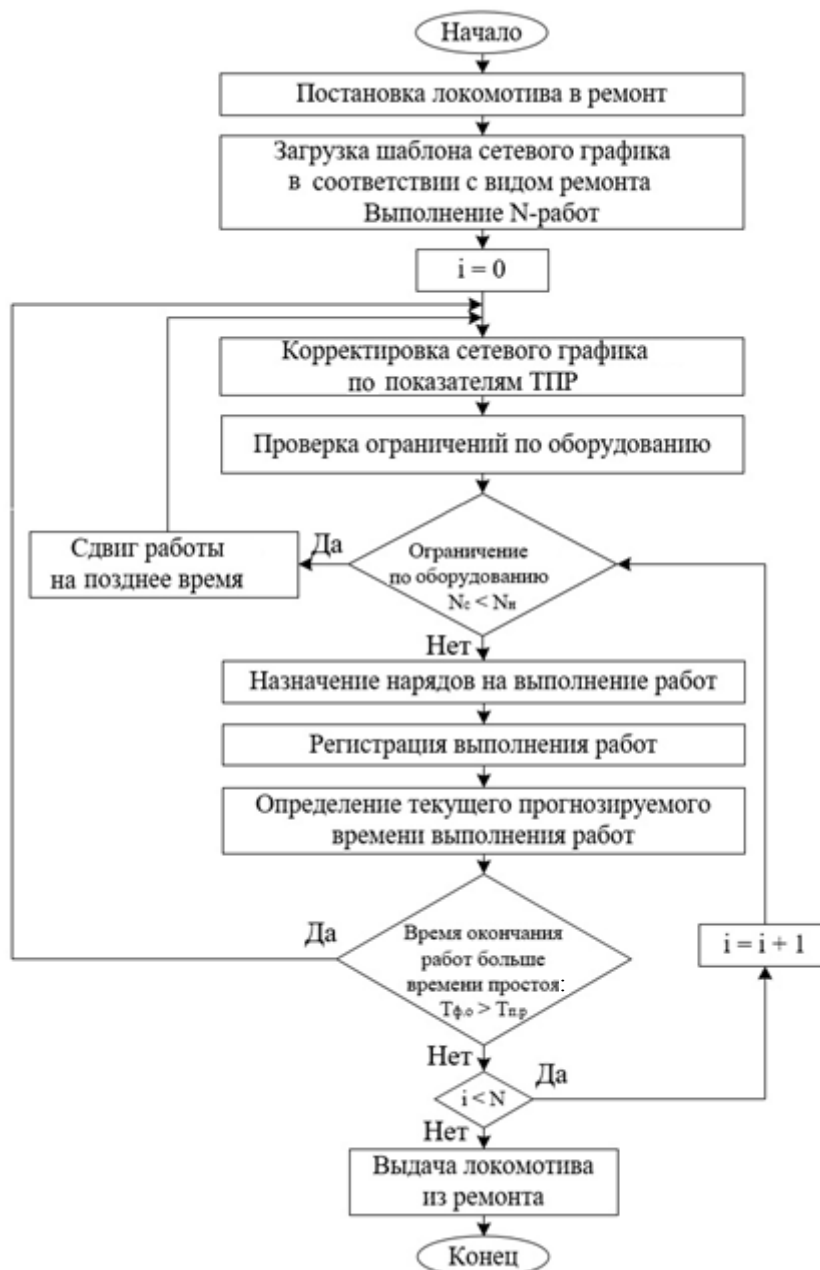


Рисунок 1 – Алгоритм реализации методики управления технологическими процессами ремонта локомотивов

АСУ СГ внедрена в ряде сервисных локомотивных депо (СЛД) ООО «ЛокоТех-Сервис», что позволило снизить количество unplanned ремонтов, сократить простои в ремонте и в ожидании ремонта [5]. За период эксплуатации методики в сервисном локомотивном депо Тюмень ООО «ЛокоТех-Сервис» с 2018 по 2020 г. коэффициент технической готовности прошедших ремонт локомотивов вырос на 4,89 %, а перепростои в ремонте сократились на 19 %. Экономический эффект от использования разработанной методики составил 300 тыс. руб. в год.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

После внедрения автоматизированной системы управления ремонтом в нескольких пилотных депо возникла необходимость в оценке ее эффективности. В качестве интегрального показателя был разработан обобщенный показатель эффективности (ОПЭ), который определяется по алгоритму, приведенному на рисунке 2.

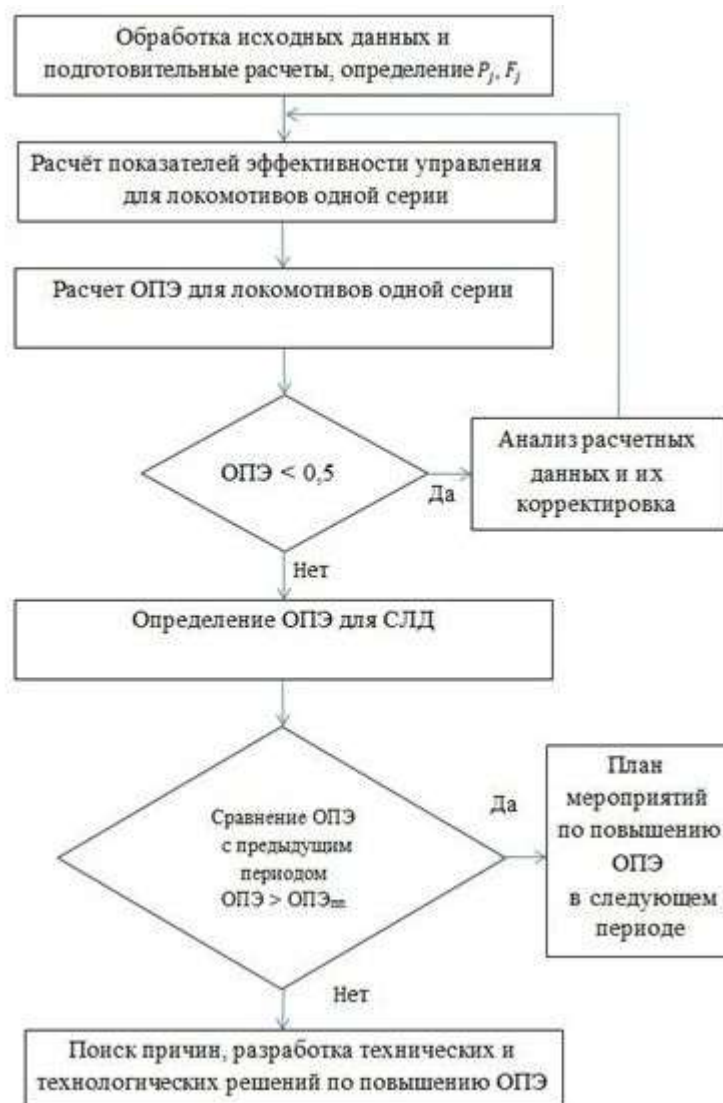


Рисунок 2 – Алгоритм методики расчета ОПЭ

Исходные данные для расчета ОПЭ получены в результате анализа технологических процессов, сетевых графиков и обработки первичной информации о технологической базе депо, о видах проводимых ремонтов, сериях обслуживаемых локомотивов, материально-техническом обеспечении производственных процессов запасными частями, переходным оборудованием, узлами и агрегатами, квалификации специалистов депо, системе оплаты труда [6].

При выполнении расчета необходимо предварительно определить фактор риска и неопределенности с учетом стадии реализации действующей системы управления СЛД с помощью АСУ СГ:

Стадия 1. Система управления, которая находится на этапе создания концепции.

Стадия 2. Система управления, реализуемая на стадии пилотного проекта.

Стадия 3. Система управления, реализуемая на стадии внедрения.

Стадия 4. Система управления, реализуемая на стадии распространения на другие серии локомотивов внутри СЛД после внедрения.

Стадия 5. Система управления функционирует в условиях дополнительного финансирования СЛД с целью увеличения программы ремонта.

С качественной стороны учетом обозначенных выше стадий определяется фактор, принимающий следующие пять значений $\{ \langle F_1 = \text{очень большое} \rangle$ (соответствует первой стадии), $\langle F_2 = \text{большое} \rangle$ (соответствует второй стадии), $\langle F_3 = \text{среднее} \rangle$ (соответствует третьей стадии), $\langle F_4 = \text{малое} \rangle$ (соответствует четвертой стадии), $\langle F_5 = \text{очень малое} \rangle$ (соответствует пятой стадии) $\}$.

Значение факторов для каждой стадии рассчитаем на основе оценок Фишборна [7]:

$$F_j = \frac{2 \cdot (r - f + 1)}{f \cdot (f + 1)}, \quad (1)$$

где f – общее количество рассматриваемых отдельных стадий;

r – номер соответствующей стадии.

Для первой стадии («очень большое» $r = 1$) $F_I = 0,33$; для второй стадии («большое» $r = 2$) $F_{II} = 0,27$; для третьей стадии («среднее» $r = 3$) $F_{III} = 0,2$; для четвертой стадии («малое» $r = 4$) $F_{IV} = 0,13$; для пятой стадии («очень малое» $r = 5$) $F_V = 0,07$. Сумма $F_I + F_{II} + F_{III} + F_{IV} + F_V = 1$.

Вероятность «полного успеха» системы управления на базе АСУ СГ для каждой r -й стадии

$$P_j = 1 - F_j. \quad (2)$$

Обобщенный показатель эффективности определяется как произведение суммы балльных оценок всех влияющих показателей, взвешенных с помощью коэффициентов значимости, и коэффициента, учитывающего фактор риска и неопределенности.

ОПЭ для j -й серии локомотивов СЛД определяется как сумма балльных оценок всех влияющих показателей – $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$, взвешенных с помощью коэффициентов значимости, по формуле [7]:

$$Q_j = \sum_{i=1}^h q_{ij} \cdot C_i, \quad (3)$$

где q_{ij} – балльная оценка i -го показателя j -го серии локомотивов;

C_i – коэффициент значимости i -го показателя;

h – количество показателей.

В условиях неопределенности, когда показатели эффективности можно ранжировать по приоритету лишь на качественном уровне («очень важно» – «важно» – «менее важно» – «влияет незначительно» – «косвенное влияние»), веса этих показателей рассчитываем на основе оценок Фишборна [7].

Коэффициент значимости

$$C_i = \frac{2 \cdot (m - w_i + 1)}{m \cdot p_i \cdot (m + 1)}, \quad (4)$$

где m – количество рассматриваемых отдельных категорий значимости показателей эффективности (в нашем случае $m = 5$);

w_i – номер категории, соответствующий i -му показателю;

p_i – количество показателей, попавших в данную категории значимости с i -м показателем.

Следует иметь в виду, что использование формулы (4) предполагает, что все критерии являются членами линейно ранжированного ряда критериев, когда нет связанных критериев.

Итоговая формула для определения ОПЭ для одной серии локомотивов, обслуживаемых в депо, с учетом математической модели расчетов рисков стадии реализации системы управления в СЛД имеет вид:

$$Q_j^p = P_j \sum_{i=1}^h q_{ij} \cdot C_i, \quad (5)$$

где q_{ij} – балльная оценка i -го показателя j -й серии локомотивов;

C_i – коэффициент значимости i -го показателя;

h – количество показателей;

P_j – вероятность «полного успеха».

Обобщенный показатель эффективности применения АСУ СГ для сервисного локомотивного депо рассчитывается как произведение ОПЭ, полученных для каждой серии локомотивов данного СЛД:

$$\text{опэ} = \prod Q_j^p. \quad (6)$$

Таким образом, получены простые аналитические выражения, позволяющие при использовании весовых коэффициентов критериев определять уровень эффективности на текущем этапе реализации проекта и направления для повышения показателей качества выполняемого ремонта с использованием АСУ «Сетевой график».

Список литературы

1. Постников, В. М. Методы принятия решений в системах организационного управления / В. М. Постников, В. М. Черненький. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 205 с. – Текст : непосредственный.
2. Шантаренко, С. Г. Управление технологическими процессами и качество выполнения ремонта локомотивов / С. Г. Шантаренко, О. П. Супчинский, М. Ф. Капустян. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3 (75). – С. 64–71.
3. Лебедев, Ю. А. Сетевые модели при ремонте локомотивов / Ю. А. Лебедев, Ф. Е. Овчинников, В. С. Ожаровский. – Москва : Транспорт, 1981. – 254 с. – Текст : непосредственный.
4. Супчинский, О. П. Управление качеством технологических процессов ремонта локомотивов с использованием сетевого планирования / О. П. Супчинский, М. Ф. Капустян. – Текст : непосредственный // Наука сегодня: история и современность : материалы международной научно-практической конференции. – Вологда : НЦ «Диспут», 2018. – С. 40–42.
5. Качество технологических процессов ремонта и эффективность использования магистральных электровозов / С. Г. Шантаренко, В. Т. Черемисин, О. П. Супчинский, М. Ф. Капустян. – Текст : непосредственный // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов : труды международной научно-практической конференции. – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2018. – С. 418–429.
6. Зак, Ю. А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации / Ю. А. Зак. – Москва : Экономика, 2014. – 455 с. – Текст : непосредственный.
7. Спиридонов, С. Б. Анализ подходов к выбору весовых коэффициентов критериев методом парного сравнения критериев / С. Б. Спиридонов, И. Г. Булатова, В. М. Постников. – Текст : электронный // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9. – №. 6. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/16TVN617.pdf> (дата обращения: 20.06.2022).

References

1. Postnikov V. M., Chernenky V. M. *Metody priniatiia reshenii v sistemakh organizatsionnogo upravleniia* (Decision-making methods in organizational management systems). Moscow : MSTU named N.E. Bauman, 2014, 205 p.
2. Shantarenko S. G., Supchinsky O. P., Kapustyan M. F. Process control and quality of locomotive repair [Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami i kachestvo vypolneniia remonta lokomotivov]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*. – *The journal*, 2019, no. 3 (75), pp. 64–71.
3. Lebedev Yu. A., Ovchinnikov F. E., Ozharovsky V. S. *Setevye modeli pri remonte lokomotivov* (Network models for the repair of locomotives). – Moscow: Transport, 1981, 254 p.
4. Supchinsky, O.P., Kapustyan, M.F. Quality management of locomotive repair technological processes using network planning [Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh protsessov remonta lokomotivov s ispol'zovaniem setevogo planirovaniia]. *Nauka segodnia: istoriia i sovremennost': Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Science today: history and modernity: Materials of the international scientific and practical conference). – Vologda, 2018, pp. 40–42.
5. Shantarenko S. G., Cheremisin V. T., Supchinsky O. P., Kapust'yan M. F. Quality of technological processes of repair and efficiency of use of main electric locomotives [Kachestvo tekhnologicheskikh protsessov remonta i effektivnost' ispol'zovaniia magistral'nykh elektrovozov]. *Perspektivy razvitiia servisnogo obsluzhivaniia lokomotivov : Trudy tret'ei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Prospects for the development of service maintenance of locomotives: Proceedings of the third international scientific and practical conference). Moscow, RUT (MIIT), 2018, pp. 418-429.
6. Zak, Yu. A. *Prikladnye zadachi mnogokriterial'noi optimizatsii* (Applied problems of multi-objective optimization). Moscow : Economics, 2014, 455 p.
7. Spiridonov, S. B., Bulatova I. G., Postnikov V. M. Analysis of approaches to the choice of weight coefficients of criteria by the method of pairwise comparison of criteria [Analiz podkhodov k vyboru vesovykh koeffitsientov kriteriev metodom parnogo sravneniia kriteriev]. *Naukovedenie*. – *Internet journal*, 2017, vol. 9, no. 6. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/16TVN617.pdf> (accessed 20.06.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шантаренко Сергей Георгиевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: ShantarenkoSG@omgups.ru

Капустьян Михаил Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mcap731@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shantarenko Sergey Georgievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: ShantarenkoSG@omgups.ru

Kapustyan Mikhail Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mcap731@gmail.com

Обрывалин Алексей Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: obryvalin_av@mail.ru

Obryvalin Aleksey Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: obryvalin_av@mail.ru

Евсеев Алексей Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: nirs.omgups@mail.ru

Evseev Alexey Anatolievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: nirs.omgups@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Эффективность управления техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустян, А. В. Обрывалин, А. А. Евсеев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 135 – 142.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shantarenko S. G., Kapustyan M. F., Obryvalin A. V., Evseev A. A. Management efficiency locomotive maintenance and repair. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 2 (50), pp. 135-142 (In Russian).

УДК 656.073

З. Г. Мухамедова, В. Д. Осадчук, А. У. Тулаев

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

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН В ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА И ЦЕПОЧКЕ ПОСТАВОК

Аннотация. Основной целью данной статьи является анализ инструментария блокчейн-технологий, используемых в области цепочек поставок. Для достижения указанной цели производится детальный анализ отдельных технологий, приводятся практические примеры их использования, доказывающие полезную эффективность его интеграции. Распространение и становление информационных технологий являются существующим фактом в современном мире. Данное направление в течение последних десятилетий определяет основные траектории развития экономики, промышленности и общества в целом, что в свою очередь приводит к колоссальным изменениям в аспекте технологического прогресса. Становление и развитие цифровой среды является одним из наиболее приоритетных направлений большинства развитых стран, включая Российскую Федерацию, США, Германию и иных. Современный технологический прогресс отличается разработкой и становлением различных информационных технологий, способствующих повышению рациональности использования ресурсов и повышению эффективности работы современных предприятий. В настоящее время существует огромное множество прикладных и профессиональных задач, наиболее эффективное решение которых предполагает использование различного рода информационных технологий. В данной статье поставлен вопрос об актуальности использования технологии Blockchain, о возможных проблемах ее внедрения, о том, что может дать блокчейн различным отраслям экономики и логистике. Чтобы разобраться в вопросе, как устроен blockchain, за основу берется блокчейн второго поколения Ethereum, который включает в себя обновленную систему смарт-контрактов и многое другое. Рассмотрены актуальные вопросы, которые способен решить блокчейн в логистике, такие как инвентаризация и отслеживание грузов, проверка подлинности, прозрачность в цепочках поставок, повышение скорости доставки грузов, создание фрахтового рынка. Также рассмотрена возможность и дано описание применения данной технологии на сети железной дороги Узбекистана. Данная

технология применима во многих отраслях современного быстроразвивающегося мира и способна ускорить развитие цифровой экономики.

Ключевые слова: блокчейн, логистика, смарт-контракты, децентрализованная среда, цепочки поставок, блокчейн Эфириум.

Ziyoda G. Mukhamedova, Vladislav D. Osadchuk, Altinbek U. Tulaev

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

PROSPECTS FOR THE USE OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN THE ORGANIZATION OF THE TRANSPORTATION PROCESS AND SUPPLY CHAIN

Abstract. The main purpose of this article is to analyze the tools of blockchain technologies used in the field of supply chains. To achieve this goal, a detailed analysis of individual technologies is carried out, practical examples of their use are given, proving the useful effectiveness of its integration. The spread and formation of information technologies are an existing fact in the modern world. Over the past decades, this direction has determined the main trajectories of the development of the economy, industry and society as a whole, which in turn leads to enormous changes in the aspect of technological progress. The formation and development of the digital environment is one of the top priorities of most developed countries, including the Russian Federation, the USA, Germany and others. Modern technological progress is characterized by the development and formation of various information technologies that contribute to improving the rational use of resources and improving the efficiency of modern enterprises. Currently, there is a huge variety of applied and professional tasks, the most effective solution of which involves the use of various kinds of information technologies. In this article, the question is raised about the relevance of using Blockchain technology, about possible problems of its implementation, about what blockchain can give to various sectors of the economy and logistics. To understand the question of how the blockchain works, the second-generation Ethereum blockchain is taken as a basis, which includes an updated system of smart contracts and much more. Topical issues that blockchain is able to solve in logistics, such as inventory and cargo tracking, authentication, transparency in supply chains, increasing the speed of cargo delivery, and the creation of a freight market, are considered. The possibility is also considered and a description of the application of this technology on the railway network of Uzbekistan is given. This technology is applicable in many sectors of the modern rapidly developing world and is able to accelerate the development of the digital economy.

Keywords: blockchain, logistics, smart contracts, decentralized environment, supply chains, Ethereum blockchain.

Блокчейн – это технология современности, которая не имеет определенного происхождения. История термина началась в 2008 г., когда аноним или группа лиц, скрывшихся под псевдонимом Сатоши Накамото, опубликовали статью, ставшую манифестом этой инновационной технологии. В статье описывались ее сущностные характеристики и возможности создания децентрализованной системы денежных расчетов. Доподлинно неизвестно, кто может быть автором данного манифеста, так как реальное имя создателя данной технологии до сих пор не раскрыто. Первый блок данной технологии был сгенерирован в 2009 г., а на сегодня только криптоинструментов на базе разных модификаций блокчейна в мире циркулирует свыше 2 тыс. видов. К примеру, blockchain позволяет отследить всю цепь поставки товара от производителя к потребителю. Каждая сделка или транзакция в таком случае записывается и добавляется в цепочку распределенной базы данных как новый фрагмент (т. е. присваивается соответствующий реестр), которому вручную присваивается уникальный многозначный числовой шифр. Этот фрагмент хранит данные о времени, дате, участниках, сумме сделки и, что важно, информацию о всей сети. Здесь любая передача информации происходит в виде цепочки блоков (block и chain – цепь), где каждый блок всегда содержит информацию о предыдущем блоке.

Блокчейн также связан с биткоином. Биткоин – исторически первое и наиболее известное применение блокчейн-технологии. Транзакции в нем – это переводы средств между кошельками пользователей [1, 2].

Проблемы внедрения технологии blockchain в логистике. Анализируя опыт внедрения и специфику технологии, при внедрении технологии blockchain и ее интегрировании в логистику (рисунок 1) следует учесть ряд важнейших нюансов и проблем, которые могут возникнуть.

- 1) Различное использование модели хранения данных: не все компании или системы используют единую модель данных для совместной работы над блокчейном.
- 2) Интеграция блокчейна в существующую ИТ-экосистему: всегда будет сложно интегрировать блокчейн в существующие внутренние программные алгоритмы.
- 3) Развитие технологии блокчейн: последняя задача – работать с самим блокчейном. Блокчейн – это новая, стремительно развивающаяся технология. Незамедлительное внедрение блокчейна повлечет больше проблем с внедрением в будущем.
- 4) Поток информации: очередная серьезная проблема – управлять потоком информации между различными организациями в логистике. Если торговля носит международный характер, она усложняется из-за участия большего числа субъектов в процессе.



Рисунок 1 – Область применения блокчейна в логистике

Успех блокчейна в логистике зависит от многих факторов. Компания должна проявлять инициативу и работать над каждым из них, чтобы успешно внедрить блокчейн в свои существующие системы. По сути, каждый должен сотрудничать, улучшать свои знания о блокчейне и продвигать его ценность. Одним из таких примеров может быть работа с конкурентами над созданием стандартов блокчейна для работы в логистике. Заинтересованные стороны должны вкладывать свое время и усилия в повышение ценности уже существующих систем или проектов, которые находятся на грани реализации. Прежде чем можно будет использовать блокчейн, его необходимо перестроить для конкретных предложений. Организации должны четко определить, какие бизнес-операции будут основаны на блокчейне. Блокчейн – это новая технология, которая требует любой помощи, чтобы сделать ее зрелой и готовой к внедрению [1].

Разбор блокчейна, смарт-контрактов и как их можно применить в логистике и других сферах. За основу предлагаем взять технологию криптовалюты Ethereum. Что такое Ethereum? Ethereum – это форк (форк – изменение правил работы сети, по которым блок в блокчейне признается подлинным, своеобразное разделение, отсюда и название – от английского fork – «вилка»). Бывает два вида форков: софт и хард) Биткойна, представляет собой платформу, с помощью которой можно создавать децентрализованные онлайн-сервисы на базе блокчейна и умных контрактов. В итоге у нас получается виртуальная машина, а все участники могут пользоваться ей на равных правах [2].

Технология Ethereum. Ethereum можно назвать стейт-машиной. Это означает, что в любой момент вы можете сделать снимок файловой системы и посмотреть информацию обо всех остатках на счетах и смарт-контрактах в их актуальном виде. Определенные действия приводят к обновлению состояния системы, а это означает, что все ноды (распределенный реестр блокчейн) также обновляют свои снимки, чтобы отразить изменение (рисунок 2) [3, 4].

Смарт-контракты, выполняемые на Ethereum, инициируются транзакциями (от пользователей или других контрактов). Когда пользователь отправляет транзакцию на контракт, каждый нод в сети запускает код контракта и записывает вывод. Для этого используется виртуальная машина Ethereum (EVM), которая преобразует смарт-контракты в понятные компьютеру инструкции.



Рисунок 2 – Блокчейн «Эфириум». Переход эфириума в другое состояние

Для обновления состояния (пока что) используется специальный механизм под названием майнинг. Выполняется он с помощью алгоритма Proof of Work, очень похожего на алгоритм биткоина. Далее мы рассмотрим это подробнее [3].

В чем суть Proof-of-Work?

Proof-of-Work (PoW – дословно: доказательство работы) – алгоритм защиты распределенных систем от злоупотреблений (DoS-атак, спам-рассылок и др.), суть которого сводится к двум основным пунктам:

- необходимости выполнения определенной достаточно сложной и длительной задачи;
- возможности быстро и легко проверить результат.

PoW-задачи изначально не предназначены для человека, их решение компьютером всегда достижимо в конечные сроки, однако требует больших вычислительных мощностей. При этом проверка полученного решения требует гораздо меньше ресурсов и времени [6].

Транзакции в блокчейне и каким условиям они должны отвечать. Транзакция в блокчейне с технической точки зрения – атомарное событие, разрешенное базовым протоколом (рисунок 3).

Другими словами, транзакция – это просто событие, по мере проведения которого обновляется информация в блокчейне. Единственное отличие транзакции состоит в том, что такое изменение спектра данных касается не определенного компьютера, а всех подключенных к блокчейн-сети устройств на всей планете.

В блоках хранятся такие данные:

- данные транзакций: дата, время, сумма перевода;
- данные об участниках транзакции: адрес отправителя и получателя;
- данные о каждом блоке – это уникальный код (хеш), благодаря которому блоки можно различать между собой.



Рисунок 3 – Технология работы блокчейна

Технология смарт-контрактов. Смарт-контракты, или умные контракты, – протоколы (математические алгоритмы), используемые для проверки обязательств между участниками системы Ethereum (рисунок 4).

Как работают умные контракты



Рисунок 4 – Схема работы смарт-контрактов

Пользователь не получит перевод актива до тех пор, пока не выполнит условия, прописанные в контракте. Таким образом, выполнение обязательств обеспечивается без регулирующих и государственных органов.

Умные контракты можно использовать в разных финансовых продуктах:

- партнерские программы;
- страхование;
- периодические платежи;
- торговля;
- логистика.

Можно привести простой пример того, как умный контракт может использоваться уже сейчас. Например, два человека хотят сыграть в тотализатор и поставить на один и тот же матч. Их ставки сохраняются в блокчейне. После окончания матча смарт-контракт проверяет результат и передает выигрыш победителю [4].

В будущем подобные контракты смогут легко контролировать исполнение и более сложных обязательств. Например, человек снимает жилье, но вовремя не успел заплатить за аренду. Компьютерная программа блокирует замок в квартиру и арендатор не может открыть ее. Перспективы развития действительно огромные [5].

Смарт-контракты позволяют выполнять надежные и конфиденциальные транзакции без участия посредников и контролирующих органов. Кроме того, все транзакции легко отслеживаются в блокчейне (без указания участников сделки), их легко отследить и невозможно обратить. Последнее состояние смарт-контракта также находится в цепочке блоков, копия которой содержится на многих узлах сети, поэтому смарт-контракт невозможно подделать или удалить (рисунки 5, 6).



Рисунок 5 – Сравнение смарт-контрактов с обычными

Анализируя реальные примеры использования смарт-контрактов необходимо отметить основные преимущества относительно традиционных обычных карт.

Как показывает результат:

использование смарт-контракта имеет высокий уровень практичности, что связано с возможностью быстрой передачи электронного документа между центрами и невозможности потери файла;

смарт-карты защищаются не только законом, но и специальными алгоритмами и методами защиты информации. Вероятность факта кражи или нарушения целостности носителя у смарт-карт значительно ниже по сравнению с обычными картами;

использование смарт-карт предполагает возможность оплаты посредством электронной коммерции, в частности, электронных или криптовалютных счетов. Данный факт повышает скорость проведения и безопасность операций.



Рисунок 6 – Процесс течения активов в сети блокчейна второго поколения

Сфера применения смарт-контрактов. В XXI в. существует возможность перевода всевозможных бумажных договоров в цифровые смарт-контракты, а следовательно, появляется и широкий спектр потенциального применения. Три основные характеристики – полный учет всех данных, вечное хранение в блокчейне и надежность (отсутствие необходимости в посреднике) – делают их отличным инструментом для многих отраслей экономики и вообще аспектов жизнедеятельности человека. Рассмотрим несколько вариантов использования (рисунок 7).

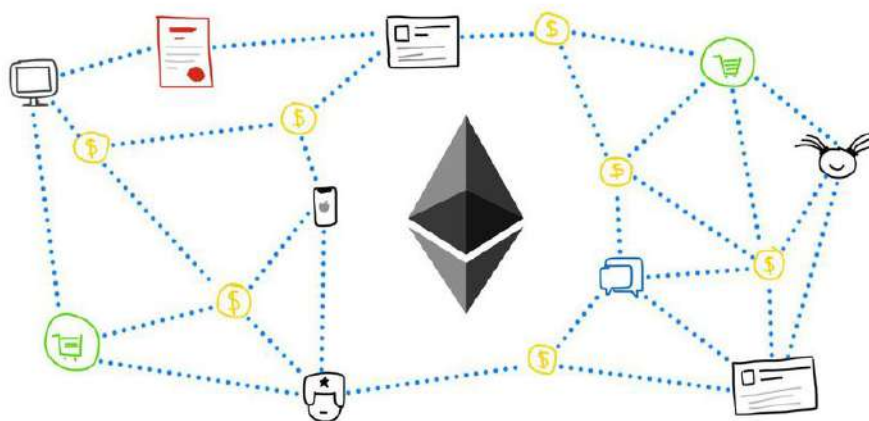


Рисунок 7 – Взаимосвязь блокчейна с социальными сферами

Страхование. При возникновении определенных событий смарт-контракты автоматически инициируют страховое требование, что упрощает и оптимизирует процесс его рассмотрения. В блокчейне можно сохранить сведения о требованиях, которые позволят застрахованному лицу определить размер компенсации. Такая возможность ускорит обработку и снизит влияние человеческих ошибок.

Голосование. Смарт-контракты помогут сделать голосование автоматическим и прозрачным. Каждый контракт выполняет роль одного бюллетеня, однозначно идентифицирующего избирателя. Так как блокчейн является неизменяемым, то и голоса невозможно подделать.

Цепочки поставок. При перемещении товара по цепочке поставок смарт-контракты могут регистрировать права собственности и подтверждать ответственность за товар того или иного лица в любой конкретный момент времени. На любом этапе процесса смарт-контракт однозначно определяет, где должны находиться продукты. Если какая-либо из сторон в цепочке поставок нарушит сроки доставки, все остальные стороны будут знать, где возникла проблема.

Хранение записей. Многие отрасли могут применять смарт-контракты для повышения скорости и надежности хранения записей. Технология блокчейна поможет оцифровать архивы и обеспечить их безопасное шифрование и хранение. Кроме того, можно регулировать доступ к архивам, разрешая его только подтвержденным пользователям.

Права собственности. В смарт-контрактах можно хранить данные о том, кому принадлежат права собственности. Это быстрый и экономичный способ сохранения прав владения. Кроме того, смарт-контракты обеспечивают быструю и безопасную передачу прав собственности [8, 9].

Анализ внедрения блокчейна в крупнейшие компании мирового ретейла и логистики.

1. Инвентаризация и отслеживание грузов.

Как есть. Международная логистика, на которую приходится 90 % мировой торговли, дискретна (раздельная, прерывистая) и использует все виды транспорта: железнодорожный, автомобильный, воздушный и морской. При этом каждый участник цепочки поставок использует собственную локальную систему учета, например, CRM, BPM, EDM, ERP или другую. Коммуникация между этими системами обычно осуществляется на аналоговом (то есть традиционном) методе, связанном с бумажными документами: курьеры, почта, факсимиле, личные встречи. Такой подход создает массу проблем:

значительная часть грузов, контейнеров и транспортных средств теряется или не используется из-за того, что они находятся «вне поля зрения» систем учета;

когда компания Walmart внедряла блокчейн в свою логистику, там провели контроль отслеживаемости манго от полки в магазине до фермы, на которой этот плод вырос. **На это ушло 6 дней 18 ч и 26 мин (с блокчейном – 2 с);**

устранение неточностей в учете требует много времени и денег.

Решить эти проблемы при традиционном подходе нельзя, так как сложные взаимодействия и бумажный документооборот необходимы для подтверждения истинности информации в системах учета и на юридическом уровне.

Как будет с блокчейном. Технология может быть использована для создания единой системы цифрового документооборота в облаке, которая позволит участникам цепочек поставок в режиме реального времени отслеживать местоположение транспортных средств, грузов и своей продукции даже на микроуровнях.

Реализуют данный кейс крупнейшие компании, такие как Walmart, Unilever, Nestle, Provenance.

Ритейлер **WalMart** одним из первых поверил в светлое будущее blockchain, он тестирует новую технологию IBM на поставках манго в США и свинины в Китае. Как полагают в компании, как утверждают сторонники этой технологии, внедрение данной технологии

повысит эффективность управления запасами и обеспечит безопасность поставляемых продуктов питания, что WalMart считает особенно важным после вспышки сальмонеллеза в 2006 г. В то время при использовании бумажного документооборота на идентификацию источника инфекции у компании ушло порядка двух недель. Блокчейн позволит получить полную информацию о любой партии товара, занесенной в базу данных, за считанные секунды.

Unilever использует блокчейн Provenance для управления цепочками поставок чая. В проекте участвует более 10000 фермеров, множество банков, ритейлеров и транспортных компаний. Это не единственный блокчейн-проект Unilever.

Nestle, как и **Walmart**, использует блокчейн Food Trust от IBM для управления цепочками поставок пищевых ингредиентов, например, картофельного пюре, молока и пальмового масла. Таким образом Nestle хочет показать покупателям, из чего сделаны их продукты.

2. Проверка подлинности и качества.

Как есть. По данным Organisation for Economic Co-operation and Development, в 2018 г. мировой рынок контрафактной продукции достиг 450 млрд долларов, что больше ВВП таких стран, как Австрия или Израиль. Другие исследования показывают ежегодную потерю 1,6 млрд т продовольствия (на сумму около 1,2 трлн. долларов), 40 % из которых – порча во время транспортировки. При этом, по оценкам CDC, значительная часть этой порчи попадает на стол потребителя, что лишь в США приводит к 130 тыс. случаев госпитализации и 3 тыс. смертельных исходов.

Как будет с блокчейном. Что касается проблемы с контрафактной продукцией, то технологии блокчейна позволяют отслеживать происхождение товаров от прилавка в магазине до конкретного изготовителя: завода, фермы, предприятия, человека. И эти данные обладают большой степенью истинности, поскольку каждая партия товара (или каждый отдельный товар, если это что-то крупное и (или) дорогое) оснащается RFID-меткой, которая постоянно отслеживает местоположение товара и взаимодействия между участниками цепочки поставок.

Помимо этого, RFID-датчики также могут измерять скорость, температуру, влажность и другие эмпирические показатели. Таким образом, можно обнаружить нарушение условий транспортировки и выявить порчу продуктов питания, а также отследить процесс или участника, который за это ответственен. Кроме того, если какой-то продукт заражен, например, бактерией E.coli, то система на базе блокчейна может за считанные секунды выявить источник заражения и отследить все зараженные партии товара.

Реализовали блокчейн компании:

1) **Everledger** использует блокчейн для алмазной промышленности. Реестр хранит данные о происхождении драгоценного камня, цвете, прозрачности, огранке, весе в каратах, номере сертификата и другие сведения.

2) **Provenance**. Проект по типу Software as a Service, который собирает и проверяет истории происхождения товаров. Его используют Martine Jarlgaard, The Grass Roots Farmers Cooperative, ассоциация Organic, Pole and Line, Co-op и многие другие организации и производители товаров по всему миру.

3) **MediLedger** использует блокчейн для управления цепочками поставок медицинских препаратов по стандартам EPCIS. К 2023 г. на этот стандарт обязаны перейти все американские фармацевтические компании.

4) **SkyCell** разработала грузовые контейнеры для перевозки медицинских грузов, требующих строгого соблюдения температурных режимов. Внутри контейнера находятся IoT-датчики, подключенные к блокчейну в облаке.

3. Улучшение фрахта и доставки.

Как есть. В типичном сценарии доставки участвуют около 30 сторон: грузоотправители и грузополучатели, 3PL, перевозчики, государственные службы, банки, страховщики и прочие. При этом во время доставки лишь одной партии товара они обмениваются более 200 бумажными сообщениями: POD (подтверждение доставки), счета-фактуры, BOL

(коносаменты). Стоимость обслуживания этой бумажной работы составляет 300 долларов или 10 – 15 % от стоимости транспортировки.

Как будет с блокчейном. По оценкам IBM, внедрение блокчейна может сэкономить логистической отрасли 38 млрд долларов в год. Это станет возможным благодаря смарт-контрактам, которые автоматизируют большую часть документооборота и бизнес-процессов. Помимо этого распределительный реестр уменьшит количество ошибок, сократит сроки доставки и позволит обнаруживать мошенничество.

Реализовали блокчейн компании:

1) **Maersk** совместно с IBM запустили логистическую систему TradeLens на базе блокчейна Hyperledger Fabric (создан Linux Foundation) для отслеживания судоводных грузовых перевозок и обмена таможенной и финансовой информацией между участниками цепочек поставок. На середину 2019 г. на долю TradeLens приходилось около 30 % мирового рынка судоводных грузоперевозок.

2) **GSBN**. Прямой конкурент Maersk с сопоставимой долей на рынке. В проекте участвуют Evergreen Marine, COSCO, CMA CGM, Yang Ming и OOCL. Технический партнер – CargoSmart.

3) **VeChain**. Сингапурская BaaS-платформа для управления логистикой и цепочками поставок. Ее используют BMW, Renault, DNV-GL, H&M Group и другие бренды.

4) Второй в Европе по объему контейнерного грузооборота порт **Антверпена** (Бельгия) в конце июня 2021 г. объявил о запуске пилотного блокчейн-проекта, нацеленного на оптимизацию логистических процессов. Пилотное тестирование будет проводиться в сотрудничестве с blockchain-стартапом T-Mining. По мнению создателей проекта, технология blockchain способна повысить прозрачность обмена данными и ускорить взаимодействие между участниками логистических процессов и клиентами порта. Это, в свою очередь, минимизирует вероятность каких-либо манипуляций данными (рисунок 8).



Рисунок 8 – Блокчейн-аналитика

4. Запуск фрахтового рынка.

Как есть. В текущем состоянии фрахтовый рынок неэффективен и непонятен. Здесь нет четких стандартов и правил, которые урегулировали бы вопросы ответственности сторон за соблюдение сделок и явное или неявное мошенничество. Кроме того, этот рынок непрозрачен, что довольно часто приводит к непрогнозируемым изменениям стоимости фрахта несмотря на отсутствие существенных изменений в спросе и предложении, как было, к примеру, в начале 2019 г., когда рынок впал в шоковое состояние из-за стремительного падения ставок балкерного тоннажа.

Как будет с блокчейном. Технология блокчейна и смарт-контракты могут быть использованы для создания справедливой торговой площадки, где компании смогут нанять грузоперевозчиков в кратчайшие сроки на понятных и прозрачных условиях. При этом, поскольку все условия контрактов будут заранее прописаны в смарт-контрактах, возрастет

уровень ответственности компаний, так как она будет наступать сразу же в автоматическом порядке, а не после долгих переговоров и (или) решения арбитражного суда.

Реализовали блокчейн компании:

ShipChain работает над улучшением логистики с помощью технологий блокчейна. Система использует смарт-контракты с открытым исходным кодом, которые легко интегрируются практически во все существующие логистические решения на основе блокчейна. Эти контракты созданы для сопровождения логистических операций и направлены на создание децентрализованного фрахтового рынка, а также отслеживание ошибок и предотвращение краж. ShipChain входит в альянс BiTA (Blockchain in Transport Alliance), через который проходит более 80 % всех мировых перевозок.

5. Улучшение прозрачности.

Как есть. Большой проблемой цепочек поставок является низкий уровень достоверности проверяемой информации, что является прямым следствием отсутствия прозрачности в отрасли. К примеру, из-за отсутствия прозрачности в формировании стоимости перевозки (закупки, транспортировки, хранения) многие компании переплачивают за доставку своего товара к потребителю, а из-за отсутствия возможности у грузоотправителя контролировать процесс доставки на рынке процветают «серые» схемы, контрабанда и контрафакт.

Как будет с блокчейном. Поскольку все данные хранятся в блокчейне, каждый участник цепочки поставок может в любое время проверить информацию по каждому судну, контейнеру и(или) грузу, что уменьшает вероятность расхождения в документации разных сторон.

Что даст повышение прозрачности в логистике:

позволит сторонам видеть свидетельства прошлых результатов контрагента, включая задержки с доставкой, оплатой и т. п.;

уменьшит вероятность расхождения в документации, например, когда перевозчик и грузополучатель неправильно трактуют время доставки;

даст возможность контролировать процесс доставки на микроуровне, что снизит уровень мошенничества, неточностей и будет противодействовать контрабанде и «серым» схемам.

Реализовали блокчейн компании:

Provenance создала BaaS-решение, которое увеличивает прозрачность цепочек доставки, дает доступ к важной информации всем участникам (включая конечных потребителей) и позволит обеспечить справедливую компенсацию участникам логистического процесса в случае нарушения их прав или нарушения контрактов [7].

На основании изложенного можно сделать вывод.

Blockchain – это технология XXI в., которая находит и может найти применение во многих отраслях экономики. Применение и развитие данной технологии будет способствовать улучшению как экономики, так и технологических процессов в цепочках поставок. Нельзя исключать, что существует ряд проблем при внедрении данной технологии в управление перевозочным процессом, таких как использование различных моделей хранилищ данных, его интеграция в существующую ИТ-систему. И прежде чем использовать эту технологию, участники перевозочного процесса должны определить, какие бизнес-операции будут проводиться в сети blockchain.

Чтобы реализовать данную технологию в странах СНГ, необходимо переподготовить и обучить кадры, оптимизировать сферу информационных технологий, создать единую цифровую экосистему, на основе которой будут работать все участники рынка транспортных услуг, включая регулирующие органы, необходимо развитие имеющихся и создание новых транспортных коридоров с применением современных технологий с целью ускорения перевозочного процесса.

Блокчейн – это новая технология, которая требует тщательного изучения, чтобы быть готовой к использованию в перевозочном процессе и внедрению в государственные системы.

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

В результате проведенного анализа установлено, что компании, начинающие использовать представленные в статье блокчейн-технологии, имеют возможность значительно увеличить эффективность перевозочного процесса. В частности, благодаря использованию смарт-карт вместо обычных бумажных значительно снижается время проведения банковских операций и увеличивается уровень безопасности документации. Помимо этого цифровизация данной сферы способна полностью заменить бумажный документооборот на электронный, что также повлияет на повышение уровня эффективности работы организаций за счет скорости выполнения операций и экономии на зарплате сотрудников.

Список предприятий, внедряющих технологию блокчейн

Компания	Сектор	Решение блокчейн
Walmart	Розничная торговля	Использование технологии блокчейн для отслеживания движения продуктов от фермеров до магазинов
British Airways	Индустрия путешествий	Внедрение технологии блокчейн для управления полетными данными и для проверки личности путешественников
Maersk	Морские доставки	Для отслеживания движения грузов между портами
BHP Billiton	Горнодобывающая промышленность	Использование технологии блокчейн для управления цепочками поставок
Tencent	Электронная коммерция/розничная торговля	Решение для проверки подлинности счета и обеспечения налогового соответствия
Toyota	Автоиндустрия	Планирование использования технологии блокчейна для улучшения технологии автономного вождения
UnitedHealthcare/Humana	Здравоохранение	Использование технологии блокчейн для улучшения каталогов врачей и для обеспечения точного заполнения страховых претензий
UPS	Доставка	Логистическое решение блокчейн для мониторинга и управления логистикой
Baidu	Поисковый гигант	Использование блокчейн для улучшения управления интеллектуальными правами
Samsung	Техника	Использование технологии блокчейн для улучшения управления цепочками поставок, когда речь идет о поставках электроники
FedEx	Доставка	Работа над блокчейн-решением для разрешения споров с клиентами
Alibaba	Электронная коммерция	Использование технологии блокчейн для отслеживания предметов роскоши на платформах электронной коммерции
AIA Group	Страхование	Запущено первое в своем роде банковское страхование для обмена данными по полисам
Metlife	Здравоохранение	Использование технологии блокчейн для хранения медицинских карт пациентов в страховых целях
Facebook	Техника	Изучение использования технологии блокчейн для повышения безопасности данных и конфиденциальности пользователей
Ford	Автомобили	Использование технологии блокчейн для повышения технологий мобильности
Prudential	Страхование	Представление торговой платформы на базе технологии блокчейн для малых и средних предприятий
Apple	Техника	Запатентованная технология блокчейн для меток времени
Nestle	Торговля	Использование технологии блокчейн в управлении поставками для отслеживания продуктов детского питания
Google	Техника	Изучение использования технологии блокчейн для повышения безопасности облачных сервисов и защиты данных

Однако это не является единственным преимуществом использования блокчейна в логистике. Авторами в данной статье приводилось множество примеров, подтверждающих эффективность и рациональность использования данной технологии в изучаемой области. Исходя из всего сказанного необходимо отметить, что хотя технология блокчейн и является относительно новым и малоизученным понятием, ее потенциал многократно превышает ожидания и современный уровень развития. Таким образом, в современном мире требуется увеличить количество направляемых интеллектуальных и материальных ресурсов в сторону развития данной технологии, в частности, в организации перевозочного процесса и цепочке поставок.

Список литературы

1. Роль блокчейна в логистике и проблемах внедрения // 3commas.io/ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://3commas.io/ru/blog/rol-blokchejna-v-logistike-i-problemy-vnedreniya> (дата обращения: 04.15.2022).
2. Контейнерные железнодорожные перевозки на Евразийском пространстве в 2020 году : Информационно-аналитический обзор. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.yandex.ru/docs/> (дата обращения: 02.12.2021).
3. Шило, А. Э. Транспортно-логистическое направление / А. Э. Шило. – Текст : электронный // РЖД-Партнер.ру. – 2021. – URL: <https://ar2020.rzd.ru/ru/performance-overview/> (дата обращения: 09.12.2021).
4. Контейнерные железнодорожные перевозки на Евразийском пространстве в первом полугодии 2021 года : Информационно-аналитический обзор. – Текст : электронный. – URL: <https://clck.yandex.ru/redirect/ ERAI-July-2021-RU.pdf> (дата обращения: 02.12.2021).
5. Defraeye, T., Tagliavini, G., Wu, W., Prawiranto, K., Schudel, S., Assefa Kerisima, M., Verboven, P., Bühlmann, A. Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, pp. 778-794.
6. Мухамедова З. Г., Эргашева З. В. К вопросу о развитии транспортной инфраструктуры Узбекистана / З.Г. Мухамедова, З.В. Эргашева. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 105–113.
7. Mukhamedova Z. G. Mathematical Model for Calculation of Oscillations in the Main Bearing Frame of Railcar with Changing Stiffness and Physical Parameters, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2017, no. 10 (5), pp. 682-690.
8. Grau, M., Gresens, C., Vettermann, S., Wagner, L. Enabling the digital thread for shipbuilding and shipping. *Royal Institution of Naval Architects - 19th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*, 1, 2019, pp. 72-78.
9. Harrison, R. Dynamically Integrating Manufacturing Automation with Logistics. *24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2019*, pp. 21-22.
10. Hostmann, B., Rayner, N. Gartner RAS Core Research Note. Gartner's Business Intelligence: Analytics and Performance Framework. *Gareth Herschel*, 19 October, 2019, p. 71.
11. Kaewunruen, S., Lian, Q. Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems. *Journal of Cleaner Production*, 2019, pp. 1537-1551.
12. Kavka, L., Kodym, O., Cempírek, V. Smart units in control of logistics processes. *18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM*, 2018, pp. 701-708.
13. Мухамедова, З. Г. Экономико-математическая модель контейнерного блок-трейна // З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева. – Текст : непосредственный // Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 30–36.

14. Mukhamedova Ziyoda Gafurjanovna, Yakubov Mirjalil Sagatovich. Analysis of optimal periodicity of preventive maintenance of rail service car taking into account operational technology.// *European science review*, 2018. pp. 167-171.

15. Z.G Mukhamedova. Modeling of fluctuations in the main bearing frame of railcar, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48-53.

16. Мухамедова, З. Г. Технологическая схема работы блок-трейнов / З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева, Э. А. Асатов. – Текст : непосредственный // Научно-практический журнал. Общественная безопасность. Университет общественной безопасности Республики Узбекистан. – 2021. – № 3. – С. 130–134.

References

1. The role of blockchain in logistics and implementation problems. Available at: <https://3com-mas.io/ru/blog/rol-blokchejna-v-logistike-i-problemy-vnedreniya> (accessed: 04/15/2022).

2. *Container rail transportation in the Eurasian space in 2020* [Information and analytical review]. Available at: <https://docs.yandex.ru/docs/> (accessed 12/02/2021).

3. *Transport and logistics direction* [RZD-Partner.ru]. Available at: <https://ar2020.rzd.ru/ru/performance-overview/> (accessed 12/09/2021).

4. *Container rail transportation in the Eurasian space in the first half of 2021* [Information and analytical review]. Available at: <https://clck.yandex.ru/redirect/ ERAI-July-2021-RU.pdf> (accessed 02.12.2021).

5. Defraeye, T., Tagliavini, G., Wu, W., Prawiranto, K., Schudel, S., Assefa Kerisima, M., Verboven, P., Bühlmann, A. Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, pp. 778-794.

6. Mukhamedova Z.G., Ergasheva Z.V. To the question of the development of the transport infrastructure of Uzbekistan /Z.G. Mukhamedova, Z.V. Ergasheva. *Izvestia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2021. no. 2(46), pp.105-113 ISSN 2220-4245 (In Russian).

7. Mukhamedova Z. G. Mathematical Model for Calculation of Oscillations in the Main Bearing Frame of Railcar with Changing Stiffness and Physical Parameters, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2017, no. 10 (5), pp. 682-690.

8. Grau, M., Gresens, C., Vettermann, S., Wagner, L. Enabling the digital thread for shipbuilding and shipping. *Royal Institution of Naval Architects - 19th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*, 1, 2019, pp. 72-78.

9. Harrison, R. Dynamically Integrating Manufacturing Automation with Logistics. *24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2019*, pp. 21-22.

10. Hostmann, B., Rayner, N. Gartner RAS Core Research Note. Gartner's Business Intelligence: Analytics and Performance Framework. *Gareth Herschel*, 19 October, 2019, p. 71.

11. Kaewunruen, S., Lian, Q. Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems. *Journal of Cleaner Production*, 2019, pp. 1537-1551.

12. Kavka, L., Kodym, O., Cempírek, V. Smart units in control of logistics processes. *18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM*, 2018, pp. 701-708.

13. Mukhamedova Z.G., Ergasheva Z.V. Economic and mathematical model of a container block train. *Texnicheskiye nauki –Technical sciences*, no. 3, 2021, pp. 30-36. (In Russian).

14. Mukhamedova Ziyoda Gafurjanovna, Yakubov Mirjalil Sagatovich. Analysis of optimal periodicity of preventive maintenance of rail service car taking into account operational technology.// *European science review*, 2018, pp. 167-171.

15. Z.G Mukhamedova. Modeling of fluctuations in the main bearing frame of railcar, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48-53, ISSN 2067-3604.

16. Mukhamedova Z.G., Ergasheva Z.V., Asatov E.A. Technological scheme of block trains operation. *Obwestvennaya bezopasnost. Universitet obwestvennoy bezopasnosti Respubliki Uzbekistan – Scientific and practical journal. Public safety. The university of public safety of the republic of Uzbekistan*, no. 3. 2021. pp. 130-134 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мухамедова Зиеда Гафурджановна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

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

Доктор технических наук, доцент кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: + 998 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Осадчук Владислав Демьянович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

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

Студент бакалавриата по направлению «Организация грузоперевозок и транспортная логистика», ТГТрУ.

Тел.: + 998 (91) 192-13-14.

E-mail: osadchuk_vladislav_02@mail.ru

Тулаев Алтинбек Умарбекович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

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

Докторант ТГТрУ.

Тел.: + 998 (90) 359-33-99.

E-mail: aho-777@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мухамедова, З. Г. Перспективы использования технологии блокчейн в организации перевозочного процесса и цепочке поставок / З. Г. Мухамедова, В. Д. Осадчук, А. У. Тулаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 142 – 156.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mukhamedova Ziyoda Gafurdjanovna

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiriylchilar st., Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Doctor Of Sciences in Engineering, associate professor of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: + 998 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Osadchuk Vladislav Demyanovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiriylchilar st., Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Undergraduate student, specialization «Organization of cargo transportation and transport logistics», TSTU.

Phone: + 998 (91) 192-13-14.

E-mail : osadchuk_vladislav_02@mail.ru

Tulaev Altinbek Umarbekovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiriylchilar st., Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the Tashkent State Transport University (TSTU).

Phone: + 998 (90) 359-33-99.

E-mail: aho-777@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mukhamedova Z. G., Osadchuk V.D., Tulaev A.U. Prospects for the use of blockchain technology in the organization of the transportation process and supply chain. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 142-156 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- управление процессами перевозок;
- железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- теоретическая и прикладная теплотехника;
- энергетические системы и комплексы;
- электроэнергетика;
- электротехнические комплексы и системы;
- автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционного совета журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления материалов научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию Журнала представляются:

1. Текст статьи на бумаге формата А4.
2. Текст статьи в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc или фамилия.docx.
3. Экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати (по форме, принятой в организации авторов).
4. Отчет о проверке на заимствования в системе «Антиплагиат» (<https://www.antiplagiat.ru/>). Оригинальность должна составлять не менее 80 %.
5. Гарантийное письмо о передаче авторского права с подписями всех соавторов статьи.

В тексте статьи обязательно указывается тематический раздел журнала, в который подается статья и научная специальность, которой она соответствует.

Текст статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (рекомендуемый объем списка литературы – от 5 до 10 наименований), транслитерацию и перевод списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках. Текст статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим основные фактические сведения и выводы описываемой работы; текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок; сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации; объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов; аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы, метод или методологию проведения работы, результаты работы, область применения результатов, выводы; дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированной (следовать логике описания результатов в статье), «англоязычной» (написанной качественным английским языком), необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт); текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм); размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт; размеры символов в формулах (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (0); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»; в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (-); необходимо использовать французские кавычки («ёлочки»);

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подписанные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт; межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см; автоматическую нумерацию необходимо полностью исключить; инициалы и фамилии не должны отделяться друг от друга;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде; рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следуют списки литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык; ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (5 – 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100–2018; в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется в соответствии с образцом (прилагается);

при публикации научной статьи на русском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках; публикация статей с полным текстом на иностранном языке не допускается.

Материалы статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число авторов статьи не должно превышать трех человек, в ином случае необходимо отдельное согласование с редакцией. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц без учета аннотаций и списков литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста. Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации в разных выпусках Журнала.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией окончательного текста. Принятые к публикации материалы статей не возвращаются авторам. Материалы, оформленные с нарушением указанных выше требований, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 2 (50) 2022

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), реестровый номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в официальном каталоге «Подписные издания» АО «Почта России» – ПП914.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издание выходит с периодичностью 4 выпуска в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии:

644046, Омская область, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;

тел.: +7 (3812) 31-05-54;

e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 27.06.2022.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 30.06.2022.

