

Главный редактор Д. П. Кононов, докт. техн. наук, доцент
Editor-in-chief D. Kononov, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Заместитель главного редактора А. М. Евстафьев, д-р техн. наук, профессор
Deputy chief editor A. Evstafev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Научный редактор Т. С. Титова, д-р техн. наук профессор
Scientific Editor T. Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Перевод на английский язык И. Л. Лютомская
English translation Irina L. Liutomskaja
Литературное редактирование и корректура Н. В. Юдина
Editing and proofreading Nadezhda V. Yudina
Верстка И. Г. Иваньшина
Layout Irina G. Ivanshina

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Центр РИОР» по договору № ЭА78751 от 28.12.2024

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Limited Liability Company "Publishing Center RIOR", under contract N ЭА78751 dated 28.12.2024

Контакты

190031, СПб., Московский пр., 9, тел. (812) 457-85-36;
e-mail: brni@pgups.ru;
127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402

Contacts

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 457-85-36;
e-mail: brni@pgups.ru;
127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, office 402

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ЭЛ № ФС 77-45490 от 22.06.2011 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Mass media registration certificate number

ЭЛ N ФС 77-45490 dd. 22.06.2011 issued by the The Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

The Journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI)

Журнал имеет институт рецензирования

The Journal has the Peer-review division

Журнал распространяется через Интернет без ограничений и по адресно-целевой подписке через редакцию

The Journal is distributed via Internet for free and by subscription via Editorial office

Минимальные системные требования

Тип компьютера, процессор, сопроцессор, частота: Pentium IV и выше; оперативная память (RAM): 256 Мб и выше; необходимо на винчестере: не менее 64 Мб; ОС MacOS, Windows (XP, Vista, 7); видеосистема: встроенная; дополнительное ПО: Adobe Reader версия от 7.X или аналог. Защита от незаконного распространения: реализуется встроенными средствами Adobe Acrobat

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

INTERNATIONAL EDITORIAL

Валинский Олег Сергеевич, канд. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель Совета
Oleg Valinskiy, PhD Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Хамидов Отабек Рустамович, д-р техн. наук, доц., Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан
Otabek Khamidov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Tashkent State Technical University, Tashkent, The Republic of Uzbekistan

Вэйли Ли, профессор, Институт электрических машин и приборов, Пекинский университет Цзяотун, Пекин, Китай
Weili Li, PhD Degree and Professor, School of Electrical Engineering, Director of Institute of Electrical Machinery and Appliances, Beijing Jiaotong University, Beijing, China

Ли Фушэн, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай
Li Fusheng, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China

Поляк Милош, профессор, Жилинский университет, Жилин, Словацкая Республика
Milos Poliak, Ing. PhD, Professor, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

Стыскала Витезслав, профессор, Оставский технический университет, Острава, Чешская Республика
Vitezslav Styskala, PhD, Associate Professor, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic

Чжан Чжунъян, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай
Zhang Zhongyang, University Degree, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Professor, Secretary of the School of Locomotives and Rolling Stock, Zhengzhou, China

Бельтюков Владимир Петрович, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Vladimir Belyukov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Блашко Людмила Сергеевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Liudmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Бороненко Юрий Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Yuriy Boronenko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грачев Владимир Васильевич, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Vladimir Grachev, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грищенко Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Alexander Grishchenko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Дудкин Евгений Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Evgeniy Dudkin, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Евстафьев Андрей Михайлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Andrey Evstafev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Журавлева Наталья Александровна, д-р экон. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Natalya Zhuravleva, D. Econ. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Ким Константин Константинович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Konstantin Kim, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Колпакчян Павел Григорьевич, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Pavel Kolpakchyan, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Липидус Лариса Владимировна, д-р экон. наук, профессор, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Larisa Lapidus, D. Econ. Sci., Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Никитин Александр Борисович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Alexander Nikitin, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Никитин Виктор Валерьевич, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Victor Nikitin, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Покровская Оксана Дмитриевна, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Oksana Pokrovskaya, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Пудовиков Олег Евгеньевич, д-р техн. наук, доц., РУТ, Москва, Россия
Oleg Pudovikov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia

Рачек Светлана Витальевна, д-р экон. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
Svetlana Rachek, D. Econ. Sci., Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

Титова Тамила Семеновна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Тамила Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Штыков Валерий Иванович, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Valerij Shtykov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДЛАГАЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «БЮЛЛЕТЕНЬ РУЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

1.1 Тема и содержание представляемой для публикации статьи должны соответствовать профилю журнала, обладать научной новизной и представлять интерес для специалистов.

1.2 Статьи, ранее опубликованные или переданные в другие издания, в журнал не принимаются.

1.3 Результаты исследований должны соответствовать одному из научных направлений: Транспортные системы, Энергетика и электротехника, Экономика.

1.4 Нижеперечисленные материалы предоставляются в электронном виде в одном архивном файле (zip или rar):

Файл 1 – рукопись научной статьи в формате MS Word.

Файл 2 – первая страница рукописи, подписанная автором (авторами).

Файл 3 – согласие на обработку персональных данных, заверенное личной подписью, в сканированном виде.

Файл 4 – информация об авторах:

- ФИО полностью,
- дата рождения,
- место работы, должность,
- ученая степень и звание,
- паспортные данные (серия, номер, кем и когда выдан),
- e-mail, телефон,
- адрес.

Файл 5 – название статьи, аннотация, ключевые слова, библиографический список на английском языке в формате MS Word.

Файл 6 – экспертное заключение о возможности опубликования рукописи в открытом доступе, заверенное по месту обучения или работы, в сканированном виде.

Файл 7 – рецензия научного руководителя (для студентов-исследователей, магистров, аспирантов и соискателей ученых степеней).

Файл 8 – лицензионный договор.

1.5 Все рукописи проходят рецензирование (внешняя экспертная оценка).

В случае отрицательного отзыва рукопись возвращается автору на доработку. В случае повторного отрицательного отзыва статья отклоняется.

После получения положительной рецензии с рекомендацией к публикации рукопись передается в издательство и проходит предпечатную подготовку.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

Объем статьи – не менее 8 и не более 15 страниц при наборе текста в формате Word 14-м кеглем через одинарный интервал.

На первой странице рукописи помещаются УДК, фамилии авторов (с указанием места обучения или работы), название статьи, аннотация и ключевые слова. Текст должен содержать введение, озаглавленные разделы, заключение.

Формулы должны быть набраны шрифтом Times New Roman в тексте статьи или в программе Math Type. Буквы латинского алфавита в тексте и формулах набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – обычным шрифтом. Нумеровать нужно только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Формат страницы – А4; каждое поле – 2,5 см; абзацный отступ – 1 см; размер шрифта 14, выравнивание по левому краю; автор (авторы) с указанием места обучения или работы – размер шрифта 14, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; название рукописи – размер шрифта 14, строчные буквы, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; аннотация, ключевые слова – размер шрифта 12, выравнивание по ширине.

Требуемый объем **аннотации** – 200–250 слов. В аннотации должны быть указаны цель, методы, результаты, практическая значимость работы.

Библиографический список приводится в конце статьи и составляется по мере упоминания работ в тексте. Ссылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках.

Рисунки, графики и таблицы должны иметь номер и заголовок (размер шрифта 12, выравнивание по центру).

Внимание! Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

Фотографии предоставляются в двух вариантах: в тексте статьи и в виде отдельных файлов TIFF и JPEG без сжатия. Название файла должно соответствовать подрисуночной подписи. Сканирование материалов из альбомов, журналов, буклетов, газет и книг влечет за собой сильное понижение качества изображения. Используйте функцию Descreen. Если Вы сканируете фото самостоятельно, выставляйте разрешение 300 dpi (большее не имеет смысла, меньшее приведет к понижению качества). То же самое касается рисунков, графиков и диаграмм, созданных в CorelDRAW и Illustrator. Помещайте в файл в формате Word рисунки только в качестве preview-версии, не забывая прилагать отдельно исходники.

Важная информация. Настоящие требования могут быть изменены без оповещения авторов. Неисключительные права на все материалы, опубликованные на сайте журнала, кроме оговоренных случаев, принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС. Все материалы, авторские права на которые принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС, могут быть перепечатаны при наличии письменного разрешения ФГБОУ ВО ПГУПС. Требуется предварительное согласие на перепечатку со стороны издателя.

Содержание

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

М. Ю. Хажеева, Е. Ю. Дульский, В. Н. Иванов, В. А. Кручек	Анализ режимов сушки увлажненной изоляции тяговых двигателей локомотивов с позиции энергосбережения	7
Л. В. Цыганская, Н. А. Таничева, Д. Г. Бейн	Проектирование и расчет элементов крепления съемных многооборотных средств для перевозки грузов в универсальных вагонах-платформах	18
Шэнь Цзеи, А. Е. Цаплин	Применение технологии неразрушающего контроля на подвижном составе и перспективы ее развития	31
Д. Н. Солин, А. А. Шамрай, Д. В. Даниленко	Определение дефектов на поверхности катания колес грузового вагона посредством устройства мониторинга, установленного на буксе	45
С. Б. Сатторов, Ш. У. Саидивалиев, Р. Ш. Бозоров	Распределение локомотивов по железнодорожному узлу с помощью внедрения интеллектуальных систем планирования	62
В. И. Легкая	Применение фильтра низких частот для снижения влияния методической погрешности измерительного тракта в структуре системы автоматического управления скоростью	72
С. Ф. Алеков, А. С. Куликов, Т. В. Голубчик, М. А. Иванов	Исследование модели ездового цикла электровоза с экспериментальным накопителем электроэнергии в процессе маневровых работ	88
И. А. Кремлев, Е. Ю. Салита, И. А. Терехин	Повышение эффективности заземления устройств контактной сети на участках переменного тока	106
А. А. Воробьев, А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин, В. С. Майоров, С. А. Краснобрыжий	К вопросу о воздействии гидродинамических факторов на береговые железнодорожные сооружения	119
В. Ф. Куликов	О повышении надежности элементов пневматической части тормозной системы грузового вагона	131
В. А. Шаряков, С. А. Теличенко, К. В. Марков	Анализ эффективности использования накопителей энергии на дизельных электропоездах на участке с малым пассажиропотоком Зеленогорск — Выборг	149

Н. А. Кекиш, Д. О. Мамлев	Организация смешанного движения по инфраструктуре ВСМ с интеграцией ускоренных контейнерных поездов	158
А. В. Агунов, А. А. Карабанов, И. Ю. Абдулхаков, К. М. Саргсян	Обеспечение электромагнитной совместимости устройств компенсации реактивной мощности в каналах поездной радиосвязи диапазона гектометровых волн	172
Ли Июань, И. П. Викулов	Развитие технологии борьбы с гололедом на контактной сети железных дорог	183

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

М. В. Шевлюгин, М. Р. Ради	Технико-экономический анализ интеграции солнечных электростанций в энергосистему Тартуса (САР)	201
-------------------------------	--	-----

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

О. О. Ткачев	Экономическая эффективность использования пассивных экзоскелетов на промышленных предприятиях в рамках перехода к тотальной роботизации производства и сокращению человеческого фактора	211
Е. М. Волкова, М. А. Лякина, О. О. Рахимов	Выявление тенденций развития логистики распределения и оценка возможностей их применения в холдинге «РЖД»	228

Contents

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

M. Yu. Khazheeva, E. Yu. Dulskiy, V. N. Ivanov, V.A. Kruchek	Investigating Drying Modes of the Traction Motor Moistened Insulation on Locomotives from the Perspective of Energy Efficiency	16
L. V. Tsyganskaya, N. A. Tanicheva, D. G. Bein	Designing and Calculating Fastening Elements of Removable Multi-Trip Devices for Transporting Cargo in Universal Flat Wagons	28
Shen Jieyi, A. E. Tsaplin	Application of Non-Destructive Testing Technology on Rolling Stock and Prospects for Its Development	42
D. N. Solin, A. A. Shamray, D. V. Danilenko	Defect Detection on the Freight-Car Wheel Surface with a Monitoring Device Mounted on the Axle Box	58
S. B. Sattorov, Sh. U. Saidivaliev, R. Sh. Bozorov	Dispatching Locomotives Across a Railway Junction Using the Intelligent Planning System	70
V. I. Legkaya	Application of a Low-Pass Filter to Reduce the Influence of Measurement Path Errors in the Automatic Speed Control System	86
S. F. Alekov, A. S. Kulikov, T. V. Golubchik, M. A. Ivanov	Studying an Electric Locomotive Driving Cycle Model with an Experimental Electric Energy Storage Device for Shunting Operations	103
I. A. Kremlev, E. Yu. Salita, I. A. Terekhin	Increasing the Efficiency of Grounding the Overhead Catenary Supports on AC Railway Sections	116
A. A. Vorobiev, A. S. Vataev, Ya. S. Vatulin, V. S. Mayorov, S. A. Krasnobryzhiy	On the Issue of Hydrodynamic Forces Acting on Coastal Railway Structures	129
V. F. Kulikov	Improving the Reliability of the Pneumatic Elements in a Freight Car Braking System	146

V. A. Sharyakov, K. V. Markov, S. A. Telichenko	Analyzing the Energy Storage System Efficiency Onboard Diesel-Electric Trains on the Zelenogorsk — Vyborg Railway with Low Passenger Traffic	156
N. A. Kekish, D. O. Mamlev	Mixed Traffic on HSR Infrastructure with Integrated Express Container Trains	169
A. V. Agunov, A. A. Karabanov, I. Yu. Abdulkhakov, K. M. Sargsyan	Ensuring Electromagnetic Compatibility of Reactive-Power Compensation Devices in Train Hectometre-Wave Radio Channels	181
Li Yiyuan, I. P. Vikulov	Development of an Anti-Ice/Ice-Melting Technology for Railway Catenary Systems	198

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

M. V. Shevlyugin, M. R. Radi	A Techno-Economic Analysis of the Integration of Solar Power Plants into the Tartus Power System (Syrian Arab Republic)	209
---------------------------------	---	-----

ECONOMICS AND MANAGEMENT

O. O. Tkachev	Economic Efficiency of Using Passive Exoskeletons in Industrial Enterprises Within the Framework of the Transition to Total Robotization of Production and Reduction of the Human Factor	225
E. M. Volkova, M. A. Lyakina, O. O. Rahimov	The Distribution Logistics Trends, Their Identification, Development and Application in the “Russian Railways” Holding Company	237

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.423.31

Анализ режимов сушки увлажненной изоляции тяговых двигателей локомотивов с позиции энергосбережения

М. Ю. Хажеева¹, Е. Ю. Дульский¹, В. Н. Иванов¹, В. А. Кручек²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 664074, Иркутск, Чернышевского, 15

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Хажеева М. Ю., Дульский Е. Ю., Иванов В. Н., Кручек В. А. Анализ режимов сушки увлажненной изоляции тяговых двигателей локомотивов с позиции энергосбережения // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 7–17. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-7-17

Аннотация

Цель: В данной статье рассмотрены современные проблемы, требующие повышения надежности тяговых двигателей локомотивов, эксплуатируемых в горных рельефах и в сложном климате. В процессе эксплуатации подвижного состава отрицательные экстремальные температуры оказывают большое влияние на изоляцию оборудования. Путем изменения длительности циклов и периодов работы нагревательных элементов с течением времени в каждом последующем цикле характеризуются технологические процессы протекания сушки. **Методы:** Сравнение имеющихся режимов энергоподвода в процессе сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей методом подбора управления специальной установкой. Использование известных уравнений для построения кривой нагрева и охлаждения в процессе сушки. **Результаты:** В результате приведенных сравнений режимов энергоподвода предложен комбинированный метод регулирования сушкой увлажненной изоляции. Полученные результаты позволяют производить качественную сушку увлажненной изоляции на основе фактической степени увлажнения материала. К каждому рассматриваемому режиму энергоподвода построены графики зависимостей мощности нагревателей и вентилятора калориферной установки от времени сушки, на которых видно, как изменяются показатели кривых нагрева изоляции и энергопотребления. **Практическая значимость:** Полученные результаты указывают на необходимость использования трехциклового метода сушки увлажненной изоляции на основе фактического значения увлажненности изоляции оборудования. Указанный метод энергоподвода позволяет решить актуальную проблему тем, что улучшается качество высушиваемого оборудования, сокращаются расходы на электроэнергию и увеличивается продолжительность работы.

Ключевые слова: Сушка изоляции, электрокалориферный метод, режимы сушки изоляции, переменный энергоподвод, степень увлажнения, надежность тягового двигателя.

В процессе длительной эксплуатации тягового подвижного состава на территориях со сложными климатическими условиями, обусловленными резкими перепадами температур, возникает процесс увлажнения изоляции силового оборудования путем проникновения влаги во внутрь. Результатом является снижение диэлектрической прочности силового оборудования, что может привести к ее электрическому пробое.

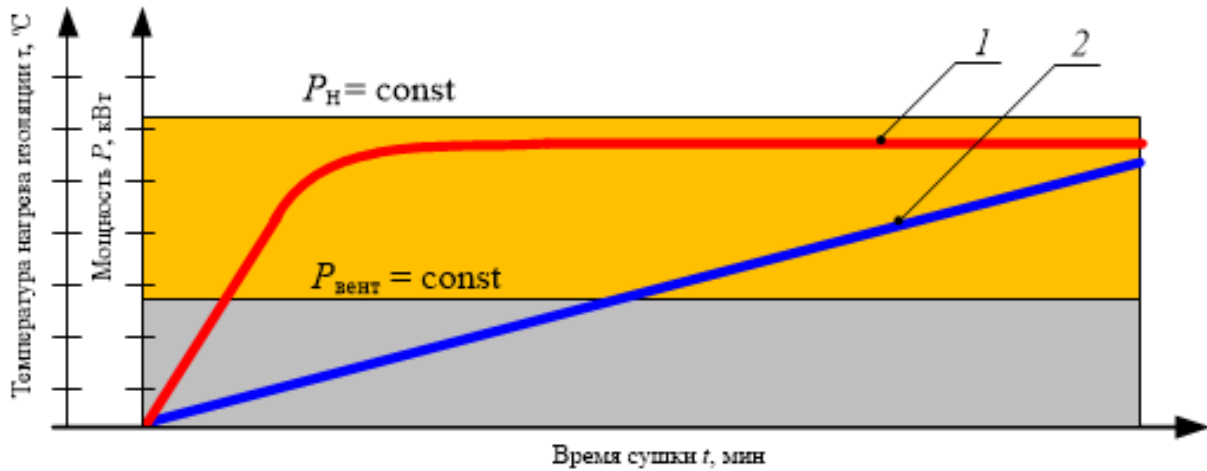


Рис. 1. График работы электронагревателя калорифера при постоянном режиме:
1 — кривая нагрева изоляции; 2 — кривая энергопотребления

Проникновение влаги вглубь изоляционного материала осуществляется на капиллярном уровне, в случаях если в ней образуются микрополости и сквозные каналы, обусловленные возникновением микротрещин и полостей между слоями изоляции в процессе усадки, вызванной старением или некачественным ремонтом, в частности намоткой новой изоляции и ее укладки в пазы сердечника (якоря или статора). Помимо этого, полости могут образовываться из-за некачественной пропитки изоляции [1].

Таким образом, наличие микрополостей в изоляции в процессе эксплуатации тягового подвижного состава из-за постоянного воздействия вибрации приводит к еще большему увеличению количества и размеров микротрещин, образующих между собой каналы для перемещения влаги за счет капиллярного эффекта, что будет подробно рассмотрено в дальнейших статьях.

Фактическое увлажнение и температура изоляции тяговых двигателей локомотивов в процессе эксплуатации как в статике, так и в динамике напрямую зависят от совокупного влияния ее структуры, в частности влаго- и теплопереноса во внутренних слоях, а также от влияния внешних факторов на тепломассообмен на ее поверхности.

Для точного моделирования процесса тепломассообмена изоляции в процессе ее эксплуатации и ремонта, в частности сушки, требуется решить систему нелинейных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями, зависящими в первую очередь от режима сушки [2].

Таким образом, данная статья посвящена анализу существующих режимов сушки увлажненной изоляции тяговых двигателей локомотивов.

Далее проанализируем особенности различных режимов сушки увлажненной изоляции тяговых двигателей локомотивов на примере использования депо-вских электрокалориферных установок, позволяющих осуществлять сушку изоляции без выкатки колесных пар [3].

Одним из наиболее простых в реализации является режим с постоянным энергоподводом, который характерен непрерывной работой нагревательных элементов и вентилятора электрокалорифера в течение всего процесса сушки изоляции. График работы электронагревателя калорифера при постоянном режиме приведен на рис. 1.

При моделировании системы постоянного энергоподвода можно воспользоваться известным уравнением, которое будет описывать кривую нагрева [4]:

$$\tau_{\text{пост}} = \tau_{\text{пред}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}} \right) + \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{пред}}$ — предельная температура нагрева, зависящая от класса изоляции, °С;
 t — время сушки, мин;

$T_{\text{н}}$ — постоянная времени нагрева изоляции, мин;

$\tau_{\text{нач}}$ — начальная температура (зависит от окружающей среды и предыдущих режимов работы двигателя), °С.

Данный режим является наиболее простым с точки зрения реализации и управления, а также контроля и на сегодняшний день является штатным методом, применяемым в депо.

Главными недостатками данного режима можно отметить:

- высокую скорость нагрева изоляции, что может привести к растрескиванию,
- отсутствие пауз, необходимых для перераспределения температуры во внутренних слоях изоляции и протекания эффективного удаления влаги из них;
- существенные затраты электроэнергии.

Более эффективным методом сушки изоляции, если провести сравнение с предыдущим, является прерывистый режим энергоподвода, а именно тем, что отличается возможностью чередовать периодами включения и отключения нагревательных элементов, при этом допускается работа вентилятора как в постоянном, так и непрерывном режиме. Этот режим предоставляет возможность управления мощностью нагревателя, что снижает потребление электроэнергии и гарантирует качественную сушку изоляции, так как в периоды паузы во внутренних слоях изоляции происходит перераспределение и выравнивание температуры, что способствует ускорению процесса удаления влаги в последующих циклах нагрева.

График работы электронагревателя калорифера при прерывистом режиме изображен на рис. 2.

Для построения кривой нагрева при прерывистом режиме важно учитывать, что при нагреве (период работы электронагревателя калорифера) кривая строится по выражению (1), а при охлаждении (период паузы) — по выражению [5]:

$$\tau_{\text{охл}} = \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}. \quad (2)$$

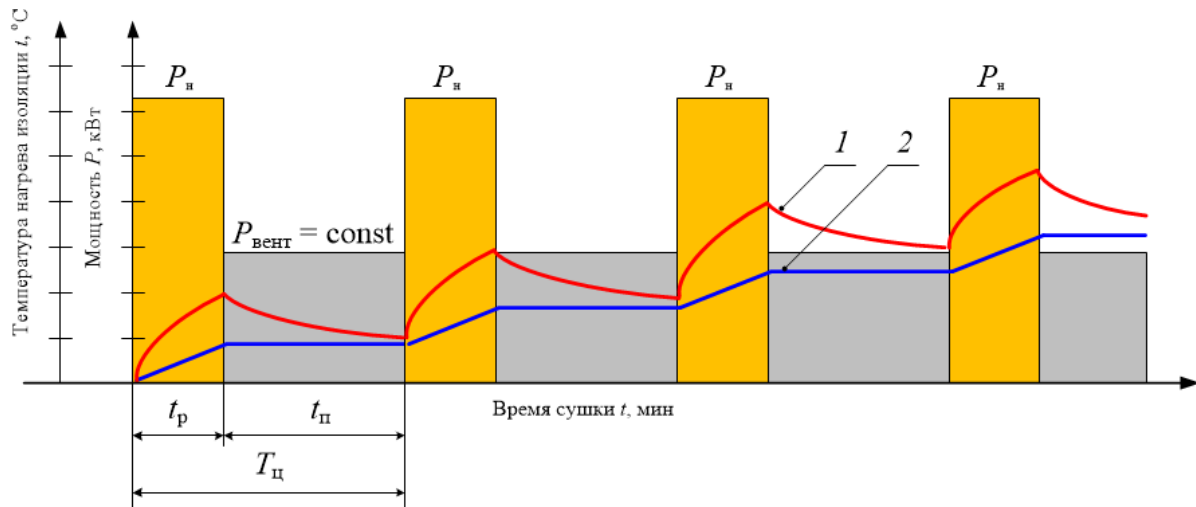


Рис. 2. График работы электронагревателя калорифера при прерывистом режиме: 1 — кривая нагрева изоляции; 2 — кривая энергопотребления; t_p — период работы электронагревателя калорифера; $t_п$ — период паузы; $T_ц$ — период цикла

Чередование конкретных периодов работы и паузы может осуществляться за счет отключения нагревательных элементов с помощью автоматизированной системы управления работой электрокалориферной установки, которая может быть собрана на различной элементной базе.

В течение промежутка времени t_p нагревательные элементы получают питание, что сопровождается обдувом изоляции горячим воздухом. В течение промежутка времени $t_п$ питание с нагревателей снимается. При этом, если вентилятор продолжает работать, изоляция обдувается холодным или теплым воздухом, а если вентилятор также обесточивается, то изоляция охлаждается от естественной конвекции.

Среднее значение мощности электронагревателя зависит от соотношения величин t_p и $T_ц$. Изменяя значения t_p и $T_ц$, можно регулировать процесс протекания сушки увлажненной изоляции [6].

На рис. 2 представлен вариант прерывистого энергоподвода с постоянными значениями времени периода работы и паузы, цикла в целом.

В зависимости от длительности периодов работы и паузы можно выделить следующие разновидности прерывистого режима:

- широтный,
- частотный,
- амплитудный,
- комбинированный.

Далее в статье будет подробно рассмотрен каждый из всех перечисленных прерывистых режимов энергоподвода.

Широтный режим энергоподвода основан на поддержании постоянного периода цикла $T_ц$, в течение которого электронагреватель включается и отключается,

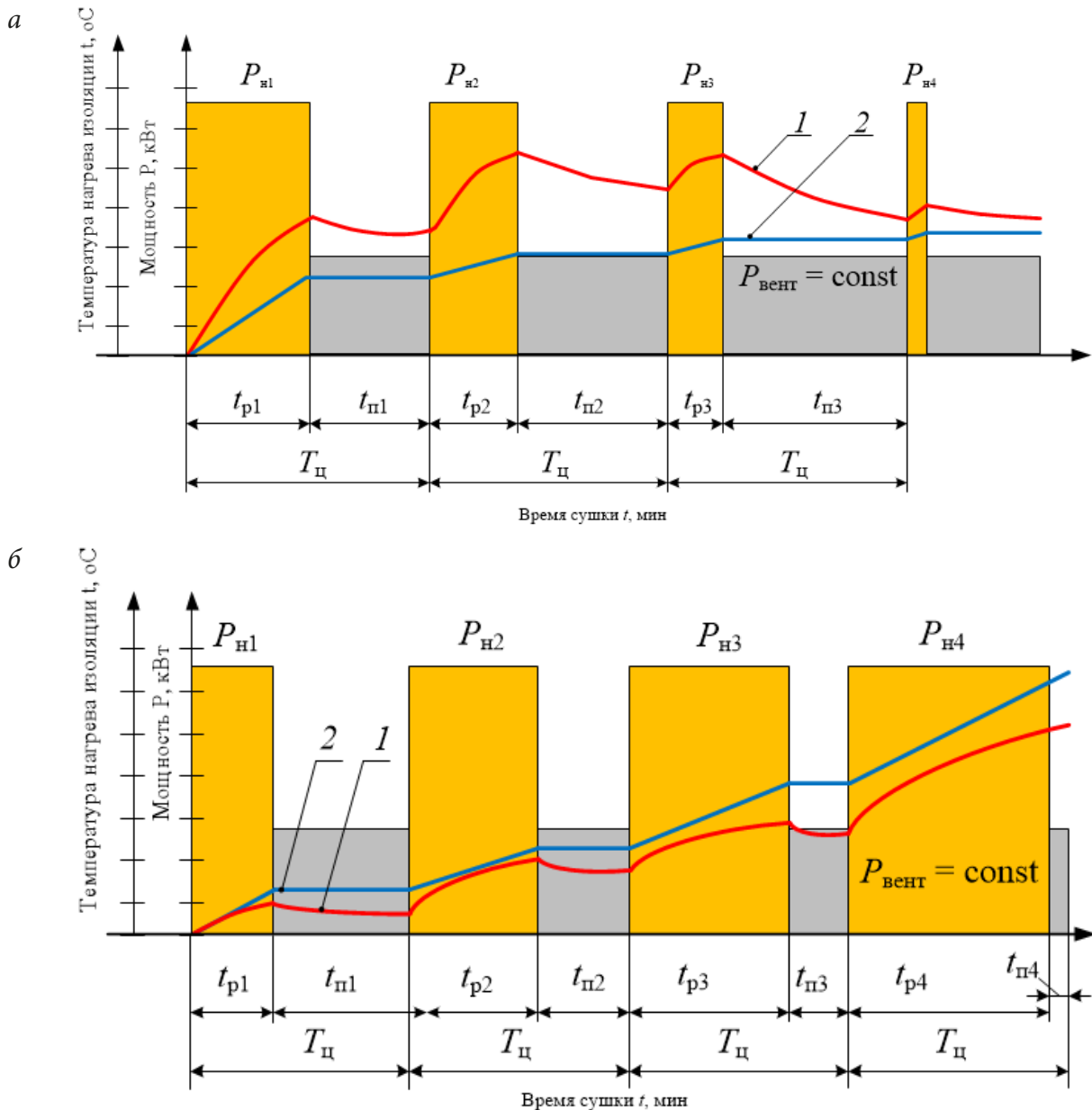


Рис. 3. Широтный режим управления энергоподводом:
 а — с уменьшением средней мощности потребления;
 б — с увеличением средней мощности потребления

а изменяются лишь период времени работы t_p и паузы $t_{п}$. При этом может происходить увеличение длительности периода работы с уменьшением длительности паузы, что приводит к постепенному увеличению значения средней мощности электронагревателя, либо уменьшение длительности периода работы с увеличением длительности паузы, что приводит к постепенному снижению значения средней мощности электронагревателя (рис. 3).

Далее рассмотрим частотный режим энергоподвода, при котором период цикла $T_{ц}$ постоянно изменяется, увеличиваясь либо уменьшаясь. Происходит это за счет изменения времени работы электронагревателя t_p или времени паузы $t_{п}$

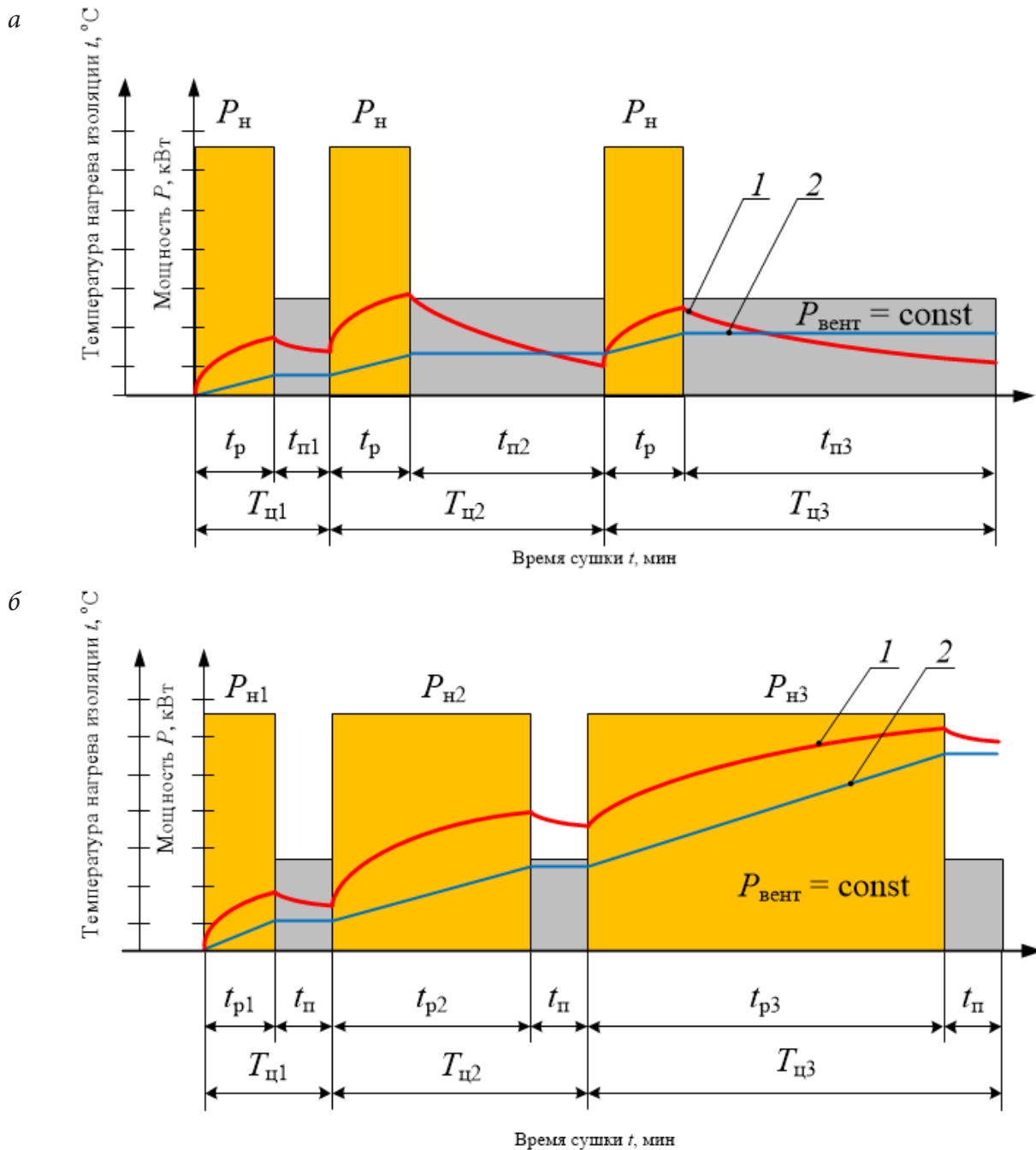


Рис. 4. Частотный принцип управления энергоподводом:
a — с увеличением периода паузы $t_{п}$, *б* — с увеличением периода паузы $t_{п}$

(рис. 4). При этом отличия могут заключаться в постоянстве одного из параметров: времени работы электронагревателя или времени паузы.

При амплитудном режиме энергоподвода регулируются значения уровня (амплитуды) мощности, подводимой к электронагревателям или вентилятору. Данный режим позволяет осуществлять сушку изоляции при более тонких настройках, к примеру с изменением температуры нагрева изоляции при сушке. При этом с точки зрения элементной базы для регулирования мощности возможно применять различные управляемые преобразователи.

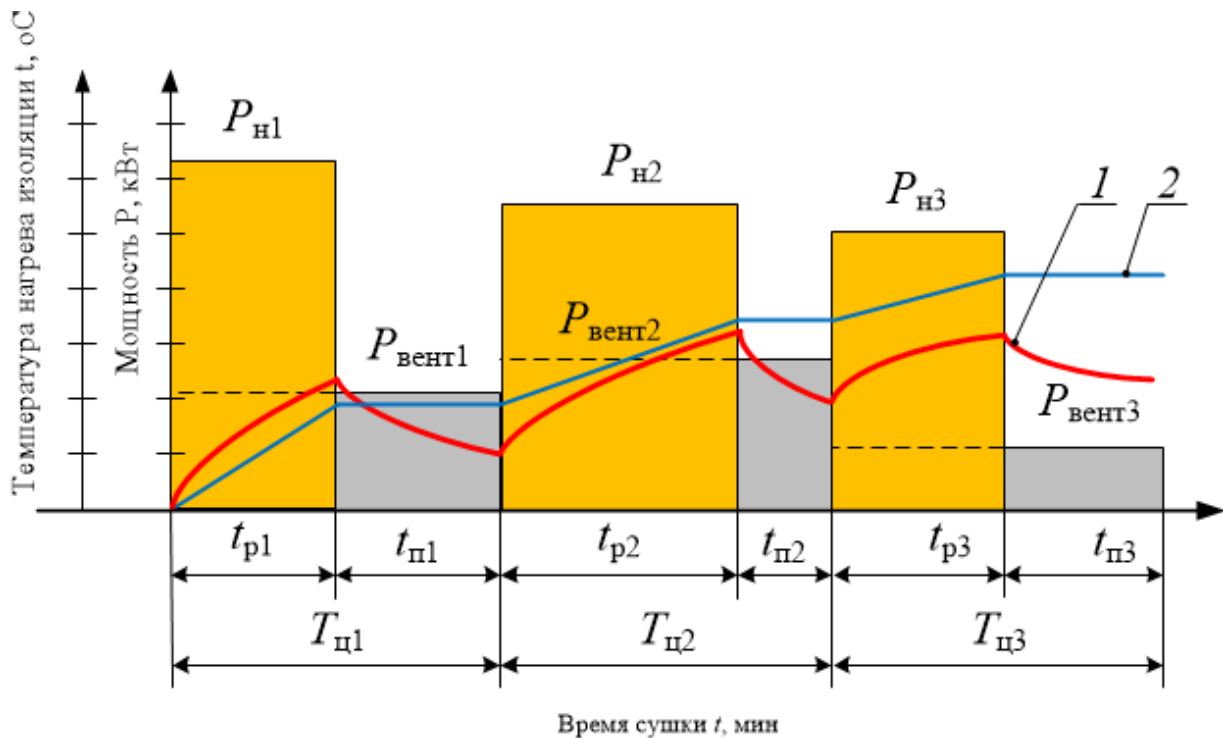


Рис. 5. Трехциклового способ сушки увлажненной изоляции

С позиции ресурсосбережения наилучшие результаты можно достигнуть, применяя комбинированные режимы энергоподвода, заключающиеся, к примеру, в совмещении широтного и амплитудного режимов.

Примером комбинированного режима энергоподвода является трехциклового амплитудно-широтного-прерывного способ сушки изоляции электрических машин [7]. Недостаток данного способа заключается в том, что при переключении на другой уровень энергоподвода и выборе цикла сушки изоляции не учитывается фактическое значение степени увлажнения изоляции.

В соответствии с результатами проведенных ранее научных исследований предлагается новый трехциклового способ сушки увлажненной изоляции [8]. График работы электронагревателей калорифера при трехциклового способе сушки увлажненной изоляции приведен на рис. 5.

В каждом из циклов кривая нагрева изоляции меняет свою кривизну в зависимости от значения мощности, подводимой к нагревателям, что представлено схематично на рис. 6.

Особенностью данного режима является интенсивное удаление влаги при начальных циклах сушки, особенно с поверхности изоляции за счет максимально допустимого нагрева, обусловленного предельно допустимой температурой для используемого класса изоляции [9]. Дальнейшее использование чередования периодов нагрева и паузы с достаточным обдувом обеспечивает эффективный термо- влагоперенос от внутренних слоев изоляции к поверхностным, что обеспечивает более быструю сушку. А наличие обратной связи температуры нагрева

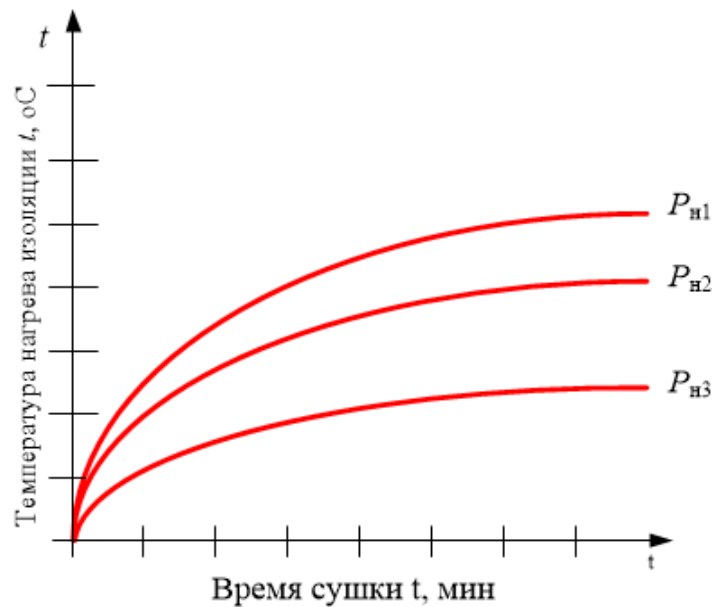


Рис. 6. Кривые нагрева изоляции в процессе сушки при изменении мощности, подводимой к нагревателям

по фактической влажности еще больше ускоряет процесс сушки и минимизирует расход электроэнергии, что в конечном итоге оказывает улучшение показателей надежности изоляции тягового двигателя локомотива.

На основании проведенного анализа существующих режимов сушки была составлена классификация, представленная на рис. 7. Классифицировать режимы сушки можно на три вида: широтный, частотный и амплитудный.

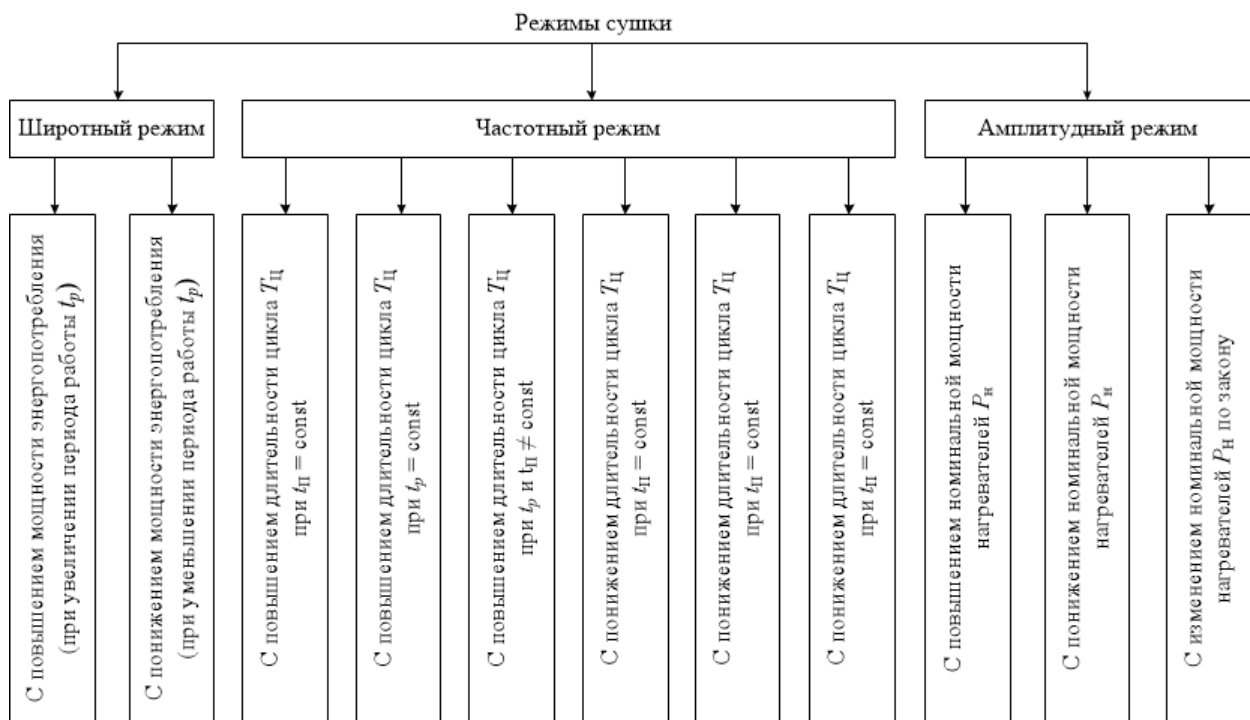


Рис. 7. Классификация режимов сушки

Протекание технологического процесса сушки, как указывалось выше, в полной мере зависит от выбора режима энергоподвода. Таким образом, в дальнейших работах планируется математически обосновать выбор того или иного режима, с привязкой не только к температуре и времени сушки, а также с привязкой к начальному состоянию увлажнения изоляции.

Список источников

1. Маслов В. В. Влагостойкость электрической изоляции / В. В. Маслов. — М.: Энергия, 1973, — 208 с.
2. Хажеева М. Ю. Исследование существующих методов сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей локомотива / М. Ю. Хажеева, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2024. — № 2. — С. 508–516.
3. Дульский Е. Ю. Эффективная система управления электрокалориферной установкой для сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей / Е. Ю. Дульский, А. И. Романовский, И. А. Ролле и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — Иркутск, 2019. — № 4(64). — С. 80–87.
4. Соболев В. М. Режимы сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей / В. М. Соболев, В. М. Левитский // Электрическая и тепловозная тяга. — 1975. — № 1. — С. 13–24.
5. Нестеренко А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха / А. В. Нестеренко. — М.: Высшая школа, 1971. — 460 с.
6. Хажеева М. Ю. Разработка автоматизированной системы ресурсосберегающего управления электрокалориферной установкой для сушки изоляции тяговых электрических машин / М. Ю. Хажеева, А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский // Известия Транссиба. ОМГУПС. — Омск, 2021. — № 3(47). — С. 61–68.
7. Патент № 2494517 Российская Федерация, МПК H02K 15/12. Трехцикловой амплитудно-широотно-прерывистый способ сушки изоляции электрических машин / В. В. Сидоров, Е. М. Лыткина, Д. В. Коноваленко и др. — Заявл. 09.12.2011; опубл. 27.09.2013. — Бюл. № 27.
8. Патент № 2815728 Российская Федерация, МПК H02K 15/12. Трехцикловой способ сушки увлажненной изоляции электрических машин / А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов и др. — Заявл. 14.12.2022; опубл. 21.03.2024. — Бюл. № 9.
9. Коноваленко Д. В. Рациональные режимы сушки увлажненной изоляции обмоток тяговых электрических машин: специальность 05.22.07 «Рациональные режимы сушки увлажненной изоляции обмоток тяговых электрических машин»: дисс. ... канд. техн. наук / Д. В. Коноваленко; Иркутский гос. ун-т путей сообщения. — Иркутск, 2007. — 193 с.

Дата поступления: 24.10.2024

Решение о публикации: 12.12.2024

Контактная информация:

ХАЖЕЕВА Марина Юрьевна — аспирант; m.hkazheeva@mail.ru

ДУЛЬСКИЙ Евгений Юрьевич — д-р техн. наук, доц.; e.dulskiy@mail.ru

ИВАНОВ Владимир Николаевич — канд. техн. наук; v.n.ivanov40161@yandex.ru

КРУЧЕК Виктор Александрович — д-р техн. наук, проф.; victor.kruchek@yandex.ru

Investigating Drying Modes of the Traction Motor Moistened Insulation on Locomotives from the Perspective of Energy Efficiency

M. Yu. Khazheeva¹, E. Yu. Dulskiy¹, V. N. Ivanov¹, V. A. Kruchek²

¹Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo Str., Irkutsk, 190029, Russian Federation

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Khazheeva M. Yu., Dulskiy E. Yu., Ivanov V. N., Kruchek V. A. Investigating Drying Modes of the Traction Motor Moistened Insulation on Locomotives from the Perspective of Energy Efficiency. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 1, pp. 7–17. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-7-17

Summary

Purpose: This paper dwells upon the current problems of improving locomotive traction engine reliability in mountainous terrain and extreme weather conditions. Extremely negative temperatures have a great impact on the insulation of the power equipment during the operation of the rolling stock. The technological process of drying includes changing the cycle duration and operation periods of heating elements over time in each subsequent cycle. **Methods:** Comparing the power supply modes in the process of drying the traction motor moistened insulation by selecting a special unit control. Using the available equations to construct a heating and cooling curve during the drying process. **Results:** On comparing the power supply modes, a combined method for regulating drying of moistened insulation is proposed. The results obtained make it possible to produce high-quality drying of moistened insulation based on the actual degree of the material moisture content. The graphs of heating unit and fan power dependence on drying time have been built for each power supply mode under consideration. They show how the indicators of heating curves of insulation and energy consumption change. **Practical significance:** The results obtained demonstrate the necessity of using a three-cycle method of drying the moistened insulation based on the actual moisture content of the equipment insulation. This method of energy supply can solve an urgent problem of improving the quality of the dried equipment, reducing energy costs and increasing the equipment durability.

Keywords: Insulation drying, electric calorifire method, insulation drying modes, variable power supply, degree of moisture, traction motor reliability.

References

1. Maslov V. V. *Vlagostoykost' elektricheskoy izolyatsii* [Moisture resistance of electrical insulation]. Moscow: Energiya Publ., 1973, 208 p. (In Russian)
2. Khazheeva M. Yu., Dulsky E. Yu., Ivanov P. Yu. et al. Issledovanie sushchestvuyushchih metodov sushki uvlazhnennoj izolyacii tyagovyh elektrodvigatelej lokomotiva [Investigation of existing methods of drying humidified insulation of traction electric motors of a locomotive]. *Izvestiya*

Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Engineering]. 2024, Iss. 2, pp. 508–516. (In Russian)

3. Dul'skiy E. Yu., Romanovskiy A. I., Rolle I. A. et al. Effektivnaya sistema upravleniya elektrokalfornoy ustanovkoj dlya sushki uvlazhnennoj izolyacii tyagovykh elektrodvigatelej [An effective control system for an electric heating system for drying humidified insulation of traction motors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2019, Iss. 4(64), pp. 80–87. (In Russian)

4. Sobolev V. M., Levitskiy V. M. Rezhimy sushki uvlazhnennoj izolyacii tyagovykh elektrodvigatelej [Drying modes of wetted insulation of traction electric motors]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga* [Electric and diesel locomotive traction]. 1975, Iss. 1, pp. 13–24. (In Russian)

5. Nesterenko A. V. *Osnovy termodinamicheskikh raschetov ventilyacii i kondicionirovaniya vozduha* [Fundamentals of thermodynamic calculations of ventilation and air conditioning]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1971, 460 p. (In Russian)

6. Khazheeva M. Yu., Khudonogov A. M., Dul'skiy E. Yu. et al. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy resursosberegayushchego upravleniya elektrokalfornoy ustanovkoj dlya sushki izolyacii tyagovykh elektricheskikh mashin [Development of an automated system for resource-saving control of an electric heater unit for drying the insulation of traction electric machines]. *Izvestiya Transsiba. OMGUPS* [Transsib News. Omsk State University of Railways]. Omsk, 2021, Iss. 3(47), pp. 61–68. (In Russian)

7. Sidorov V. V., Lytkina E. M., Konovalenko D. V. et al. *Trekhsiklovoy amplitudno-shirotno-preryvistyy sposob sushki izolyatsii elektricheskikh mashin* [Three-cycle amplitude-width-intermittent method of drying insulation of electric machines]. Patent RF, no. 2494517, 2013. (In Russian)

8. Khudonogov A. M., Dul'skiy E. Y., Ivanov P. Y. et al. *Trekhsiklovoy sposob sushki uvlazhnennoj izolyatsii elektricheskikh mashin* [Three-cycle drying method for humidified insulation of electric machines]. Patent RF, no. 2815728. (In Russian)

9. Konovalenko D. V. *Ratsional'nye rezhimy sushki uvlazhnennoj izolyatsii obmotok tyagovykh elektricheskikh mashin: spetsial'nost' 05.22.07 "Ratsional'nye rezhimy sushki uvlazhnennoj izolyatsii obmotok tyagovykh elektricheskikh mashin": diss. ... kand. tekhn. nauk* [Rational modes of drying wet insulation of windings of traction electric machines: specialty 05.22.07 "Rational modes of drying wet insulation of windings of traction electric machines": diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. Irkutsk, 2007, 193 p. (In Russian).

Received: October 24, 2024

Accepted: December 12, 2024

Author's information:

Marina Yu. KHAZHEEVA — Postgraduate Student; m.hkazheeva@mail.ru

Evgeniy Yu. DULSKIY — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; e.dulskiy@mail.ru

Vladimir N. IVANOV — PhD in Engineering, Associate Professor; v.n.ivanov40161@yandex.ru

Victor A. KRUCHEK — Dr. Sci. in Engineering, Professor; victor.kruchek@yandex.ru

УДК 629.4.045

Проектирование и расчет элементов крепления съемных многооборотных средств для перевозки грузов в универсальных вагонах-платформах

Л. В. Цыганская^{1,2}, Н. А. Таничева^{1,2}, Д. Г. Бейн²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Акционерное общество «Научно-внедренческий центр «Вагоны», Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 22М

Для цитирования: Цыганская Л. В., Таничева Н. А., Бейн Д. Г. Проектирование и расчет элементов крепления съемных многооборотных средств для перевозки грузов в универсальных вагонах-платформах // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 18–30. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-18-30

Аннотация

Цель: Рассмотреть особенности проектирования и расчета узлов крепления съемного оборудования для перевозки грузов на универсальных вагонах-платформах. **Методы:** Обзор существующих средств крепления и размещения грузов; анализ нормативной документации; составление рекомендаций на основе проведенных исследований. **Результаты:** Установлены основные направления проектирования узлов крепления съемного оборудования, предложены направления для уточнения методов расчета, рекомендовано рассмотреть возможность разработки универсального узла крепления. **Практическая значимость:** Проведенные исследования позволяют уточнить методы расчета съемного многооборотного оборудования.

Ключевые слова: Съемное оборудование, многооборотное оборудование, крепление груза, вагон-платформа, разъемные соединения, расчет болтового соединения.

Введение

Расширение номенклатуры перевозимых грузов является одним из важных направлений отрасли железнодорожных перевозок, позволяющих повысить пропускную способность железных дорог. Два основных пути реализации данного направления — модернизация подвижного состава или применение съемных многооборотных средств для перевозки грузов (МС). Первый путь является дорогостоящим и достаточно длительным процессом, сопровождающимся предпроектными исследованиями, расчетами, испытаниями новой модели вагона.

Второй путь с применением МС, устанавливаемым на вагон, требует значительно меньший объем разрабатываемой документации и проводимых испытаний. Учитывая данные преимущества, использование такого оборудования в ряде случаев имеет очевидные преимущества перед модернизацией подвижного состава.

Анализ тенденций в данной отрасли за прошедшее десятилетие показал основные направления применения МС: перевозка колесных пар [1], металлопроката и труб [2], лесо- и пиломатериалов [3, 4]. Также известны варианты перевозки контейнеров [5] и автомобилей [6] с применением МС.

Одним из наиболее востребованных типов подвижного состава, эксплуатируемых с использованием МС в настоящее время, является универсальный вагон-платформа.

Требования к эксплуатации МС, в том числе на универсальных вагонах-платформах, установлены «Техническими условиями размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах» [7] (при эксплуатации по территории Российской Федерации) и «Техническими условиями размещения и крепления грузов (приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС))» [8] (в международном сообщении). В соответствии с указанными документами, при проектировании МС необходимо разработать технические решения, обеспечивающие возможность производства погрузочно-разгрузочных работ МС, надежное закрепление груза, а также его сохранность в процессе перевозки и при выполнении погрузочно-разгрузочных операций.

Отдельного внимания требует проработка узлов крепления МС к предусмотренным для этого элементам конструкции вагона. Крепление должно быть надежным, но при этом вмешательство в конструкцию самого вагона (сверление отверстий, приварка дополнительных элементов или демонтаж существующих и т. п.) не допускается.

Также в соответствии с требованиями [7, 8] проводится ряд расчетов, в частности расчет нагрузок, действующих на МС и на ответные элементы конструкции вагона. Если предусматриваются несимметричные схемы погрузки груза, то дополнительно проверяется соблюдение допускаемых величин продольного и поперечного смещения масс МС с грузом на раме вагона и отсутствие превышения максимальной допускаемой осевой нагрузки ходовых частей вагона.

МС проверяются на действующие в процессе эксплуатации нагрузки, но при этом нагрузки принимаются в соответствии с [7, 8], а методы нагружения МС на вагоне — в соответствии с [9, 10].

Помимо указанных выше требований, при проектировании МС и его элементов необходимо соблюдать и патентно-правовые отношения.

Далее более подробно рассмотрим опыт разработки МС для перевозки грузов на универсальных вагонах-платформах с учетом перечисленных требований.

1. Требования к расчету съемных многооборотных средств размещения и крепления грузов

В отличие от принятой и отработанной практики проведения прочностных расчетов в области вагоностроения, МС зачастую требуют индивидуального

подхода для каждого нового МС под необходимые типы грузов и схемы их погрузки с учетом ограничений и требований, установленных [7] и [8].

В расчетной части можно выделить три основных направления проверки МС:

- определение прочности МС от действия продольных, поперечных и вертикальных инерционных сил;
- определение нагрузок на элементы конструкции вагона от МС с грузом и сравнение с минимально допускаемыми;
- проверка соблюдения требований о максимально допускаемом продольном и поперечном смещении груза, а также соблюдения максимально допускаемой расчетной осевой нагрузки на каждую из тележек вагона (при условии наличия несимметричных схем погрузки, с учетом требований [11]).

Силы, действующие на МС с грузом, определяются по формулам, установленным в [7, 8]. При расчете нагрузок на элементы конструкции вагона-платформы от воздействия МС с грузом также определяются силы трения, возникающие между прилегающими поверхностями МС и рамы вагона в продольном $F_{\text{тр}}^{\text{пр}}$ и поперечном $F_{\text{тр}}^{\text{п}}$ направлениях. Далее продольное $\Delta F_{\text{пр}}$ и поперечное $\Delta F_{\text{п}}$ усилия, которые воспринимают средства крепления (детали вагона), определяются по формулам (1) и (2):

$$\Delta F_{\text{пр}} = F_{\text{пр}} - F_{\text{тр}}^{\text{пр}}. \quad (1)$$

$$\Delta F_{\text{п}} = n(F_{\text{п}} + W_{\text{п}}) - F_{\text{тр}}^{\text{п}}. \quad (2)$$

где n — коэффициент, значение которого принимается равным 1,0 при разработке местных технических условий и 1,25 при разработке непредусмотренных технических условий.

В случае универсального вагона-платформы МС традиционно крепится к стоечным скобам боковых балок. Например, максимальное количество стоечных скоб на боковой балке универсальных вагонов-платформ моделей 13-401, 13-4012 составляет 16 штук, на каждую из которых или на часть из них может приходиться соответствующая часть нагрузки от МС с грузом в зависимости от выбранного способа крепления.

Разработка узлов крепления МС к универсальным вагонам-платформам, где в качестве ответных частей используют стоечные скобы, представляет собой задачу, имеющую определенную техническую сложность, так как несущая способность элементов крепления груза, установленных на вагоне, ограничена [7] и [8]. В случае, если боковых стоечных скоб не хватает для обеспечения необходимой грузоподъемности МС, возможно задействовать четыре стоечные скобы концевых балок рамы. В таком случае в продольном направлении нагрузку $\Delta F_{\text{пр}}$ максимально смогут воспринимать 18 стоечных скоб, а в поперечном направлении $\Delta F_{\text{п}}$ — 12 стоечных скоб.

2. Обзор существующих средств крепления

При проектировании конструкции МС трудоемкой задачей становится разработка непосредственно узла его крепления к раме вагона. Ввиду того, что количество и разнообразие конструкций МС растет, увеличивается и количество регистрируемых патентов на полезные модели для оборудования в целом и для отдельных его узлов.

Проведенный патентный поиск глубиной 20 лет на территории Российской Федерации показал порядка 15 патентов по данной теме. Например, в таблице приведены сведения о запатентованных проектах МС и способах их крепления разработки АО «НВЦ «Вагоны». На рис. 1 приведены общие виды данных конструкций МС.

Разработки МС, запатентованные АО «НВЦ «Вагоны»

Наименование параметра	МС для перевозки колесных пар [12]	МС для перевозки труб [13]	МС для перевозки лесоматериалов [14]	МС для перевозки контейнеров [15]
Масса тары МС, т	6,625	1,380	4,000	1,980
Грузоподъемность МС, т	50,58	69,0	60,0	64,0
Ширина максимальная, мм	3215	2876	3232	3130
Высота МС от уровня пола максимальная, мм	1907	1062	3304	158
Длина МС общая, мм	13 800	13 729	13 680	12 226

Обзор существующих средств крепления выявил следующие основные конструктивные решения:

- крепление путем установки плит сверху и снизу относительно стоечной скобы и затяжки болтовыми соединениями [12, 13, 16] (вариант 1);
- крепление за счет прижатия болтовыми соединениями к боковым поверхностям стоечной скобы [15, 17–21] (вариант 2);
- крепление через увязывающие хомуты с прижатием к нижней части стоечной скобы [22] (вариант 3).

Отдельно следует выделить крепление оборудования к торцевым стоечным скобам [14]. Оно необходимо, когда имеющихся боковых скоб недостаточно для обеспечения перевозки необходимой массы груза.

Примеры вышеуказанных конструктивных решений приведены на рис. 2.

Конструктивное исполнение крепления путем установки плит сверху и снизу относительно стоечной скобы и затяжки болтовыми соединениями появилось



Рис. 1. Съемные многооборотные средства размещения и крепления грузов на универсальных вагонах-платформах разработки АО «НВЦ «Вагоны»:
а — для перевозки колесных пар, АО «ВРК-2»; *б* — для перевозки труб, ООО «Транслокация»;
в — для перевозки лесоматериалов, ООО «ВРК»;
г — для перевозки контейнеров, АО «ПГК»

одним из первых, однако оно обладает одним существенным недостатком: ввиду того, что расстояние между стоечными скобами универсальных вагонов-платформ может отличаться относительно номинальных размеров (например, после замены стоечных скоб в процессе капитального ремонта), не всегда существует возможность точно позиционировать конкретное МС под различные вагоны-платформы даже одной модели.

Задействовать все стоечные скобы вагонов-платформ, независимо от возможного отклонения местоположения скоб, позволяет крепление МС с помощью фиксации к боковым стенкам каждой стоечной скобы болтами, расстояние между которыми регулируется. Это позволяет компенсировать отклонения расстояний между скобами вагона.

Вариант крепления через увязывающие хомуты с прижатием к нижней части стоечной скобы является наиболее простым и имеет наименьшую массу из всех рассматриваемых, однако при этом подходит не для всех типов грузов.

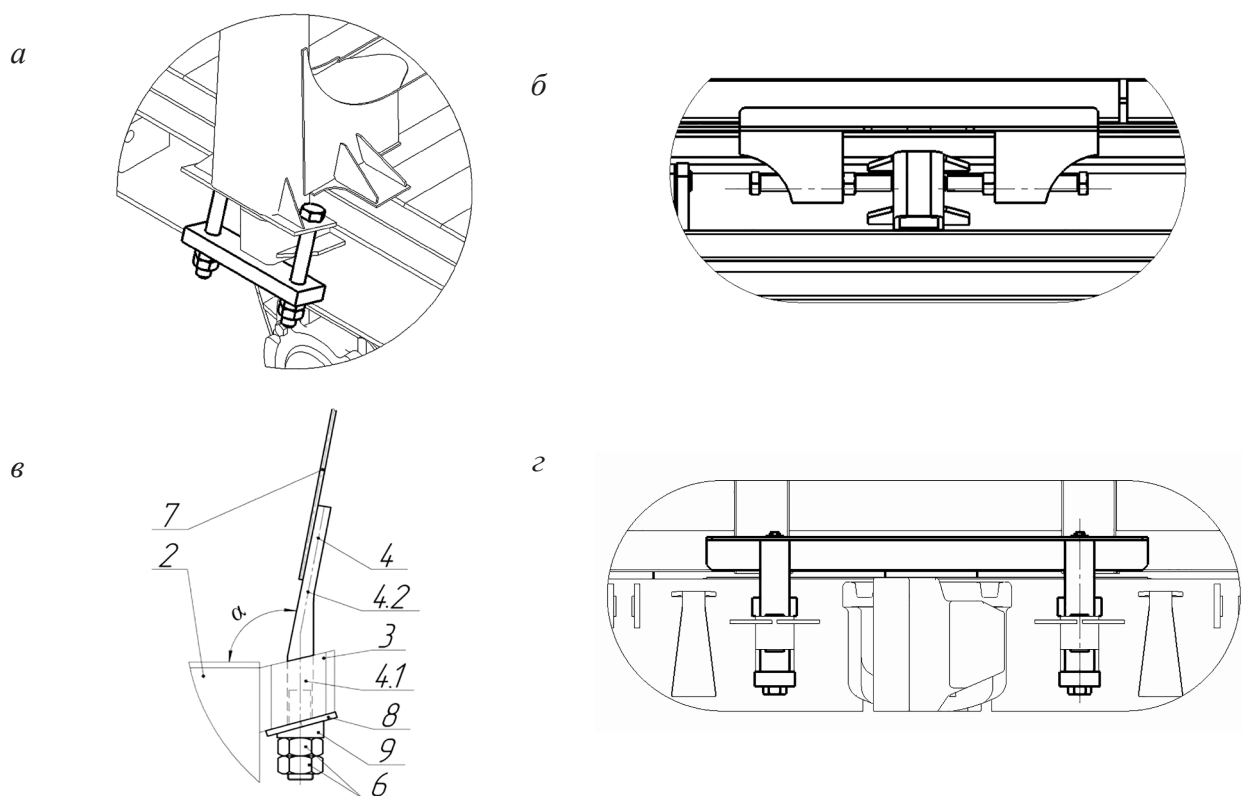


Рис. 2. Способы крепления съемных многооборотных средств размещения и крепления грузов на вагоне:

- а* — путем установки плит сверху и снизу относительно стоечной скобы и затяжка болтовыми креплениями; *б* — за счет прижатия болтовыми соединениями к боковым поверхностям стоечной скобы; *в* — через увязывающие хомуты с прижатием к нижней части стоечной скобы; *г* — торцевой упор

Вариант крепления *1* появился первым, широко распространен и используется в многочисленных местных технических условиях размещения и крепления грузов (МТУ).

С точки зрения надежности закрепления предпочтителен вариант крепления *2* (при помощи боковой фиксации к стоечным скобам). В настоящее время такой способ крепления все чаще применяется в конструкциях МС. Однако все возрастающее число патентов ставят перед разработчиками и изготовителями МС вопрос о необходимости предложения новых технических решений или доработки уже известных конструкций дополнительными элементами, что не всегда обеспечивает простоту и рациональность разработанного крепления.

Учитывая распространенность МС и повышенные риски, связанные с его безопасной эксплуатацией, рекомендуется рассмотреть возможность разработки и внедрения (например, нормативным документом, согласованным владельцем инфраструктуры и грузоотправителями) универсального узла крепления МС к стоечным скобам рамы универсального вагона-платформы.

3. Методика расчета прочности съемных многооборотных средств размещения и крепления грузов с учетом неравномерного нагружения разъемных соединений

Как следует из проведенного обзора, одним из основных способов крепления МС к стоечным скобам рамы вагона-платформы являются болтовые соединения. Общеизвестно, что подавляющее большинство случаев разрушения болтовых соединений происходит по причине их недостаточной затяжки. Ослабление болтовых соединений может привести к разрушению узлов крепления МС и стать причиной возникновения аварийных ситуаций.

Дополнительным фактором, который может привести к нештатным ситуациям, — неравномерность нагруженности болтовых соединений, что может повлиять на прочность МС.

Учитывая, что [7] и [8] не устанавливают требований к болтовым соединениям МС, при проектировании проводится оценка необходимой величины затяжки $P_{\text{зат}}$ и влияния ослабления болтовых соединений на прочность узлов крепления МС по формуле (3):

$$nP_{\text{зат}}f \geq K_3Q_i, \quad (3)$$

где K_3 — коэффициент запаса;

n — число пар поверхностей трения в соединении;

f — средний коэффициент трения между соединяемыми деталями;

Q_i — расчетное усилие на болт.

Стандартизация требований безопасности к МС на текущий момент отсутствует. Поэтому для предварительных расчетов коэффициент запаса по усилию затяжки принимается в соответствии с [9] равным 2,5.

При установке болтов без зазора максимальное усилие в наиболее нагруженном болте может быть получено на основании системы уравнений (4) для беззазорных болтовых соединений [23]:

$$Q_{\text{max}} = \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + \varphi_i^2 r_{\text{max}}^2 + 2(x_i^2 + y_i^2)\varphi_i r_i \cos \beta_\delta}}{\lambda_i}, \quad (4)$$

где x_i, y_i — расстояния от центра масс МС по продольной и поперечной оси до центра болтового соединения;

φ_i, r_i — угол поворота и расстояние от оси стыка стягиваемых деталей до болта;

β_δ — угол между суммарным вектором перемещения от сдвигаемых сил и вектором перемещения от крутящего момента;

λ_i — податливость системы болта и крепежных деталей МС.

Выполненный расчет прочности МС разъемных соединений показал, что напряжения в узлах крепления могут вырастать на 20–30% за счет учета неравномерной нагруженности.

Заключение

Преимуществами применения МС является возможность расширения номенклатуры перевозимых грузов на вагонах без проведения трудоемкой, длительной и дорогостоящей процедуры модернизации с присвоением нового номера модели.

В то же время в статье на примере опыта разработки МС для универсальных вагонов-платформ показаны основные проблемы, связанные с проектированием такого оборудования. В большей степени они связаны с недостаточной проработанностью нормативной базы.

Во-первых, требуется рассмотреть возможность разработки универсального узла крепления, обеспечивающего надежную и удобную фиксацию МС на универсальных вагонах-платформах с учетом допускаемых нагрузок на стоечные скобы, и дальнейшее утверждение конструкции при участии заинтересованных и компетентных в данном вопросе лиц (представителей грузоперевозчиков, владельца инфраструктуры и пр.).

Во-вторых, для обеспечения безопасной эксплуатации МС при их расчете необходимо оценивать неравномерность нагруженности разъемных соединений узлов крепления МС к подвижному составу. Для этого необходимо в обязательном порядке установить коэффициент запаса для болтовых соединений МС по усилию затяжки в нормативной документации.

Список источников

1. Бейн Д. Г. Съёмное многооборотное устройство для перевозки колесных пар на универсальных вагонах-платформах / Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская, Е. А. Исполова и др. // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XIV Международной научной технической конференции. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2019. — С. 79–81.

2. Бейн Д. Г. Разработка и испытания съёмных многооборотных средств крепления для перевозки труб большого диаметра на универсальных вагонах-платформах / Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская, А. И. Бондаренко и др. // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XII Международной научной технической конференции. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2017. — С. 107–109.

3. Таничева Н. А. Съемное оборудование для перевозки лесоматериалов: новые технические решения и применение высокопрочных сталей / Н. А. Таничева, И. В. Федоров, И. О. Филиппова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2020. — Т. 17. — № 1. — С. 117–128. — DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-117-128.
4. Морозова И. О. Опыт эксплуатации оборудования для перевозки лесоматериалов из высокопрочных сталей / И. О. Морозова, Д. Г. Бейн, Н. А. Таничева // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XV Международной научной технической конференции. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2021. — С. 87–88.
5. Таничева Н. А. Съемные многооборотные средства размещения и крепления грузов в универсальных вагонах-платформах / Н. А. Таничева, Н. А. Атаманчук, Д. Г. Бейн и др. // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XVIII Международной научной технической конференции. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2024.
6. Бондаренко А. И. Устройство для крепления автомобильного полуприцепа на вагоне-платформе для контрейлерных перевозок / А. И. Бондаренко, Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XIII Международной научной технической конференции. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2018. — С. 175–176.
7. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. — Утв. МПС России № ЦМ-943 от 27 мая 2003 г. — М.: Юридическая фирма «Юртранс», 2003.
8. Технические условия размещения и крепления грузов. Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС). — Утв. Комитетом Организации сотрудничества железных дорог (ОСЖД) 1 июля 2022 г.
9. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). — Утв. МПС России от 22 января 1996 г. — М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996.
10. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с Поправкой, с Изменением № 1). — Утв. приказом Росстандарта №565-ст от 05.06.2015. — М.: Стандартинформ, 2020.
11. ГОСТ 22235—2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ (с Изменением № 1, с Поправкой). — Утв. приказом Росстандарта №420-ст от 12.11.2010.
12. Патент на полезную модель № 180476 Российская Федерация, МПК В61D 3/00, В60P 7/08, В61D 45/00. Съемное многооборотное оборудование для перевозки железнодорожных колесных пар на универсальных вагонах-платформах / Ю. П. Бороненко, Д. Г. Бейн. Заявл.: 04.04.2017; опубл. 14.06.2018. — Бюл. № 17.
13. Патент на полезную модель № 180477. Российская Федерация, МПК В61D 3/08, В60P 7/12. Вагон-платформа для перевозки длинномерных цилиндрических грузов большого диаметра / Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская, И. О. Филиппова. Заявл.: 21.04.2017; опубл.: 14.06.2018. — Бюл. № 17.
14. Патент на полезную модель № 199040 Российская Федерация, МПК В61D 17/06. Съемный торцевой упор съемного многооборотного оборудования вагона-платформы / Д. Г. Бейн, Е. А. Исполова, Л. В. Цыганская и др. Заявл.: 23.08.2019; опубл.: 11.08.2020. — Бюл. № 23.

15. Патент на полезную модель № 193022 Российская Федерация, МПК В60Р 7/00, В61D 3/00. Съёмное многооборотное устройство для перевозки крупнотоннажных контейнеров на универсальных вагонах-платформах / С. Е. Гончаров, А. Н. Гришаев, А. А. Шурмаков и др. Заявл.: 06.05.2019; опубл.: 10.10.2019. — Бюл. № 28.

16. Патент на полезную модель № 180480 Российская Федерация, МПК В60Р 7/00, В61D 45/00. Съёмное многооборотное оборудование для перевозки грузов на универсальных вагонах-платформах / Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская, И. О. Филиппова. Заявл.: 05.05.2017; опубл.: 14.06.2018. — Бюл. № 17.

17. Патент на полезную модель № 180319 Российская Федерация, МПК В60Р 7/12, В61D 45/00. Съёмное многооборотное оборудование для перевозки рулонной стали на универсальных вагонах-платформах / Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская, И. О. Филиппова. Заявл.: 21.04.2017; опубл.: 08.06.2018. — Бюл. № 16.

18. Патент на полезную модель № 193023. Российская Федерация, МПК В60Р 7/00, В61D 3/00. Съёмное многооборотное устройство для перевозки колесных пар на универсальных вагонах-платформах / С. Е. Гончаров, А. Н. Гришаев, А. А. Шурмаков и др. Заявл.: 24.04.2019; опубл.: 10.10.2019. — Бюл. № 28.

19. Патент на полезную модель № 197032 Российская Федерация, МПК В60Р 7/00, В61D 45/00. Съёмное многооборотное устройство для перевозки крупнотоннажных контейнеров на универсальных вагонах-платформах / А. Н. Кемеж, А. Н. Гришаев, А. А. Шурмаков и др. Заявл.: 24.12.2019; опубл.: 26.03.2020. — Бюл. № 9.

20. Патент на полезную модель № 197034. Российская Федерация, МПК В60Р 7/00, В61D 45/00. Съёмное многооборотное устройство для перевозки крупнотоннажных контейнеров на универсальных вагонах-платформах / А. Н. Кемеж, А. Н. Гришаев, А. А. Шурмаков и др. Заявл.: 24.12.2019; опубл.: 26.03.2020. — Бюл. № 9.

21. Патент на полезную модель № 197688. Российская Федерация, МПК В60Р 7/00, В61D 45/00. Съёмное многооборотное устройство для перевозки грузов на универсальных вагонах-платформах / В. В. Иванов. Заявл.: 18.12.2019; опубл.: 21.05.2020. — Бюл. № 15.

22. Патент на полезную модель № 206485. Российская Федерация, МПК В60Р 7/08. Устройство для крепления груза на транспортном средстве / Т. В. Шаламова, М. В. Исаева, А. И. Петунина и др. Заявл.: 07.06.2021; опубл.: 14.09.2021. — Бюл. № 26.

23. Антонов И. С. Расчет резьбовых соединений при действии циклической и ударной сдвигающей нагрузки / И. С. Антонов // Известия МГТУ «МАМИ». — 2012. — № 1(13). — С. 9–16.

Дата поступления: 24.09.2024

Решение о публикации: 08.11.2024

Контактная информация:

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна — канд. техн. наук, доц., заместитель генерального директора — главный конструктор; lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

ТАНИЧЕВА Наталия Андреевна — канд. техн. наук, доц., начальник отдела ходовых частей и динамики подвижного состава; nataliya.tanicheva@nvc-vagon.ru

БЕЙН Дмитрий Григорьевич — канд. техн. наук, заместитель главного конструктора; dmitry.bein@nvc-vagon.ru

Designing and Calculating Fastening Elements of Removable Multi-Trip Devices for Transporting Cargo in Universal Flat Wagons

L. V. Tsyganskaya^{1,2}, N. A. Tanicheva^{1,2}, D. G. Bein²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Joint Stock Company "Scientific and Innovation Center "Cars", 22M, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Tsyganskaya L. V., Tanicheva N. A., Bein D. G. Designing and Calculating Fastening Elements of Removable Multi-Trip Devices for Transporting Cargo in Universal Flat Wagons. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 1, pp. 18–30. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-18-30

Summary

Purpose: To investigate the design calculation features of the removable equipment fasteners for transporting cargo on universal flat cars. **Methods:** Review of existing devices of placing and securing goods; analysis of regulatory documentation; and preparation of recommendations based on the research conducted. **Results:** The main directions of designing fastening elements have been established; the directions for accurate calculation methods have been proposed; the recommendations for considering a universal fastener development have been put forward. **Practical significance:** The research conducted makes it possible to develop more accurate calculation methods for removable multi-trip devices.

Keywords: Removable equipment, multi-trip devices, cargo fastening, flatcar, detachable joints, calculation of bolted connection.

References

1. Bein D. G., Tsyganskaya L. V., Ispolova E. A. et al. *S'emnoe mnogooborotnoe ustrojstvo dlya perevozki kolesnyh par na universal'nyh vagonah-platformah* [Removable multi-turn equipment for transporting wheelsets on multi-purpose flat cars]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2019, pp. 79–81. (In Russian)
2. Bein D. G., Tsyganskaya L. V., Bondarenko A. I. et al. *Razrabotka i ispytaniya s'emnyh mnogooborotnyh sredstv krepneniya dlya perevozki trub bol'shogo diametra na universal'nyh vagonah-platformah* [Development and testing of removable multi-turn fastening equipment for the transportation of large diameter pipes on multi-purpose flat cars]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2017, pp. 107–109. (In Russian)
3. Tanicheva N. A., Fedorov I. V., Filippova I. O. *S'emnoe oborudovanie dlya perevozki lesomaterialov: novye tekhnicheskie resheniya i primeneniye vysokoprochnykh stalej* [Removable equipment for the transportation of timber: new technical solutions and the use of high-strength steels]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University], 2020, vol. 17, Iss. 1, pp. 117–128. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-117-128. (In Russian)
4. Morozova I. O., Bein D. G., Tanicheva N. A. *Opyt ekspluatatsii oborudovaniya dlya perevozki lesomaterialov iz vysokoprochnykh stalej* [Experience in the operation of equipment for the transportation of high-strength steel timber]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, pp. 87–88. (In Russian)

5. Tanicheva N. A., Atamanchuk N. A., Bejn D. G. et al. *S'emnoe mnogooborotnye sredstva razmeshcheniya i krepleniya Грузов в универсальных вагонах-платформах* [Removable multi-turn means of cargo placement and fastening on multi-purpose flat cars]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2024. (In Russian)

6. Bondarenko A. I., Bejn D. G., Tsyganskaya L. V. *Ustrojstvo dlya krepleniya avtomobil'nogo polupricepa na vagone-platfome dlya kontrejlernyh perevozok* [A device for attaching an automobile semi-trailer on multi-purpose flat cars for piggyback transportation]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2018, pp. 175–176. (In Russian)

7. *Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya Грузов в вагонах и контейнерах. Утв. MPS России № ТсМ-943 от 27 мая 2003 г.* [Technical conditions for the placement and securing of cargo in cars and containers. Approved. MPS of Russia № CM-943 of May 27, 2003]. Moscow: Yuridicheskaya firma “Yurtrans” Publ., 2003. (In Russian)

8. *Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya Грузов. Prilozhenie 3 k Soglasheniyu o mezhdunarodnom zhelezodorozhnom Грузовом сообщении (SMGS). Утв. Комитетом Организации сотрудничества железных дорог (OSZhD) 1 июля 2022 г.* [Technical conditions for the placement and fastening of goods. Annex 3 to the Agreement on International Rail Freight Transport. Approved by the Committee of the Organization for Cooperation between Railways (OSJD) on July 1, 2022]. (In Russian)

9. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya вагонов железных дорог MPS колеи 1520 мм (несамыходных). Утв. MPS России от 22 января 1996 г.* [Standards for the calculation and design of wagons for 1520 mm gauge MPS railways (non-self-propelled). Approved. MPS of Russia of January 22, 1996]. Moscow: GosNIIV-VNIIZhT Publ., 1996. (In Russian)

10. *GOST 33211—2014. Vagony Грузовые. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam (s Popravkoy, s Izmeneniyem № 1). Утв. приказом Росстандарта №565-ст от 05.06.2015* [GOST 33211—2014. Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities (with Amendment, with Change № 1). Approved. by order of Rosstandart № 565-st dated 05.06.2015]. M.: Standartinform Publ., 2020. (In Russian)

11. *GOST 22235—2010. Vagony Грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Obshchie trebovaniya po obespecheniyu sohrannosti pri proizvodstve pogruzочно-razgruzочных i маневровых работ (s Izmeneniyem № 1, s Popravkoy). Утв. приказом Росстандарта № 420-ст от 12.11.2010* [Freight cars for 1520 mm gauge main line railways. General requirements for safety in loading-unloading and shunting operations. Approved by order of Rosstandart № 420-st dated 12.11.2010]. (In Russian)

12. Boronenko Yu. P., Bejn D. G. *S'emnoe mnogooborotnoe oborudovanie dlya perevozki zhelezodorozhnykh kolesnykh par na universal'nykh vagonakh-platfomakh* [Removable multi-turn equipment for the transportation of railway wheelsets on multi-purpose flat cars]. Patent RF, no. 180476, 2018. (In Russian)

13. Bejn D. G., Tsyganskaya L. V., Filippova I. O. *Vagon-platfoma dlya perevozki dlinnomernykh tsilindricheskikh Грузов большого диаметра* [Flatcar for transportation of long cylindrical cargo of large diameter]. Patent RF, no. 180477, 2018. (In Russian)

14. Bein D. G., Ispolova E. A., Tsyganskaya L. V. et al. *S''emnyy tortsevoy upor s''emnogo mnogooborotnogo oborudovaniya vagona-platformy* [Removable end stop of removable multi-turn equipment of a flat car]. Patent RF, no. 199040, 2020. (In Russian)

15. Goncharov S. E., Grishaev A. N., Shurmakov A. A. et al. *S''emnoe mnogooborotnoe ustroystvo dlya perevozki krupnotonnazhnykh konteynerov na universal'nykh vagonakh-platformakh* [Removable multi-turn device for transporting large-capacity containers on universal flatcars]. Patent RF, no. 193022, 2019. (In Russian)

16. Bejn D. G., Tsyganskaya L. V., Filippova I. O. *S''emnoe mnogooborotnoe oborudovanie dlya perevozki грузов на универсальных вагонах-платформах* [Removable multi-turn equipment for transporting goods on universal flatcars]. Patent RF, no. 180480, 2018. (In Russian)

17. Bejn D. G., Tsyganskaya L. V., Filippova I. O. *S''emnoe mnogooborotnoe oborudovanie dlya perevozki rulonnoy stali на универсальных вагонах-платформах* [Removable multi-turn equipment for the transportation of rolled steel on multi-purpose flat cars]. Patent RF, no. 180319, 2018. (In Russian)

18. Goncharov S. E., Grishaev A. N., Shurmakov A. A. et al. *S''emnoe mnogooborotnoe ustroystvo dlya perevozki kolesnykh par на универсальных вагонах-платформах* [Removable multi-turn device for transporting wheelsets on multi-purpose flat cars]. Patent RF, no. 193023, 2019. (In Russian)

19. Kemez A. N., Grishaev A. N., Shurmakov A. A. et al. *S''emnoe mnogooborotnoe ustroystvo dlya perevozki krupnotonnazhnykh konteynerov на универсальных вагонах-платформах* [Removable multi-turn device for transporting large-capacity containers on universal platform cars]. Patent RF, no. 197032, 2020. (In Russian)

20. Kemez A. N., Grishaev A. N., Shurmakov A. A. et al. *S''emnoe mnogooborotnoe ustroystvo dlya perevozki krupnotonnazhnykh konteynerov на универсальных вагонах-платформах* [Removable multi-turn device for transporting large-capacity containers on universal flatcars]. Patent RF, no. 197034, 2020. (In Russian)

21. Ivanov V. V. *S''emnoe mnogooborotnoe ustroystvo dlya perevozki грузов на универсальных вагонах-платформах* [Removable multi-turn device for transporting goods on universal flatcars]. Patent RF, no. 197688, 2020. (In Russian)

22. Shalamova T. V., Isaeva M. V., Petunina A. I. et al. *Ustroystvo dlya krepneniya gruzа на транспортном средстве* [Device for securing cargo on a vehicle]. Patent RF, no. 206485. (In Russian)

23. Antonov I. S. Raschyot rez'bovykh soedinenij pri dejstvii ciklicheskoj i udarnoj sdvigayushchej nagruzki [Calculation of threaded connections under the action of cyclic and shock shear loads]. *Izvestiya MGTU "MAMI"* [Bulletin of Moscow State Technical University "MAMI"]. 2012, Iss. 1(13), pp. 9–16. (In Russian)

Received: September 24, 2024

Accepted: November 08, 2024

Author's information:

Ludmila V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor, Deputy General Director — Chief Designer; lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

Natalya A. TANICHEVA — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Running Gear and Dynamics of Rolling Stock; nataliya.tanicheva@nvc-vagon.ru

Dmitriy G. BEIN — PhD in Engineering, Deputy Chief Designer; dmitry.bein@nvc-vagon.ru

УДК 629.42-192

Применение технологии неразрушающего контроля на подвижном составе и перспективы ее развития

Шэнь Цзеи, А. Е. Цаплин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шэнь Цзеи, Цаплин А. Е. Применение технологии неразрушающего контроля на подвижном составе и перспективы ее развития // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 31–44. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-31-44

Аннотация

Цель: Статья посвящена исследованию процесса интеграции инновационных технологий в системы неразрушающего контроля (НК) подвижного состава железных дорог. Рассматриваются традиционные методы НК, такие как ультразвуковой, магнитопорошковый и вихретоковый контроль, а также их возможности и ограничения в условиях современных требований к безопасности и эффективности эксплуатации. Основное внимание уделено использованию умных очков и технологий машинного зрения как вспомогательных инструментов для повышения точности диагностики, оперативности выявления дефектов и улучшения взаимодействия с экспертами. Умные очки рассматриваются как средство визуализации данных в реальном времени, что способствует ускорению процессов диагностики и снижению зависимости от квалификации оператора. Технологии машинного зрения, в свою очередь, обеспечивают автоматическую идентификацию дефектов, что значительно снижает вероятность человеческой ошибки и повышает точность контроля. **Методы:** Исследования включают анализ актуальной литературы, изучение передовых практик применения НК в железнодорожной отрасли, а также прогнозирование возможных технологических решений на основе существующих тенденций. Особое внимание уделено интеграции умных очков как инструмента для визуализации данных в реальном времени и использования машинного зрения для автоматизации процесса диагностики. Рассматриваются также возможности взаимодействия с удаленными экспертами и интеграции с облачными платформами для анализа данных. **Результаты:** Оценено, что интеграция умных очков и машинного зрения в процессы НК подвижного состава способствует повышению точности диагностики, ускорению процесса контроля и снижению человеческого фактора. Также показано, что использование этих технологий позволяет эффективно анализировать данные и получать рекомендации по ремонту в реальном времени. **Практическая значимость:** На основе проведенного анализа изложены перспективы внедрения инновационных технологий в процессы неразрушающего контроля (НК), что способствует улучшению безопасности, повышению точности диагностики и оптимизации процессов технического обслуживания подвижного состава. В условиях современной эры искусственного интеллекта применение систем машинного зрения может обеспечить более точную обработку данных для обслуживания подвижного состава, что, в свою очередь, значительно снижает затраты на трудовые ресурсы.

Ключевые слова: Неразрушающий контроль, подвижной состав, умные очки, искусственный интеллект, железнодорожный транспорт.

Введение

В процессе эксплуатации подвижного состава, подвергающегося воздействию ударов, вибраций, трения и коррозии, компоненты со временем испытывают износ, деформацию, старение и повреждения. Эти изменения могут привести к сбоям в работе транспортных средств, что, в свою очередь, создает угрозу безопасности движения. В условиях активного развития современных электронных технологий и сенсорных систем традиционные методы неразрушающего контроля (НК) продолжают совершенствоваться, а также внедряются новые методики, направленные на улучшение диагностики и технического обслуживания железнодорожных транспортных средств. Технологии НК основаны на использовании физических принципов для анализа и выявления дефектов на поверхности или внутри исследуемого объекта без его повреждения [1]. За последние годы на основе традиционных методов НК, таких как ультразвуковой, магнитопорошковый, капиллярный, радиографический и вихретоковый контроль, были разработаны новые подходы, однако их эффективное применение в реальных эксплуатационных условиях требует дальнейших исследований и оценок.

Машинное зрение, как отрасль искусственного интеллекта, использует технологические системы, заменяющие человеческий глаз для измерений и оценки. Эти системы преобразуют захваченные изображения в цифровые сигналы, которые передаются в специализированные системы обработки изображений, например: система динамического обнаружения неисправностей электропоезда TEDS-3D — Trouble of moving EMU Detection System, используемая в Китае [2]. Далее данные анализируются с учетом таких характеристик, как яркость, цвет и распределение пикселей. Эти цифровые сигналы подвергаются дополнительной обработке, что позволяет получить результаты классификации. Интеллектуальные роботы с машинным зрением, сочетающие технологии машинного зрения и искусственного интеллекта, могут значительно повысить степень автоматизации процессов на производстве, особенно при крупных и повторяющихся проверках. Внедрение роботизированных систем с машинным зрением в процесс НК способствует не только повышению эффективности и безопасности производства, но и улучшению точности обнаружения дефектов, что крайне важно для обеспечения качества продукции. Умные очки, такие как Google Glass и Microsoft HoloLens, могут быть использованы для передачи данных, полученных с помощью традиционных методов НК, например для ультразвуковых дефектоскопов или термографических камер [3]. Использование умных очков в НК открывает новые перспективы в проведении диагностики, предоставляя оператору возможность получать данные в реальном времени, визуализировать их непосредственно на объекте и взаимодействовать с удаленными экспертами. Эти устройства позволяют операторам передавать изображения, снятые в процессе контроля, на экран в реальном

времени, что способствует улучшению взаимодействия с экспертами и оптимизации процесса обучения персонала.

Технология неразрушающего контроля и применение железнодорожного подвижного состава

В отличие от разрушающего контроля, методы НК могут быть применены на всех этапах жизненного цикла изделий — как при производстве и ремонте, так и в процессе эксплуатации [4].

Далее рассмотрим часто используемые методы неразрушающего контроля подвижного состава применительно к тележке.

Тележка является одним из ключевых узлов подвижного состава. Она состоит в основном из буксового устройства, рессорной подвески, рамы (бортовой рамы), основного тормозного устройства и устройства поддержки кузова вагона (рис. 1). Состояние тележки непосредственно влияет на безопасность эксплуатации поезда.

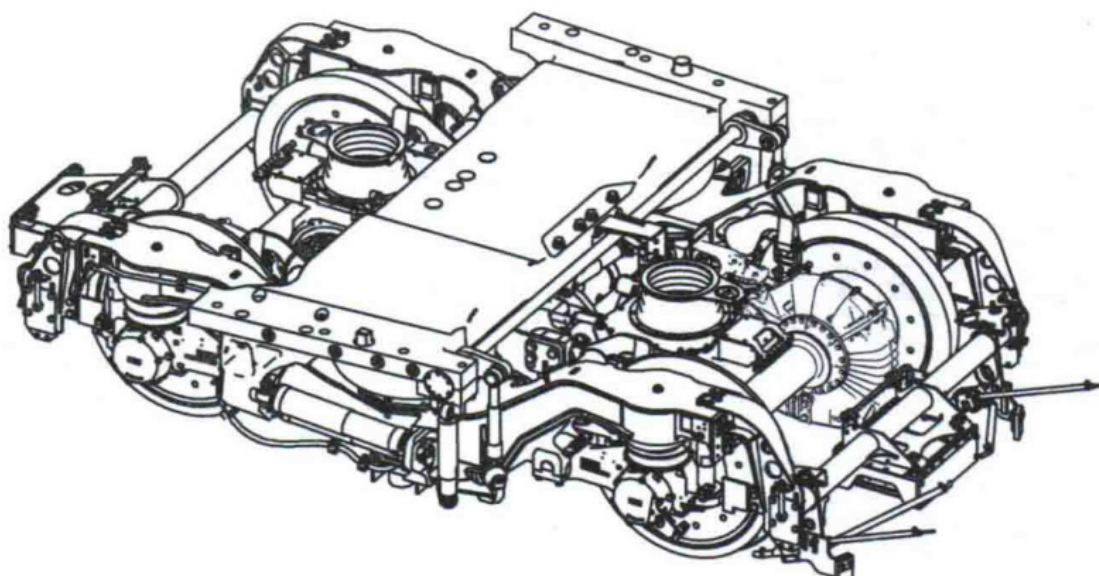


Рис. 1. Тележка CRH380BL

Колесная пара — элемент ходовой части рельсовых транспортных средств, представляющий собой пару колес, жестко установленных на ось и вращающихся вместе с ней как единое целое. Колесная пара принимает на себя весь вес подвижного состава, движется по пути с высокой скоростью и воспринимает различные статические и динамические нагрузки от кузова вагона и рельсов. Поэтому для обеспечения ее надежности и безопасности эксплуатации необходимо проводить неразрушающий контроль колесных пар. В этой статье в качестве примера мы рассмотрим дефекты осей и дефекты колес.

Магнитопорошковый контроль

Магнитопорошковый контроль (МПК) — это метод неразрушающего контроля, основанный на использовании магнитного поля и магнитного порошка для выявления дефектов на поверхности или вблизи поверхности материалов, в первую очередь металлических.

На железнодорожном транспорте магнитопорошковому контролю подвергаются следующие компоненты подвижного состава: детали ударно-тягового и тормозного оборудования; рамы тележек различных моделей, как в сборе, так и по отдельным элементам; шкворни; оси всех типов колесных пар, как в сборе, так и в отдельном состоянии; свободные кольца буксовых подшипников, а также внутренние кольца, напрессованные на шейки оси; упорные кольца, стопорные планки, пружины, болты и другие элементы [5].

Преимущества МПК: простота и низкая стоимость; способность выявлять дефекты на поверхности и вблизи поверхности; высокая чувствительность к мелким дефектам (например, трещинам или пористости); применимость к большинству ферромагнитных материалов (сталь, чугун и др.).

Ограничения: МПК не может выявлять дефекты, расположенные глубже чем на несколько миллиметров от поверхности; не подходит для немагнитных материалов (например, алюминий, медь); сложно автоматизировать.

Ультразвуковой контроль

Ультразвуковой контроль (УЗК) в железнодорожной отрасли является методом неразрушающего контроля, который применяется для диагностики состояния таких компонентов, как колесные пары, оси, рельсы и другие металлические элементы подвижного состава, а также инфраструктуры. Этот метод позволяет выявлять дефекты, не видимые на поверхности, такие как внутренние трещины, поры или коррозию. Особенно важным является применение УЗК для контроля сварных швов, например, на раме тележки, где некоторые важные швы требуют обработки проплавлением для обеспечения прочности конструкции. Для предотвращения дефектов сварки, таких как неполный провар и непровар, необходимо проводить внутренний контроль сварных швов. Благодаря высокой чувствительности, низкой стоимости оборудования, удобству эксплуатации и способности точно идентифицировать форму дефекта, ультразвуковой контроль является основным методом для дефектоскопии внутренних дефектов сварных швов на тележках, что способствует обеспечению их качества и безопасности [6].

Принцип работы: ультразвуковой контроль основывается на применении высокочастотных звуковых волн (ультразвука), которые проходят через материал. Процесс контроля включает следующие этапы: 1) посылка ультразвуковых волн:

ультразвуковой дефектоскоп посылает ультразвуковые волны через проверяемый объект с помощью пьезоэлектрического датчика; 2) отражение волн от дефектов: когда ультразвуковая волна сталкивается с дефектом или границей различных материалов внутри объекта (например, трещины или поры), она отражается и возвращается к датчику; 3) анализ отраженных волн: время, которое требуется для возврата отраженной волны, и ее интенсивность анализируются с помощью специального оборудования. Это позволяет точно определить наличие, размеры и местоположение дефектов (рис. 2) [7].

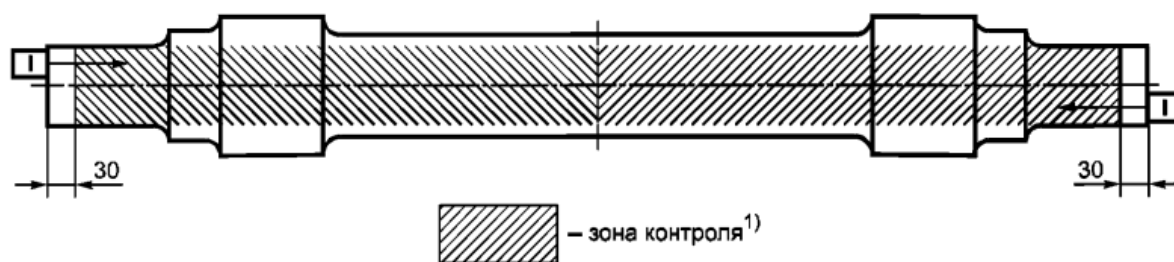


Рис. 2. Зоны УЗК черновых осей на выявление внутренних дефектов

Преимущества УЗК: глубокое проникновение: УЗК позволяет выявлять внутренние дефекты, которые недоступны для визуального осмотра; высокая точность: метод обеспечивает высокую точность и позволяет точно локализовать дефекты; безопасность и сохранность объектов: УЗК не нарушает целостность проверяемого объекта и позволяет сохранить его пригодность для эксплуатации.

Ограничения: требует наличия контактных зон для передачи ультразвуковых волн; не всегда эффективен для материалов с сильно неоднородной структурой или при сложных формах дефектов.

Вихретоковый контроль

Вихретоковый контроль (ВТК) — это метод неразрушающего контроля, основанный на применении принципа индукции вихревых токов для обнаружения дефектов в металлических объектах, преимущественно на их поверхности и вблизи поверхности [8].

Принципы работы: 1) создание магнитного поля: вихретоковый контроль начинается с того, что на поверхность объекта подается переменный ток, создающий магнитное поле. Это магнитное поле индуцирует вихревые токи в материале; 2) реакция материала на токи: вихревые токи возникают в проводящем материале, и их распределение зависит от структуры материала, а также от наличия дефектов, таких как трещины, поры или коррозия; 3) обнаружение отклонений: если в материале имеются дефекты, они изменяют распределение вихревых токов, что вызывает искажения в магнитном поле. Эти изменения могут быть зафиксированы

с помощью специальных датчиков и анализаторов; 4) анализ данных: сигналы, полученные от датчиков, анализируются, что позволяет выявить и локализовать дефекты [9].

Преимущества ВТК: высокая чувствительность, ВТК эффективно обнаруживает поверхностные и близкие к поверхности дефекты, включая микротрещины и коррозию; безопасность: метод не повреждает объект, что делает его подходящим для проверки ключевых компонентов без их разрушения; быстрота: ВТК позволяет быстро получить результаты без необходимости демонтировать компоненты; многофункциональность: вихретоковый контроль может применяться не только для проверки металлов, но и для других проводящих материалов.

Ограничения: поверхностные дефекты, ВТК эффективен только для обнаружения дефектов, расположенных на поверхности или вблизи поверхности материала.

Интеграция инновационных технологий в процессы неразрушающего контроля на подвижном составе

С развитием современных технологий и наступлением эры знаний традиционные методы неразрушающего контроля продолжают совершенствоваться. В процессе производства и технического обслуживания железнодорожных транспортных средств все чаще применяются инновационные подходы в области неразрушающего контроля. Одной из ключевых технологий является машинное зрение, которое способствует реализации цифрового и интеллектуального контроля состояния подвижного состава.

Использование умных очков в неразрушающем контроле

Умные очки являются одним из наиболее перспективных инструментов для улучшения процесса неразрушающего контроля (НК). Они предлагают операторам и специалистам уникальную возможность получать, отображать и анализировать данные в реальном времени, что значительно ускоряет диагностику и повышает точность контроля [10].

Основные функции умных очков при неразрушающем контроле:

- отображение данных в реальном времени: умные очки позволяют отображать результаты тестирования и данные о состоянии объекта прямо в поле зрения оператора. Например, данные ультразвукового дефектоскопа или изображение с термографической камеры могут быть переданы на дисплей очков, что позволяет специалисту анализировать ситуацию без необходимости отвлекаться от процесса контроля;
- удаленная поддержка: умные очки могут быть оснащены камерой и системой передачи данных, что позволяет оперативно передавать изображения или видео на экран удаленным экспертам для консультаций или диагностики. Это

особенно важно для сложных проверок, когда требуется множественное мнение или помощь эксперта [11];

– интерактивность и голосовое управление: современные модели умных очков могут поддерживать голосовое управление, что позволяет оператору управлять системой без использования рук, оставляя их свободными для работы с инструментами;

– сбор и архивирование данных: умные очки могут автоматически фиксировать результаты тестов и состояние проверяемых объектов. Эти данные могут быть сохранены для дальнейшего анализа или документации, что повышает точность отчетности и упрощает хранение информации.

Возможность совмещения умных очков с различными методами неразрушающего контроля

1. Ультразвуковой контроль (УЗК)

Интеграция умных очков с ультразвуковыми дефектоскопами позволяет отображать результаты измерений непосредственно на экране в реальном времени. Это позволяет оператору немедленно анализировать состояние компонента без необходимости возвращаться к прибору для получения данных, что значительно ускоряет процесс диагностики и повышает его эффективность.

Преимущества интеграции: мгновенное отображение данных, включая графики и результаты измерений в реальном времени, что ускоряет процесс принятия решений; возможность проведения совместного анализа с удаленными экспертами через видеоконференцию, что повышает точность диагностики и улучшает качество взаимодействия.

2. Магнитопорошковый контроль (МПК)

Умные очки могут быть использованы для отображения изображений, полученных с помощью магнитопорошкового контроля, что обеспечивает более быстрый и точный анализ результатов. Кроме того, с помощью видеопотока, передаваемого через умные очки, специалисты могут получить удаленную консультацию и обсудить обнаруженные дефекты, что улучшает процесс принятия решений и повышает качество контроля.

Преимущества интеграции: визуализация дефектов в реальном времени, что позволяет оперативно реагировать на результаты и повышает точность диагностики; возможность обработки изображений для выделения дефектов и последующей отправки данных в облачные системы для хранения, анализа и дальнейшего использования.

3. Вихретоковый контроль (ВТК)

Умные очки могут отображать результаты вихретокового контроля в реальном времени, позволяя операторам точно и быстро локализовать дефекты. Это также позволяет специалистам оперативно реагировать на проблемы, не отвлекаясь от объекта проверки.

Преимущества интеграции: быстрая диагностика дефектов без необходимости постоянного обращения к прибору, что повышает оперативность проведения контроля; возможность взаимодействия с удаленными экспертами для получения консультаций по сложным или спорным случаям, что улучшает точность и качество диагностики.

Хотя использование умных очков значительно улучшает процессы диагностики, оно также накладывает дополнительные требования к квалификации и техническим знаниям специалистов, проводящих неразрушающий контроль. Это связано с тем, что операторы должны не только быть квалифицированными в методах НК, но и уметь работать с высокотехнологичными устройствами, такими как умные очки.

Для выполнения процедур НК с использованием умных очков инспектора должны пройти сертификацию согласно международным стандартам, таким как ISO 9712 или ГОСТ 34513—2013, которые определяют требования к квалификации специалистов в области неразрушающего контроля.

Системы машинного зрения, реализованные применительно к электрическому подвижному составу

В последние годы в системе городского железнодорожного транспорта Китая активно внедряются технологии онлайн-тестирования, анализа больших данных и бесконтактного НК с использованием машинного зрения. Эти технологии совершенствуют методы обнаружения дефектов, процедуры технического обслуживания и управления эксплуатацией подвижного состава, способствуя оптимальному распределению ресурсов и улучшению качества обслуживания. Применение машинного зрения для оценки состояния транспортных средств становится важным направлением исследований и практических приложений в этой области [12].

Система динамического обнаружения неисправностей электропоезда (TEDS-3D) обеспечивает безопасную эксплуатацию электропоездов, играя важную роль в предотвращении аварий. Она использует высокоскоростные линейные камеры для сбора изображений нижней части поезда, кузова, тележек и других компонентов, автоматически выявляя неисправности и сигнализируя о дефектах. Обнаруженные изображения передаются в реальном времени

на терминал мониторинга, где ненормальные сигналы проверяются вручную и передаются для дальнейшего анализа. Это повышает эффективность операций и улучшает диагностику скрытых неисправностей во время технического обслуживания ЭВС.

Оборудование для обнаружения установлено рядом с путями. Когда транспортное средство проходит, блок модуля изображения активируется, собирает данные с нижней части и обеих сторон транспортного средства, а затем передает полученную информацию в шкаф через кабель связи в распределительную коробку и далее в компьютерный зал. В конечном итоге данные отправляются в центр динамического обнаружения EMU TEDS через сетевой канал.

Технические преимущества системы TEDS-3D

Технология 3D-изображений использует 3D-камеру для создания карты параллакса, что позволяет точно воспроизвести пространственное положение объекта. С помощью блока сканирования и параллельных вычислений на графическом процессоре данные облака точек рассчитываются в реальном времени. В отличие от 2D-системы, которая часто вызывает ложные тревоги из-за ручных меток, 3D-технология устраняет эти ложные тревоги и помехи, такие как следы воды. Частота ложных срабатываний в 3D-системе равна нулю, что делает ее более точной и надежной.

Аппаратно-программный комплекс ARSCIS

Компания «Малленом» разработала аппаратно-программный комплекс (АПК) ARSCIS, предназначенный для обнаружения и идентификации объектов подвижного состава (вагонов, цистерн, платформ и др.) на определенном участке железной дороги. Идентификация объектов осуществляется посредством оптического распознавания их регистрационных номеров, нанесенных на борта и балку шасси вагонов. Комплекс ARSCIS основан на оптико-электронных и электронно-вычислительных средствах, а его работа использует методы искусственного интеллекта, алгоритмы и программные средства анализа изображений и распознавания образов, разработанные учеными и инженерами ИМИТ СПбПУ и ООО «Малленом» [13].

Структурная схема типового варианта промышленного образца аппаратно-программного комплекса (АПК) ARSCIS представлена на рис. 3. Аппаратное обеспечение комплекса включает в себя: оптико-электронную подсистему сбора информации; датчики, фиксирующие положение колесных пар; вычислительную подсистему для обработки полученных данных, а также набор телекоммуникационных соединений.

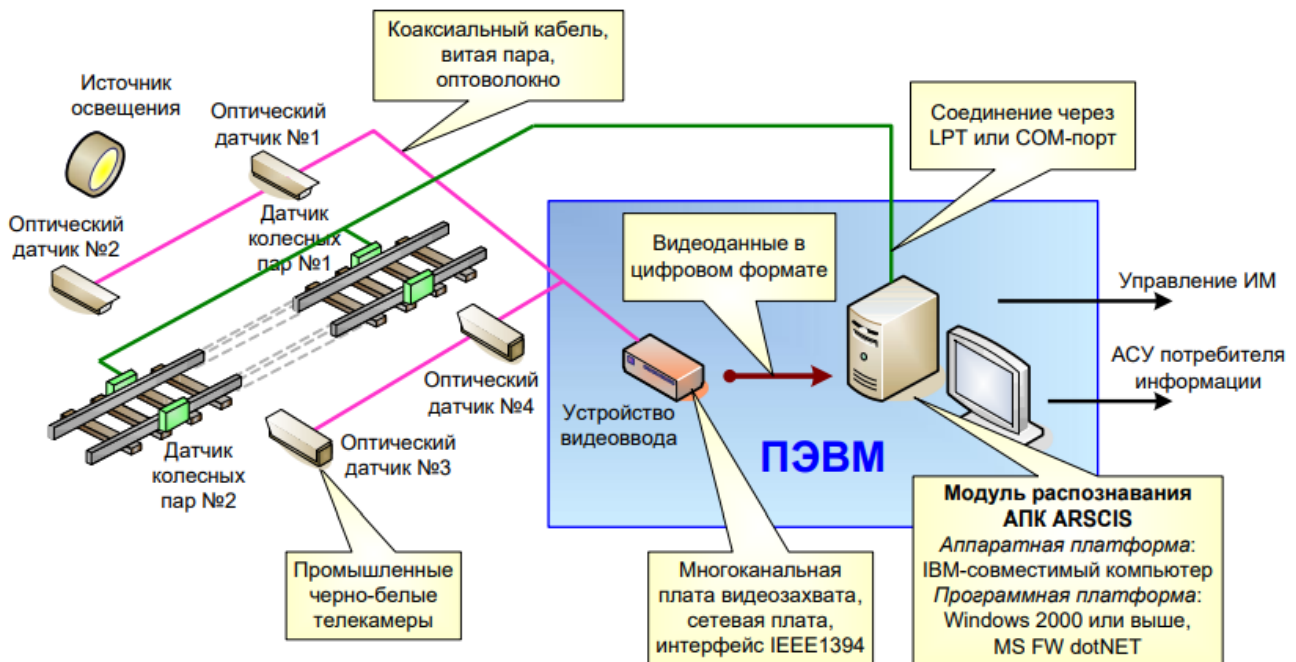


Рис. 3. Структурная схема типового варианта промышленного образца аппаратно-программного комплекса (АПК) ARSCIS

Аппаратно-программный комплекс (АПК) ARSCIS обеспечивает быстрое и достоверное обнаружение и идентификацию объектов подвижного состава, но ориентирован преимущественно на распознавание регистрационных номеров. При контроле узлов и деталей механической части электроподвижного состава алгоритмы распознавания, применяемые в комплексе, не обеспечивают достаточной точности для обнаружения поверхностных дефектов, что делает их использование в данном контексте нецелесообразным [14].

Заключение

Неразрушающий контроль играет жизненно важную роль на этапах проектирования и производства транспортных средств. В статье рассмотрены современные методы неразрушающего контроля подвижного состава с акцентом на инновационные технологии, такие как умные очки и машинное зрение. Эти технологии обладают значительным потенциалом для повышения точности, оперативности и безопасности диагностики, что открывает новые возможности для улучшения качества обслуживания и повышения надежности эксплуатации подвижного состава. Однако их внедрение связано с рядом ограничений, включая высокую стоимость, необходимость обучения персонала и возможные проблемы с совместимостью с существующими системами. Для успешного применения данных технологий необходимо провести дополнительные исследования их эффективности и надежности в реальных условиях эксплуатации, а также разработать стандарты

и нормативные акты. Несмотря на существующие трудности, перспективы развития этих методов остаются значительными, что может привести к существенным улучшениям в области контроля и диагностики на железных дорогах в будущем.

Список источников

1. Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В. В. Ключев. — 3-е изд. — М.: Машиностроение, 2005. — 656 с.
2. Се Вэньян. Исследования по оптимизации архитектуры оборудования станции обнаружения TEDS для системы обнаружения неисправностей при работе электропоезда / Вэньян Се // Технология Zheng Tie. — 2018. — № 4. — С. 46.
3. ALEGER. Умные очки для дополненной реальности. — URL: <https://alegerglobal.com/ru/дополненная-реальность/умные-очки/> (дата обращения: 10.08.2024).
4. Бахова Л. В. Основные виды и методы неразрушающего контроля деталей и узлов железнодорожного подвижного состава / Л. В. Бахова // Вестник науки и творчества. — 2017. — № 6(18).
5. Технологическая инструкция по неразрушающему контролю деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Магнитопорошковый метод. ТИ НК В.21-2.2019.
6. Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Специальные требования ПР НК В.2
7. ГОСТ 34656—2020. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава методы неразрушающего контроля.
8. ПР НК В.3. Правила неразрушающего контроля деталей тележек грузовых при ремонте, специальные требования.
9. Козлов М. В. Исследование метрологических характеристик вихретокового метода неразрушающего контроля вагонного парка / М. В. Козлов, А. А. Петров, Т. В. Левчук // Инновации и инвестиции. — 2021. — № 6.
10. RealWear. — URL: <https://www.realwear.com/> (дата обращения: 15.12.2024).
11. GRSE. — URL: <https://grse.ru/блог/технологии/будущее-промышленности-как-умные-очки/> (дата обращения: 24.10.2024).
12. Чжан Хэ. Интеллектуальная эксплуатация и техническое обслуживание городского железнодорожного транспорта. Обнаружение / Хэ Чжан, Хунвэй Йи, Ци Цао // Исследование городского железнодорожного транспорта. — 2020. — Т. 23. — № 4. — С. 89–93.
13. Малыгин Л. Л. Оптоэлектронная система идентификации объектов подвижного состава ARSCIS на станции Череповец Северной железной дороги / Л. Л. Малыгин, В. В. Мошников, В. А. Царев // Сборник докладов научно-практической конференции «Инновационные проекты, новые технологии и изобретения». — 27–28 октября 2005 г., Экспериментальное кольцо ВНИИЖТ. — М.: ВГУП ВНИИЖТ, 2005. — С. 122–130.
14. Цаплин А. Е. Совершенствование методов контроля деталей механической части электроподвижного состава применением оптико-электронных средств: автореф. дисс. ... канд.

техн. наук: 05.22.07 / А. Е. Цаплин. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2011. — 18 с.

Дата поступления: 16.12.2024

Решение о публикации: 05.02.2025

Контактная информация:

ШЭНЬ Цзеи — аспирант; 787612109@qq.com

ЦАПЛИН Алексей Евгеньевич — канд. техн. наук, доц.; tsaplin.alexey@mail.ru

Application of Non-Destructive Testing Technology on Rolling Stock and Prospects for Its Development

Shen Jieyi, A. E. Tsaplin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Shen Jieyi, Tsaplin A. E. Application of Non-Destructive Testing Technology on Rolling Stock and Prospects for Its Development. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 31–44. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-31-44

Summary

Purpose: The article is devoted to the research of the integration of innovative technologies into non-destructive testing (NDT) systems on the railway rolling stock. Traditional NDT methods, such as ultrasonic, magnetic particle and eddy current inspection, as well as their potential and limitations are considered in the light of modern requirements to safety and operational efficiency. The focus is on the application of smart glasses and machine vision technologies as supporting tools for improving diagnostics accuracy, faster defect detection and better experts' interaction. Smart glasses are considered as a means of visualizing real-time data making diagnostics processes faster and reducing dependence on operators' proficiency. Machine vision technologies, in turn, provide automatic defect detection, which significantly reduces human error factor and improves inspection accuracy. **Methods:** The research includes analyzing current publications, studying the best NDT application practices in the railway industry, and technological forecasting based on the current trends. Particular attention is paid to the integration of smart glasses as a tool for real-time data visualization and the use of machine vision designed to automate the diagnostics process. Remote experts' interaction and cloud platform integration for data analysis have also been discussed. **Results:** The integrated smart glasses and machine vision for rolling stock diagnostics has proved to increase diagnostics accuracy, make NDT process faster, and reduce human error. The use of the above-stated technologies enables efficient data analysis and real-time remedial recommendations. **Practical significance:** Based on the analysis conducted, the prospects of the innovative technology introduction in the processes of non-destructive testing (NDT) have been outlined. The above-stated technologies will improve safety, increase the diagnostics accuracy and optimize the rolling stock maintenance. In the modern era of artificial intelligence, the use of machine vision systems can provide a more accurate data processing for rolling stock maintenance, which will lead to significant labour cost reduction.

Keywords: Non-destructive testing, rolling stock, smart glasses, artificial intelligence, railway transport.

References

1. Klyuev V. V. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika: Spravochnik. 3-e izd.* [Non-destructive testing and diagnostics: Handbook. 3rd ed.]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005, 656 p. (In Russian)
2. Se Ven'yan. Issledovaniya po optimizatsii arkhitektury oborudovaniya stantsii obnaruzheniya TEDS dlya sistemy obnaruzheniya neispravnostey pri rabote elektropoezda [Research on optimization of the TEDS detection station equipment architecture for the fault detection system during electric train operation]. *Tekhnologiya Zheng Tie* [Zheng Tie Technology]. 2018, Iss. 4, p. 46. (In Russian)
3. ALEGER. *Umnye ochki dlya dopolnennoy real'nosti* [ALEGER. Smart glasses for augmented reality]. Available at: <https://alegerglobal.com/ru/dopolnennaya-real'nost'/umnye-ochki/> (accessed: August 10, 2024). (In Russian)
4. Bakhova L. V. Osnovnye vidy i metody nerazrushayushchego kontrolya detaley i uzlov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Main types and methods of non-destructive testing of parts and assemblies of railway rolling stock]. *Vestnik nauki i tvorchestva* [Bulletin of science and creativity]. 2017, Iss. 6(18). (In Russian)
5. *Tekhnologicheskaya instruktsiya po nerazrushayushchemu kontrolyu detaley i sostavnykh chastey kolesnykh par vagonov pri remonte. Magnitoporoshkovyy metod. TI NK V.21-2.2019* [Technological instruction for non-destructive testing of parts and components of wagon wheelsets during repair. Magnetic particle method. TI NK V.21-2.2019]. (In Russian)
6. *Pravila nerazrushayushchego kontrolya detaley i sostavnykh chastey kolesnykh par vagonov pri remonte. Spetsial'nye trebovaniya PR NK V.2* [Rules for non-destructive testing of parts and components of wagon wheelsets during repair. Special requirements PR NK V.2]. (In Russian)
7. *GOST 34656—2020. Osi kolesnykh par zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava metody nerazrushayushchego kontrolya* [GOST 34656—2020. Axles of wheelsets of railway rolling stock. Non-destructive testing methods]. (In Russian)
8. *PR NK V.3. Pravila nerazrushayushchego kontrolya detaley telezhek gruzovykh pri remonte, spetsial'nye trebovaniya* [PR NK V.3. Rules for non-destructive testing of freight bogie parts during repair, special requirements]. (In Russian)
9. Kozlov M. V., Petrov A. A., Levchuk T. V. Issledovanie metrologicheskikh kharakteristik vikhretokovogo metoda nerazrushayushchego kontrolya vagonnogo parka [Study of metrological characteristics of the eddy current method of non-destructive testing of wagon fleet]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments]. 2021, Iss. 6. (In Russian)
10. RealWear. Available at: <https://www.realwear.com/> (accessed: December 15, 2024).
11. GRSE. Available at: <https://grse.ru/blog/tekhnologii/budushchee-promyshlennosti-kak-umnye-ochki/> (accessed: October 24, 2024).
12. Chzhan Khe, Yi Khunvey, Tsao Tsi. Intellektual'naya ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie gorodskogo zheleznodorozhnogo transporta. Obnaruzhenie [Intelligent operation and maintenance of urban rail transport. Detection]. *Issledovanie gorodskogo zheleznodorozhnogo transporta* [Research of urban rail transport]. 2020, vol. 23, Iss. 4, pp. 89–93. (In Russian)

13. Malygin L. L., Moshnikov V. V., Tsarev V. A. Optoelektronnaya sistema identifikatsii ob»ektov podvizhnogo sostava ARSCIS na stantsii Cherepovets Severnoy zheleznoy dorogi [Optoelectronic system for identification of rolling stock objects ARSCIS at the Cherepovets station of the Northern Railway]. *Sbornik докладов nauchno-prakticheskoy konferentsii “Innovatsionnye proekty, novye tekhnologii i izobreteniya”*. 27–28 oktyabrya 2005 g., *Ekspierimental’noe kol’tso VNIIZhT* [Collection of reports of the scientific and practical conference “Innovative projects, new technologies and inventions”. October 27–28, 2005, Experimental ring of VNIIZhT]. Moscow: VGUP VNIIZhT Publ., 2005, pp. 122–130. (In Russian)

14. Tsaplin A. E. *Sovershenstvovanie metodov kontrolya detaley mekhanicheskoy chasti elektropodvizhnogo sostava primeneniem optiko-elektronnykh sredstv: avtoref. disc. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.07* [Improvement of methods for testing parts of the mechanical part of electric rolling stock using optoelectronic means: author’s abstract. diss. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.22.07]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2011, 18 p. (In Russian)

Received: December 16, 2024

Accepted: February 05, 2025

Author’s information:

Jieyi SHEN — Postgraduate Student; 787612109@qq.com

Alexey E. TSAPLIN — PhD in Engineering, Associate Professor; tsaplin.alexey@mail.ru

УДК 629.4.018+629.4.069

Определение дефектов на поверхности катания колес грузового вагона посредством устройства мониторинга, установленного на буксе

Д. Н. Солин^{1,2}, А. А. Шамрай³, Д. В. Даниленко⁴

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Акционерное общество «Научно-внедренческий центр «Вагоны», Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 22М

³ООО НПП «РаТорм», Российская Федерация, 620078, Екатеринбург, ул. Вишневая, 7

⁴ООО «Управляющая компания РМ Рейл», Российская Федерация, 430006, Республика Мордовия, Саранск, ул. Лодыгина, 11

Для цитирования: Солин Д. Н., Шамрай А. А., Даниленко Д. В. Определение дефектов на поверхности катания колес грузового вагона посредством устройства мониторинга, установленного на буксе // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 45–61. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-45-61

Аннотация

Цель: Получение исходных данных с УМДВ при движении грузового вагона (порожнего, груженого), колесные пары которого были как в состоянии нового изготовления, так и с браковочными дефектами на поверхности катания колеса, и формирование статистических данных по результатам регистрации показаний встроенных датчиков УМДВ, установленных на тележку модели 18-9891. **Методы:** Проведение статистической обработки данных по результатам испытаний устройства на реальном вагоне с целью определения максимальных амплитуд ускорений при движении вагона с разным состоянием колесных пар и частоты ударного воздействия для каждого скоростного режима движения. **Результаты:** В результате исследовательских испытаний установлено, что УМДВ фиксирует ударное воздействие дефектного колеса о рельс. Алгоритм автоматического определения дефектного колеса о рельс можно выстраивать на базе частотной составляющей повышенных амплитуд ускорений при соответствующем режиме загрузки и скорости движения. **Практическая значимость:** Полученные результаты испытаний позволяют разработать алгоритмы определения дефектов на поверхности катания колесных пар на ходу поезда посредством УМДВ, что является одной из важных функций цифрового грузового вагона.

Ключевые слова: Цифровой грузовой вагон, исследовательские испытания, система диагностики, акселерометры, амплитуды ускорений, дефект поверхности катания, колесная пара, буксовый узел.

Введение

Повышение качества технического обслуживания подвижного состава остается приоритетной задачей железнодорожных перевозок, это напрямую влияет на безопасность движения поездов. Одним из решений данной задачи является необходимость применения усовершенствованных систем контроля грузовых вагонов за счет использования цифровых технологий. На железных дорогах уже долгое

время применяются стационарные системы диагностики, устанавливаемые на подходах к пунктам технического обслуживания [1, 2]. Такие системы выполняют важную функцию при техническом обслуживании основных узлов подвижного состава, однако даже при развитии и повышении точности они имеют существенный недостаток — диагностирование только при проходе поезда через участок регистрации. Актуальным решением данной проблемы является разработка бортовых систем непрерывной диагностики, способных повысить надежность перевозочного процесса и обеспечить постоянное отслеживание технического состояния грузового вагона, параметры движения, маневров, пробега и его местоположения. Поэтому перспективным направлением развития грузовых железнодорожных перевозок на сегодняшний день является разработка и внедрение новых высокотехнологичных бортовых цифровых систем диагностики [3, 4].

Цифровизация грузового вагона

С недавнего времени происходит успешная реализация проекта «Цифровой грузовой вагон», позволяющего оптимизировать обслуживание и работу грузового вагонного парка [5–9].

«Цифровой грузовой вагон» представляет собой комплекс автоматизированных беспроводных систем непрерывной диагностики с независимым источником электропитания, которые устанавливаются на элементы грузового вагона. Каждая система состоит из датчиков, позволяющих в режиме реального времени регистрировать данные о техническом состоянии вагона. Особенностью работы данной цифровой системы является получение и систематизация в программно-аппаратном комплексе первичных данных прямо на вагоне. Дальнейшей задачей цифровой системы является передача данных по беспроводным каналам связи в цифровую платформу, которая, в свою очередь, содержит архив всех получаемых данных и характеристик о каждом контролируемом вагоне и позволяет дополнительными аналитическими алгоритмами обеспечивать формирование отчетных (оперативных) данных по движению вагона и предиктивный контроль технического состояния.

Такой контроль технического состояния парка грузовых вагонов позволит получить дополнительные эффекты от внедрения системы «Цифровой грузовой вагон» [5, 6]:

- снижение порожнего пробега и улучшение эксплуатационных показателей работы вагонного парка;
- снижение затрат на организацию перевозочного процесса за счет оптимального распределения вагонного парка;
- сокращение простоев, снижение случаев отцепки груженого вагона во внеплановый ремонт;

- повышение скорости доставки грузов;
- повышение безопасности движения поездов и минимизация человеческого фактора.

Устройство мониторинга и диагностики грузового вагона (УМДВ). Особенности применения и технические характеристики

Концепция создания «Цифрового грузового вагона» реализована на грузовых вагонах компании «РМ-Рейл» (рис. 1). Ключевым элементом системы «Цифровой грузовой вагон» является устройство мониторинга и диагностики грузового вагона (УМДВ), разработанное ООО НПП «Раторм». УМДВ — это электронное устройство, устанавливаемое на корпус буксового узла тележки грузового вагона. Присоединительные размеры УМДВ позволяют устанавливать его как на тележки типа 2 по ГОСТ 9246 модели 18-100 или ее аналогов (корпусная букса с тарельчатой шайбой) вместо смотровой крышки, так и на тележки типа 3 по ГОСТ 9246 с кассетным подшипником и адаптером с применением соответствующего кронштейна крепления. Состоит из синхронного генератора, аккумуляторной батареи, микропроцессорного блока, внутренней памяти, датчиков ускорения, температуры и оборотов, а также радиоканала, передающего регистрируемые данные на сервер телематики (Техпортал) [10, 11].



Рис. 1. Установленное УМДВ на буксовый узел тележки 18-9891
(фото — Д. Н. Солин)

УМДВ разработано с целью автоматического контроля ряда параметров грузового вагона и предназначается для формирования первичных цифровых данных о состоянии единицы подвижного состава, таких как: географическое местоположение грузового вагона, скорость его движения, фактический пробег, температура

буксового узла и скорость ее изменения, ускорения и другие параметры состояния грузового вагона и инфраструктуры в целом. Накопленные устройством данные сохраняются во внутренней памяти и с заданным периодом отправляются по каналам операторов цифровой мобильной сотовой связи на сервер телематики для дальнейшего хранения и последующего дополнительного анализа [10]. Схематично общий алгоритм работы УМДВ представлен на рис. 2.

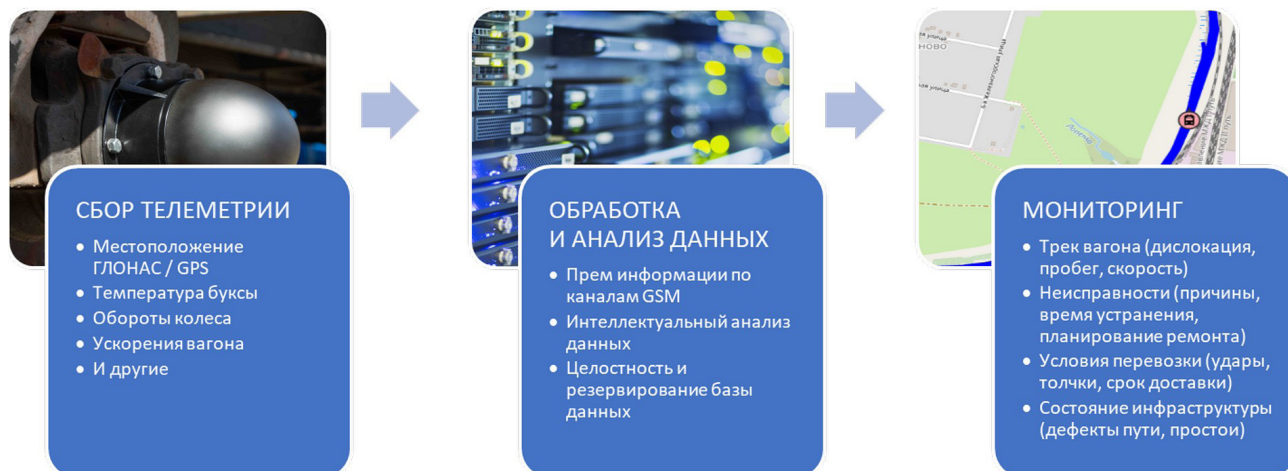


Рис. 2. Общий алгоритм работы УМДВ (фото — А. А. Шамрай)

Благодаря встроенному генератору, при движении вагона УМДВ обеспечивает электропитанием себя, заряжает встроенный аккумулятор и позволяет организовать питание и интерфейс для подключения дополнительных внешних датчиков. Максимальная скорость движения вагона с УМДВ может достигать 130 км/ч [11].

УМДВ автоматически осуществляет сбор, накопление и передачу информации о состоянии грузового вагона в реальном времени, обеспечивая эффективный контроль и безопасность грузоперевозок (в том числе грузов повышенной опасности) [10].

Параметры УМДВ, передаваемые на сервер сбора данных:

- определение фактической скорости движения вагона;
- контроль температуры буксового узла и скорости ее изменения;
- определение оборотов вращения оси колесной пары и фактического пробега вагона;
- определение начала и окончания движения вагона;
- место и время перехода с путей общего на необщего пользования и обратно;
- величина фактического веса вагона;
- определение внешних динамических воздействий на вагон, контроль схода и волочения деталей вагона;
- контроль сверхнормативного воздействия на вагон, в том числе при роспуске с сортировочных горок и при проведении маневровых работ;

- определение отклонений на поверхности катания колеса по изменению ускорений (ползун, выщербина, неравномерный прокат);
- выявление ослабления торцевого крепления подшипника и сдвига буксы;
- определение толщины обода и толщины гребня;
- определение заклинивания оси колесной пары (юз);
- информация о состоянии аккумуляторной батареи;
- отслеживание местоположения и всех перемещений вагона, в том числе на путях необщего пользования.

Испытания УМДВ на грузовом вагоне

Функционал УМДВ обширный, для понимания уровня амплитуд регистрируемых показателей, изменения их вида, частотного спектра, изменения формы колебаний в зависимости от уровня загрузки, наличия/отсутствия дефектов, состояния железнодорожного пути и других случайных величин необходимо понимать, как датчики работают в реальных условиях эксплуатации подвижного состава, какие нагрузки на вагон действуют в составе поезда, наработать статистическую базу данных исходных сигналов, разработать предварительный алгоритм обработки данных и отработать его в дальнейшем с целью достоверного автоматического выявления дефектов на ходу поезда посредством УМДВ. На первом этапе принято решение исследовать динамические процессы при движении вагона, оборудованного УМДВ, в части возможности за счет этих данных определять браковочные дефекты поверхности катания колесных пар. Для наработки исходных данных было принято решение провести исследовательские испытания [12].

Целью испытаний являлся анализ исходных данных, регистрируемых с помощью УМДВ с дальнейшим формированием статистической базы данных на основе полученных сигналов с заранее известными дефектами поверхности катания. Испытания проводились на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» в г. Щербинке. При подготовке к испытаниям УМДВ устанавливались на вагоны с тележками с осевой нагрузкой 25 тс модели 18-9891 производства компании «РМ-Рейл», подкаченные под полувагон [13, 14]. В процессе испытаний каждым УМДВ автоматически определялась скорость вагона, географические координаты точки движения опытного сцепа, ускорения по трем взаимоперпендикулярным осям в обоих направлениях и температура буксового узла. Для дальнейшей обработки и сравнения полученных значений ускорений дополнительно на кронштейны крепления УМДВ и кузов вагона были установлены акселерометры, синхронизированные в одну информационную систему измерительно-вычислительного комплекса (рис. 3).



Рис. 3. УМДВ и акселерометры на буксовом узле при испытаниях
(фото — А. А. Шамрай)

После установки УМДВ испытуемый вагон был включен в состав поезда с двумя вагонами прикрытия по обе стороны (рис. 4). Сформированный опытный сцеп курсировал по экспериментальному кольцу со скоростями 20, 40, 60 и 80 км/ч.



Рис. 4. Фото опытного сцепа (фото — А. А. Шамрай)

Испытания состояли из шести экспериментов:

- регистрация ускорений от колес, не имеющих дефектов на поверхности катания;
- регистрация ускорений от колес с выщербиной длиной 40–50 мм и глубиной 8–10 мм;
- регистрация ускорений от колесной пары с односторонним ползуном глубиной от 0,5 до 1 мм;
- регистрация ускорений от колесной пары с двусторонними ползунами глубиной от 1 до 1,5 мм;
- регистрация ускорений от колесной пары с неравномерным прокатом;
- регистрация ускорений от колесной пары с тонким гребнем 24–25 мм.

Некоторые фотографии колесных пар с дефектами представлены на рис. 5.



Рис. 5. Фото дефектов поверхности катания (фото — А. А. Шамрай)

Каждый из экспериментов, в свою очередь проводился, в три этапа:

- испытания в порожнем режиме вагона;
- испытания в груженом режиме при загрузке вагона на 50 %.
- испытания в груженом режиме при загрузке вагона на 100 %.

Схема расстановки УМДВ, их номера, а также места установки акселерометров измерительной системы (Z11, Z21, Z22, Z32) указаны на рис. 6.

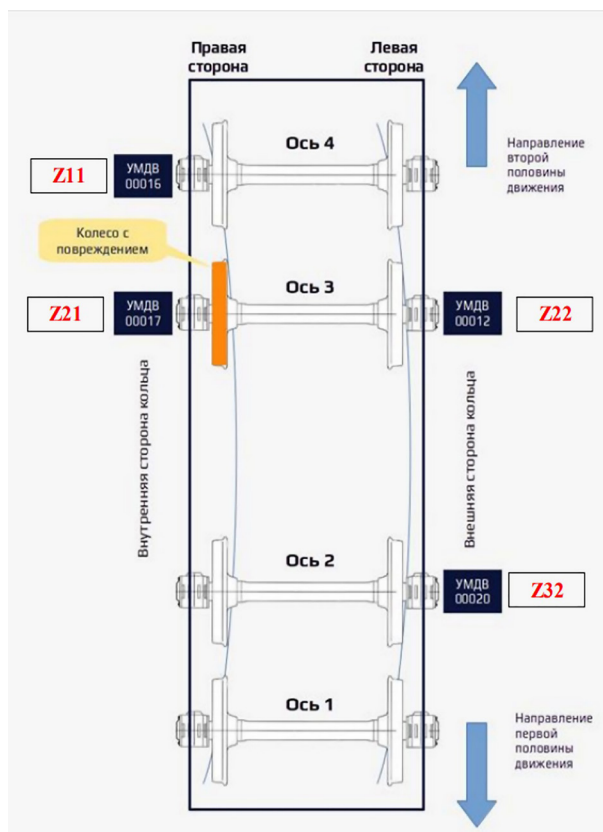


Рис. 6. Схема размещения УМДВ и акселерометров на испытуемом вагоне

Обработка и анализ первичной информации при работе УМДВ

После проведения испытаний накопленные данные во внутренней памяти каждого УМДВ подвергались подробному анализу и обработке для оценки достоверности полученных сигналов. Перед обработкой данных проводилась выгрузка файлов и предварительный просмотр осциллограмм на наличие вылетов, шумов, поврежденных или не записанных файлов (рис. 7).

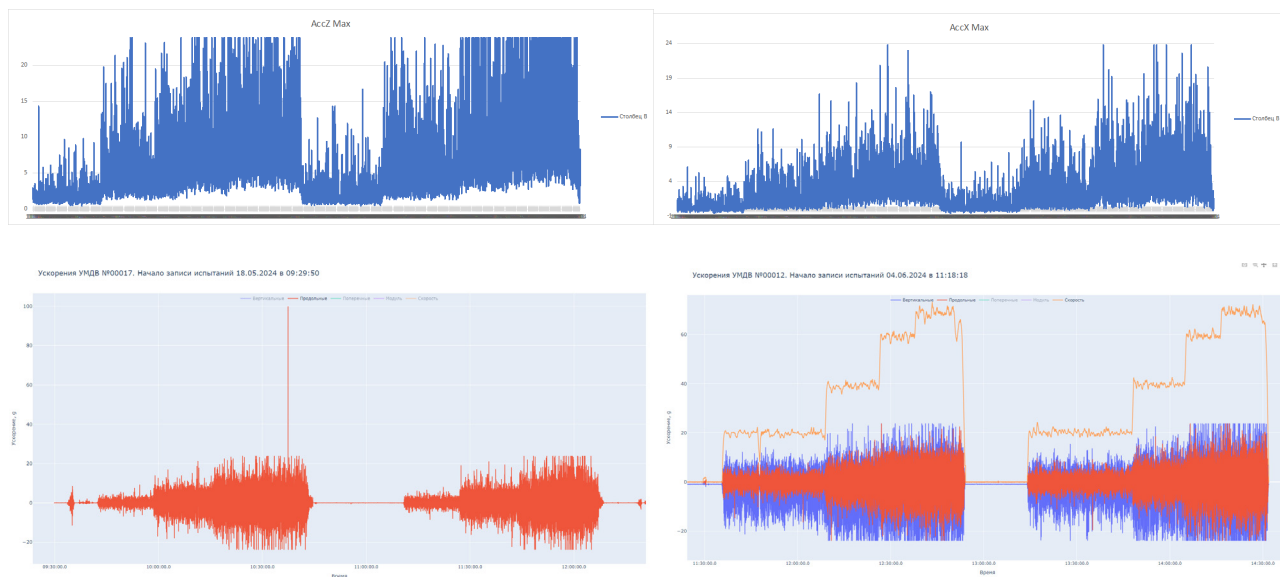


Рис. 7. Предварительный просмотр осциллограмм исходных данных

Целью дальнейшей обработки являлся анализ амплитуд ускорений при движении вагона на всех заданных скоростных режимах и конкретной загрузке вагона с изначально известным состоянием поверхности катания колесных пар.

Обработка полученного пакета исходных данных проводилась при нескольких вариантах фильтрации:

- частотная фильтрация через разложение в ряд Фурье;
- фильтрация по скорости движения;
- фильтрация по времени регистрации.

При рассмотрении результатов измерений, применяя фильтрацию по скорости движения, часть опытных проездов была обработана со скоростями движения от 0 до 10 км/ч и от 11 до 20 км/ч. По результатам обработки были получены графики с характерными для дефектов амплитудами. На рис. 8 и 9 показаны значения с УМДВ № 0012, на рис. 10 и 11 — значения с УМДВ № 0017.

По рис. 8–11 видно, что на малых скоростях движения в результате обработки данных видны повышенные амплитуды ускорений от 5g. В зависимости от скорости движения частота увеличивается, и амплитуда может достигать более 24g.

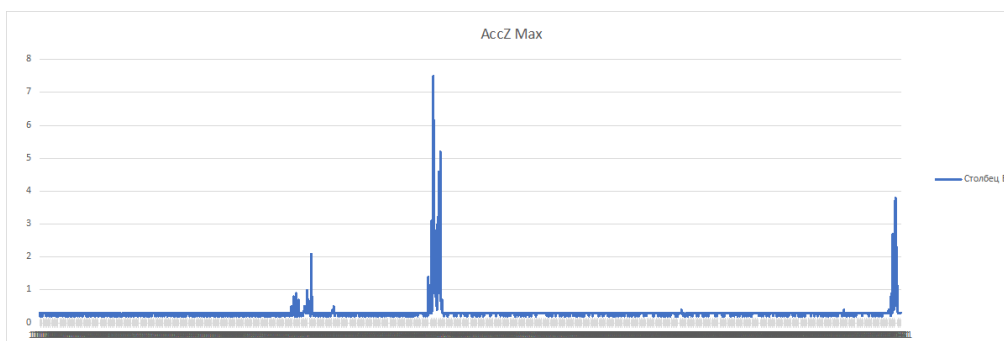


Рис. 8. Порожний вагон, максимальные ускорения, ползун 0,9 мм

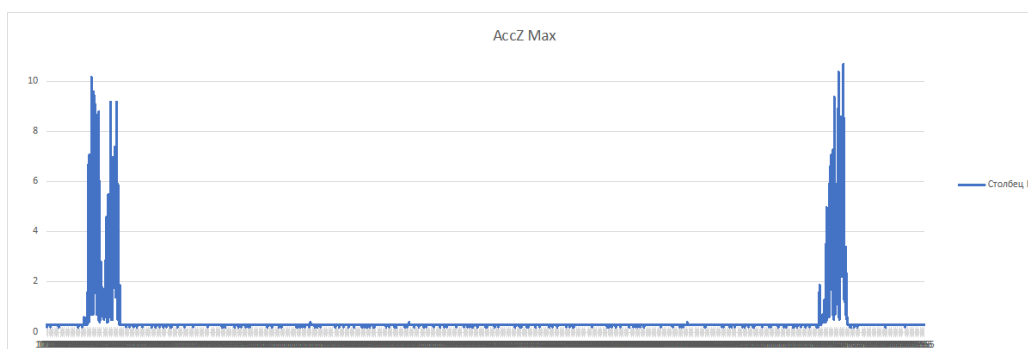
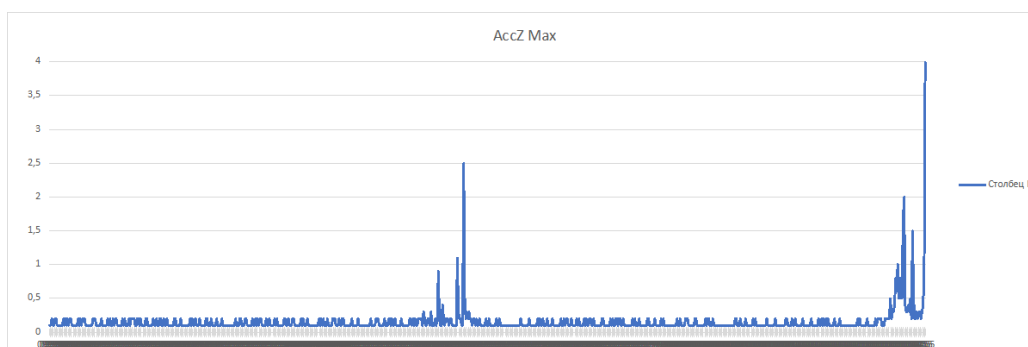
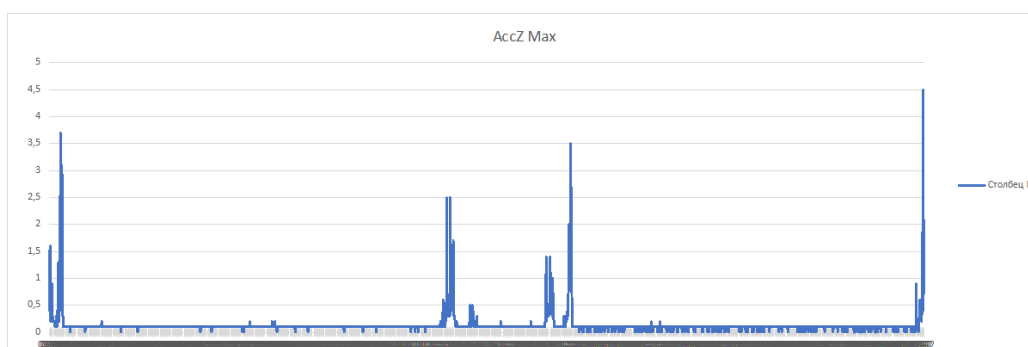


Рис. 9. Груженный вагон, максимальные ускорения, ползун 0,9 мм

Рис. 10. Порожний вагон, максимальные ускорения, выщербина, длина 81 мм, $1 \times 58 \times 10$ Рис. 11. Груженный вагон, максимальные ускорения, выщербина, длина 81 мм, $1 \times 58 \times 10$

Далее были рассмотрены исходные процессы динамических сигналов на малом промежутке времени и на разных скоростях. При просмотре определялась частота появления максимальных амплитуд ускорений в результате ударов колесных пар с различными дефектами о рельс при движении на разных скоростях.

На рис. 12–14 показаны амплитуды ускорений от дефекта типа ползун на УМДВ № 0017 при увеличении скорости движения.

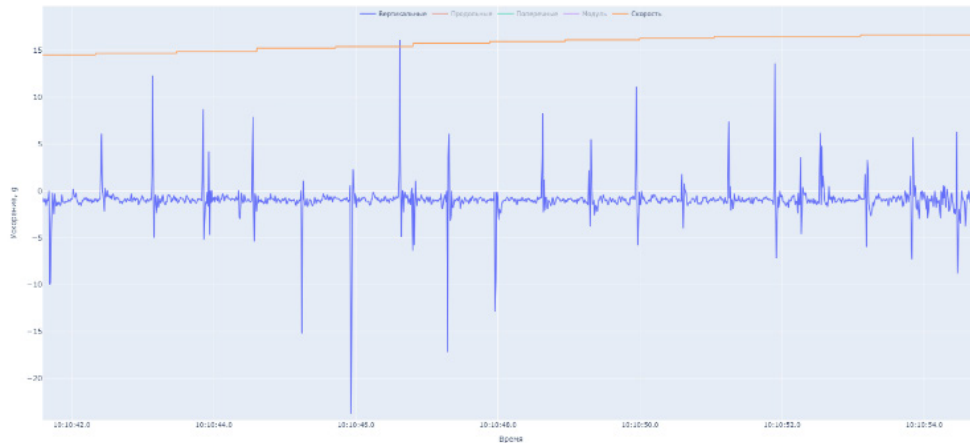


Рис. 12. УМДВ № 0017, грузеный вагон, 0,8 мм ползун, скорость 20 км/ч

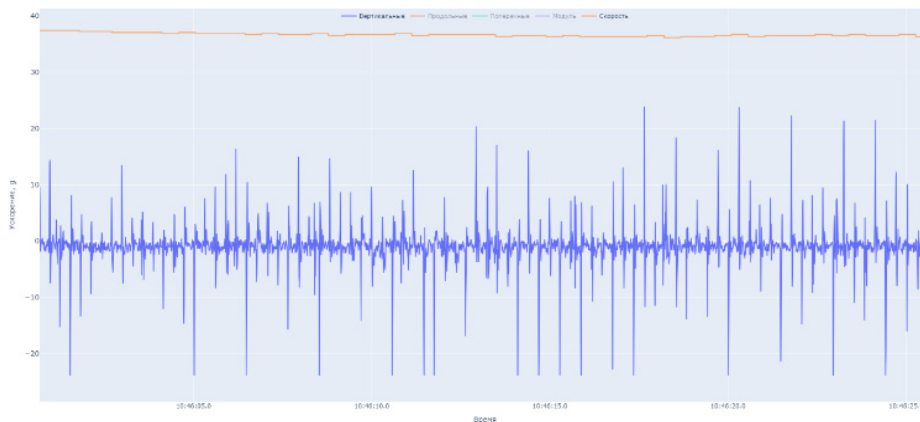


Рис. 13. УМДВ № 0017, грузеный вагон, 0,8 мм ползун, скорость 30–40 км/ч



Рис. 14. УМДВ № 0017, грузеный вагон, 0,8 мм ползун, скорость 60 км/ч

На рис. 15–17 показаны амплитуды ускорений от дефекта типа ползун на всех УМДВ при разных скоростях движения.

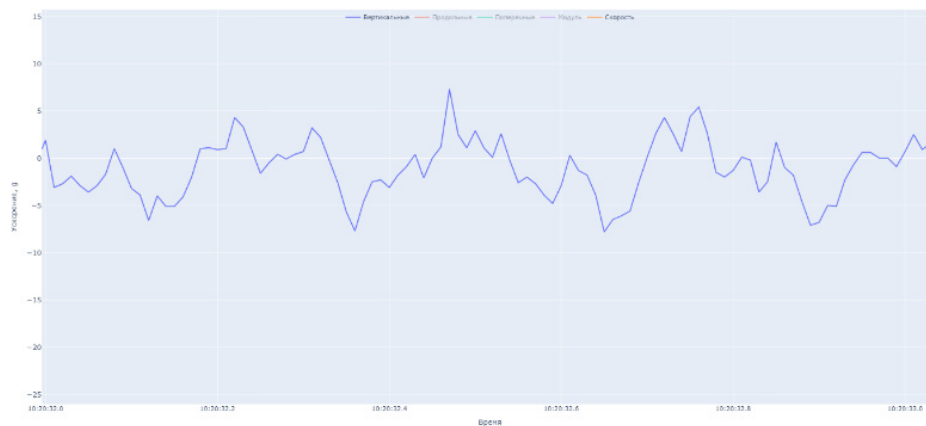


Рис. 15. УМДВ № 0016, грузеный вагон, скорость 60 км/ч, ползун на колесе с УМДВ № 0017

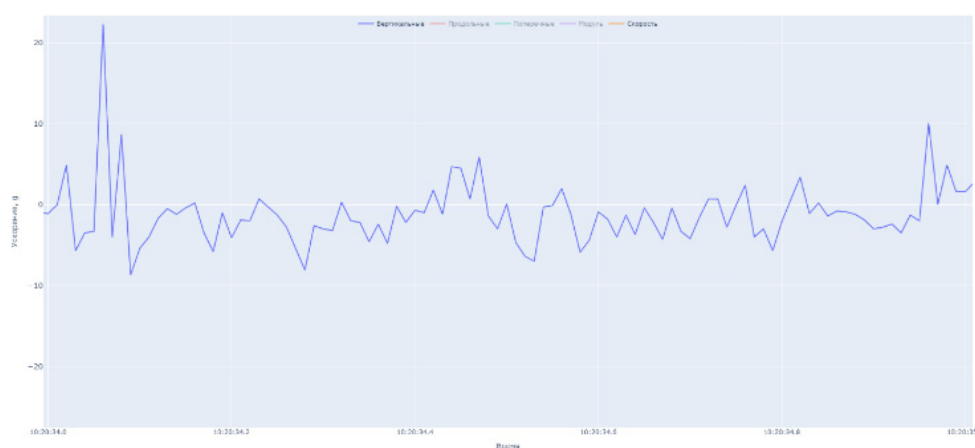


Рис. 16. УМДВ № 0012, грузеный вагон, скорость 60 км/ч, ползун на колесе с УМДВ № 0017



Рис. 17. УМДВ № 0020, грузеный вагон, скорость 60 км/ч, ползун на колесе с УМДВ № 0017

По результатам проведенных испытаний установлено, что УМДВ фиксирует ударное воздействие колеса о рельс за счет определения сверхнормативных отклонений ускорений при больших и малых скоростях движения. Для полной реализации и внедрения УМДВ в проект создания «Цифрового грузового вагона» [5, 6] необходима корректировка устройства, в частности настройки чувствительности при регистрации данных ускорений и разработка программного обеспечения с алгоритмом автоматического определения дефектного колеса при дальнейшем анализе данных. Алгоритм автоматического определения дефектов поверхности катания можно выстраивать на базе частотной составляющей повышенных амплитуд ускорений при соответствующем режиме загрузки и скорости движения. Данная разработка позволит определять виды дефектов поверхности катания и их браковочное значение, что необходимо для условий реальной эксплуатации. В части функциональных возможностей УМДВ корректно выполняет контроль основных показателей (температура буксы, скорость вагона, обороты колеса, данные местоположения и др.), сохраняя данную информацию во внутренней памяти и передавая в полном объеме на сервер телематики (Техпортал) [10].

Заключение

Проведенные исследования позволили разработать алгоритм автоматического распознавания наличия/отсутствия дефектов на поверхности катания по результатам регистрации ускорений в зоне буксового узла. Алгоритм обработки данных базируется на данных частоты повышенного ударного воздействия и позволяет проводить мониторинг состояния колесных пар на малых скоростях движения. В настоящий момент разработанный алгоритм отрабатывается на той же полученной статистической базе экспериментальных данных с целью возможности распознавания браковочных размеров дефектов.

Список источников

1. Попов В. В. Мониторинг технического состояния грузовых вагонов на ходу поезда / В. В. Попов, А. Н. Иванов, А. В. Смутин и др. // Транспорт Российской Федерации. — 2021. — № 1-2(92-93). — С. 52–56.
2. Гришин С. А. Внедрение устройства мониторинга и диагностики грузовых вагонов на ПТО / С. А. Гришин // Инновации в науке и практике: сборник научных статей по материалам XV Международной научно-практической конференции, Уфа, 11 июня 2024 года. — Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр “Вестник науки”», 2024. — С. 88–91.
3. Ададуров А. С. Система мониторинга состояния подвижного состава для формирования оптимизированных и сбалансированных планов ремонта и эксплуатации (часть 1) /

А. С. Ададуrow, А. Д. Усмендеева // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2018. — № 3(43). — С. 66–71.

4. Ададуrow А. С. Система мониторинга состояния подвижного состава для формирования оптимизированных и сбалансированных планов ремонта и эксплуатации (часть 2) / А. С. Ададуrow, А. Д. Усмендеева // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2019. — № 1(45). — С. 90–96.

5. Ширинкин А. В. Цифровой грузовой вагон / А. В. Ширинкин // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ», Щербинка, 26–27 августа 2021 года. — Щербинка: АО «ВНИИЖТ», 2021. — С. 214–216.

6. Ширинкин А. В. Умный вагон — это реальность / А. В. Ширинкин, А. А. Шамрай // Железнодорожный транспорт. — 2019. — № 10. — С. 77.

7. Неумоин В. А. Цифровой грузовой вагон — методы и способы реализации проекта / В. А. Неумоин // Актуальные проблемы современного транспорта. — 2023. — № 4(14). — С. 31–40.

8. Торопова А. А. Особенности реализации цифрового вагона в современных условиях транспортной индустрии / А. А. Торопова, А. А. Пичугина, С. В. Рачек // Вестник науки. — 2023. — Т. 4. — № 11(68). — С. 674–678. — URL: <https://www.вестник-науки.рф/article/11145> (дата обращения: 18.11.2024).

9. Стоянова Н. В. Средства диагностики узлов и деталей нетягового подвижного состава / Н. В. Стоянова // Транспорт: наука, образование, производство («Транспорт-2021»): труды международной научно-практической конференции, Воронеж, 19–21 апреля 2021 года. — Воронеж: Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» в г. Воронеж, 2021. — С. 226–228.

10. Патент № 2745168 С1 Российская Федерация, МПК В61L 25/00. Устройство мониторинга и диагностики грузового вагона: № 2020132485: заявл. 02.10.2020: опубл. 22.03.2021 / В. И. Антипов, П. Б. Колосов, В. В. Ляной и др.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «РаТорм».

11. Патент № 2778174 С1 Российская Федерация, МПК В61D 43/00, В61F 5/50, H02K 7/18. Узел крепления электрического генератора на буксовый узел или раму тележки грузового вагона (варианты): № 2021118584: заявл. 25.06.2021: опубл. 15.08.2022 / А. А. Шамрай, А. В. Ширинкин, С. А. Раловец и др.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «РаТорм», Акционерное общество «Рузаевский завод химического машиностроения».

12. Зимакова М. В. Испытания и диагностика грузовых вагонов: проблемы, решения, задачи / М. В. Зимакова, А. В. Третьяков, Д. Н. Солин и др. // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Третьей Международной научно-технической конференции, Ташкент, 17–20 апреля 2024 года. — Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2024. — С. 199–203.

13. Зимакова М. В. Тележка для грузового подвижного состава с осевой нагрузкой 25 ТС / М. В. Зимакова, А. В. Третьяков, В. С. Коршунов // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Второй Международной научно-технической конференции, Ташкент, 19–22 апреля 2023 года. — Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2023. — С. 176–182.

14. Зимакова М. В. Результаты ходовых испытаний грузового вагона с устройством мониторинга на тележках 18-9891 / М. В. Зимакова, А. А. Шамрай, Т. М. Белгородцева // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : материалы XVI Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 12–15 июля 2022 года. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2022. — С. 37–40.

Дата поступления: 13.01.2025

Решение о публикации: 13.02.2025

Контактная информация:

СОЛИН Дмитрий Николаевич — аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»¹, инженер-испытатель²; dmitri.solin@yandex.ru

ШАМРАЙ Артем Александрович — технический директор; shamray_a@ratorm.ru

ДАНИЛЕНКО Денис Викторович — директор по инновационному развитию; denis.danilenko@rmrail.ru

Defect Detection on the Freight-Car Wheel Surface with a Monitoring Device Mounted on the Axle Box

D. N. Solin^{1,2}, A. A. Shamray³, D. V. Danilenko⁴

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Joint-Stock Company Scientific and Innovation Center “Wagons”, 22M, Moskovsky Ave., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation,

³NPP RaTorm LLC, 7, Vishneva Str., Ekaterinburg, 620078, Russian Federation

⁴RM Rail Management Company LLC, 11, Lodygina Str., Saransk, 430006, Republic of Mordovia, Russian Federation

For citation: Solin D. N., Shamray A. A., Danilenko D. V. Defect Detection on the Freight-Car Wheel Surface with a Monitoring Device Mounted on the Axle Box. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 45–61. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-45-61

Summary

Purpose: To obtain CMDS initial data from the moving freight car (empty or loaded) wheelsets both newly manufactured or with rolling surface defects; to generate statistical data based on the results of registered readings from CMDS inbuilt sensors installed on the 18-9891 model bogie. **Methods:** Statistical data processing obtained from the CMDS device tested on a railway car to determine the maximum acceleration amplitudes of a moving car with different wheelset conditions and impact frequency for each speed mode. **Results:** The research tests have shown that the CMDS captures the impact of a defective wheel against a rail. The algorithm for automatic detection of a defective wheel impact against the rail can be built based on the frequency component of increased acceleration amplitudes with the appropriate loading mode and speed of movement. **Practical significance:** The test results obtained allow developing algorithms for defect detection on the train wheelset rolling surface using CMDS, which is one of the most important functions of a digital freight car.

Keywords: Digital freight car, research tests, diagnostics system, accelerometers, acceleration amplitudes, rolling surface defect, wheelset, axle box.

References

1. Popov V. V., Ivanov A. N., Smutin A. V. et al. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya gruzovykh vagonov na khodu poezda [Monitoring the technical condition of freight cars while the train is moving]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2021, Iss. 1-2(92-93), pp. 52–56. (In Russian)
2. Grishin S. A. Vnedrenie ustroystva monitoringa i diagnostiki gruzovykh vagonov na PTO [Implementation of a device for monitoring and diagnostics of freight cars at the PTO]. *Innovatsii v nauke i praktike: sbornik nauchnykh statey po materialam XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Ufa, 11 iyunya 2024 goda* [Innovations in Science and Practice: a collection of scientific articles based on the materials of the XV International Scientific and Practical Conference, Ufa, June 11, 2024]. Ufa: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Nauchno-izdatel'skiy tsentr "Vestnik nauki" Publ., 2024, pp. 88–91. (In Russian)
3. Adadurov A. S., Usmendeeva A. D. Sistema monitoringa sostoyaniya podvizhnogo sostava dlya formirovaniya optimizirovannykh i sbalansirovannykh planov remonta i ekspluatatsii (chast' 1) [Rolling stock condition monitoring system for generating optimized and balanced repair and operation plans (part 1)]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopoliy: Tekhnika zheleznykh dorog* [Bulletin of the Institute for Natural Monopoly Problems: Railway Engineering]. 2018, Iss. 3(43), pp. 66–71. (In Russian)
4. Adadurov A. S., Usmendeeva A. D. Sistema monitoringa sostoyaniya podvizhnogo sostava dlya formirovaniya optimizirovannykh i sbalansirovannykh planov remonta i ekspluatatsii (chast' 2) [Rolling stock condition monitoring system for generating optimized and balanced repair and operation plans (part 2)]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopoliy: Tekhnika zheleznykh dorog* [Bulletin of the Institute for Natural Monopoly Problems: Railway Engineering]. 2019, Iss. 1(45), pp. 90–96. (In Russian)

5. Shirinkin A. V. Tsifrovoy gruzovoy vagon [Digital freight car]. *Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont: sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii AO "VNIIZhT", Shcherbinka, 26–27 avgusta 2021 goda* [Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon: collection of materials from the scientific and practical conference of JSC VNIIZhT, Shcherbinka, August 26–27, 2021]. Shcherbinka: AO "VNIIZhT" Publ., 2021, pp. 214–216. (In Russian)
6. Shirinkin A. V., Shamray A. A. Umnyy vagon — eto real'nost' [Smart car is a reality]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2019, Iss. 10, p. 77. (In Russian)
7. Neumoin V. A. Tsifrovoy gruzovoy vagon — metody i sposoby realizatsii proekta [Digital freight car — methods and ways of project implementation]. *Aktual'nye problemy sovremennogo transporta* [Actual problems of modern transport]. 2023, Iss. 4(14), pp. 31–40. (In Russian)
8. Toropova A. A., Pichugina A. A., Rachek S. V. Osobennosti realizatsii tsifrovogo vagona v sovremennykh usloviyakh transportnoy industrii [Features of the implementation of a digital car in the modern conditions of the transport industry]. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science]. 2023, vol. 4, Iss. 11(68), pp. 674–678. Available at: <https://www.vestnik-nauki.rf/article/11145> (accessed: November 18, 2024). (In Russian)
9. Stoyanova N. V. Sredstva diagnostiki uzlov i detaley netyagovogo podvizhnogo sostava [Diagnostic tools for units and parts of non-traction rolling stock]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo ("Transport-2021"): trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Voronezh, 19–21 aprelya 2021 goda* [Transport: science, education, production ("Transport-2021"): proceedings of the international scientific and practical conference, Voronezh, April 19–21, 2021]. Voronezh: Filial federal'nogo gosudarstvennogo byudzhetnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya "Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya" v g. Voronezh Publ., 2021, pp. 226–228. (In Russian)
10. Antipov V. I., Kolosov P. B., Lyanoy V. V. et al. *Ustroystvo monitoringa i diagnostiki gruzovogo vagona* [Device for monitoring and diagnosing a freight car]. Patent RF, no. 2745168, 2021. (In Russian)
11. Shamray A. A., Shirinkin A. V., Ralovets S. A. et al. *Uzel krepleniya elektricheskogo generatora na buksovyy uzel ili ramu telezhki gruzovogo vagona (varianty)* [Mounting unit for an electric generator on the axle box assembly or bogie frame of a freight car (variants)]. Patent RF, no. 2778174, 2022. (In Russian)
12. Zimakova M. V., Tret'yakov A. V., Solin D. N. et al. Ispytaniya i diagnostika gruzovykh vagonov: problemy, resheniya, zadachi [Testing and diagnostics of freight cars: problems, solutions, tasks]. *Zheleznodorozhnyy podvizhnyy sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy Tret'ey Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Tashkent, 17–20 aprelya 2024 goda* [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: materials of the Third International scientific and technical conference, Tashkent, April 17–20, 2024]. Tashkent: Tashkentskiy gosudarstvennyy transportnyy universitet Publ., 2024, pp. 199–203. (In Russian)
13. Zimakova M. V., Tret'yakov A. V., Korshunov V. S. Telezhka dlya gruzovogo podvizhnogo sostava s osevoy nagruzkoj 25 TS [Bogie for freight rolling stock with an axle load of 25 TS]. *Zheleznodorozhnyy podvizhnyy sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy Vtoroy*

Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Tashkent, 19–22 aprelya 2023 goda [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: materials of the Second International scientific and technical conference, Tashkent, April 19–22, 2023]. Tashkent: Tashkentskiy gosudarstvennyy transportnyy universitet Publ., 2023, pp. 176–182. (In Russian)

14. Zimakova M. V., Shamray A. A., Belgorodtseva T. M. Rezul'taty khodovykh ispytaniy gruzovogo vagona s ustroystvom monitoringa na telezhkakh 18-9891 [Results of running tests of a freight car with a monitoring device on bogies 18-9891]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy KhVI Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 12–15 iyulya 2022 goda* [Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects: materials of the XVI International scientific and technical conference, St. Petersburg, July 12–15, 2022]. Saint Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2022, pp. 37–40. (In Russian)

Received: January 13, 2025

Accepted: February 13, 2025

Author's information:

Dmitry N. SOLIN — Postgraduate Student of the Department “Wagons and Carriage Industry”¹; Test Engineer²; dmitri.solin@yandex.ru

Artyom A. SHAMRAY — Technical Director; shamray_a@ratorm.ru

Denis V. DANILENKO — Director of Innovation Development; denis.danilenko@rmrail.ru

УДК 656.21.001.2

Распределение локомотивов по железнодорожному узлу с помощью внедрения интеллектуальных систем планирования

С. Б. Сатторов, Ш. У. Саидивалиев, Р. Ш. Бозоров

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан, 100069, Ташкент, ул. Темирийулчилар, 1

Для цитирования: Сатторов С. Б., Саидивалиев Ш. У., Бозоров Р. Ш. Распределение локомотивов по железнодорожному узлу с помощью внедрения интеллектуальных систем планирования // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 62–71. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-62-71

Аннотация

Цель: Рациональное использование локомотивов на железнодорожном узле для минимизации затрат, времени простоя и максимизации производительности, оптимизации работы локомотивного парка. В статье рассматривается математическая модель оптимизации оборота локомотивов, позволяющая найти баланс между доходами и затратами на эксплуатацию и обслуживание локомотивов. **Методы:** Оптимизация работы локомотивного парка рассматривается с методами линейного программирования и теории расписаний. **Результаты:** Было установлено, что минимизация времени простоя локомотивов и их максимальная загрузка требуют точного планирования маневровой работы и своевременного перемещения локомотивов на нужные участки. Для обеспечения баланса между маневровой работой и поездной работой важно правильно распределять локомотивы. Своевременная подача локомотивов к поездам для отправки требует координации действий диспетчеров. Приводит к минимизации времени, которое локомотивы проводят в ожидании новой работы, и максимизации времени в эксплуатации. **Практическая значимость:** Результаты работы имеют значение для эффективного управления эксплуатацией локомотивов на железнодорожном транспорте, что делает его более привлекательным для грузоотправителей и пассажиров.

Ключевые слова: Локомотивы, распределение, узлы, планирование, логистика, эффективность, прогнозирование, подвижной состав, управление, инфраструктура.

В условиях рыночной экономики железнодорожный транспорт сталкивается с необходимостью конкурировать с другими видами транспорта — автомобильным, воздушным и водным. Эффективное управление эксплуатацией локомотивов позволяет минимизировать затраты на перевозку, улучшить скорость и точность доставки, что делает его более привлекательным для грузоотправителей и пассажиров. В условиях растущего спроса на перевозки эффективное управление локомотивами позволяет увеличить количество поездов, проходящих через железнодорожные узлы и магистрали. Это, в свою очередь, способствует росту грузооборота и пассажиропотока, что положительно сказывается на развитии экономики [1–3].

Одной из основных проблем является недостаточное количество локомотивов или их высокий уровень износа, что приводит к перебоям в движении и увеличению времени на маневры. Старение парка локомотивов также вызывает рост эксплуатационных затрат и снижает надежность перевозок. Неправильное

планирование распределения локомотивов по направлениям и задачам на узле может привести к простоям подвижного состава, перегруженности отдельных участков и созданию узких мест в транспортной цепи. В больших узлах с высокой интенсивностью движения нередко возникают задержки в поездных операциях. Несогласованность между диспетчерами и машинистами, а также другие организационные проблемы могут увеличивать время на доставку грузов, что отрицательно влияет на общую эффективность узла [3–5].

На железной дороге для решения путей улучшения использования локомотивного парка, а также условий труда и отдыха локомотивных бригад используется автоматизированная система управления эксплуатацией локомотивов [6, 7]. Она значительно упрощает и оптимизирует управление эксплуатацией локомотивов и бригад, улучшая условия труда, сокращая издержки и повышая безопасность. Однако при этом она требует значительных вложений, качественной IT-инфраструктуры и гибкости в управлении, особенно в нестандартных ситуациях.

Основные задачи оптимизации распределения локомотивов:

1. Минимизация времени простоя локомотивов и их максимальная загрузка, что позволяет уменьшить эксплуатационные расходы и повысить производительность узла. Это требует точного планирования маневровой работы и своевременного перемещения локомотивов на нужные участки.

2. Обеспечение баланса между маневровой работой, связанной с формированием и расформированием составов, и поездной работой. Для этого важно правильно распределять локомотивы между этими операциями, чтобы избежать простоев на маневрах и обеспечить бесперебойное движение поездов по магистральным маршрутам.

3. Своевременная подача локомотивов к поездам для отправки. Это требует координации действий диспетчеров, которые управляют движением и расстановкой локомотивов, чтобы минимизировать время ожидания локомотива для загрузки или отправки.

4. Эффективный оборот локомотивов. Это включает минимизацию времени, которое локомотивы проводят в ожидании новой работы, и максимизацию времени в эксплуатации.

Рациональное использование локомотивов на железнодорожном узле для минимизации затрат, времени простоя и максимизации производительности, оптимизации работы локомотивного парка рассматривается с методами линейного программирования и теории расписаний. Рассмотрим основные переменные и параметры, влияющие на задачу рационального использования локомотивов:

Переменные:

L_i — количество локомотивов, выделенных для маршрута i ;

T_{ij} — время в пути локомотива i на маршруте j ;

P_i — производительность локомотива i (измеряется в тонно-километрах);

C_i — затраты на эксплуатацию локомотива i (включая топливо, техническое обслуживание и амортизацию);

D_i — время простоя локомотива i ;

v_i — скорость локомотива i .

Минимизировать общие затраты на эксплуатацию локомотивов при обеспечении требуемого объема перевозок и минимизации простоев:

$$\sum_{i=1}^n (C_i \cdot L_i + \alpha \cdot D_i) \rightarrow \min,$$

где α — весовой коэффициент, определяющий влияние времени простоя на общие затраты;

n — общее количество локомотивов.

Ограничения:

1. Каждый маршрут должен быть обслужен таким количеством локомотивов, чтобы суммарная производительность удовлетворяла потребности в перевозках:

$$\sum_{i=1}^n P_i L_i \geq P_{\min},$$

где P_{\min} — минимальная требуемая производительность для обеспечения грузооборота на узле.

2. Время движения по маршруту и время простоя локомотивов не должно превышать установленного лимита, чтобы обеспечить выполнение расписания:

$$T_{ij} + D_i \leq T_{\max},$$

где T_{\max} — максимально допустимое время на маршрут и простои.

3. Количество локомотивов, задействованных на узле, ограничено наличием парка:

$$\sum_{i=1}^n L_i \leq L_{\text{об}},$$

где $L_{\text{об}}$ — общее количество локомотивов на узле.

4. Скорость локомотивов должна соответствовать допустимым значениям для различных маршрутов:

$$v_i \geq v_{\min},$$

где v_{\min} — минимальная допустимая скорость.

Для решения данной задачи можно использовать такие методы оптимизации, как:

– линейное программирование (Simplex метод);

– модели сетевого планирования (алгоритмы потока на сети);

– генетические алгоритмы для поиска глобального оптимума при сложных системах ограничений.

Чтобы устранить ограниченность горизонта планирования и повысить точность расчетов, далее можно интегрировать линейное программирование с динамическим и нелинейным программированием, машинным обучением и имитационным моделированием. Такой гибридный подход даст возможность адаптировать планы под меняющиеся условия, делать точные прогнозы и учитывать стохастические колебания спроса и состояния путей, а также повысит устойчивость и точность решений.

Синхронизация маневровой и поездной работы на железнодорожном узле является важной задачей для обеспечения эффективного и бесперебойного движения поездов, оптимизации использования путей и локомотивов, а также минимизации простоев. Для решения этой задачи можно использовать модели теории расписаний и оптимизации, которые включают в себя учет ограничений по времени, ресурсам и пропускной способности.

Основные переменные и параметры:

M_i — количество маневровых операций i ;

T_{mi} — время выполнения маневровой операции i ;

N_i — количество поездных операций i ;

T_{ni} — время выполнения поездной операции i ;

R_m — ресурсы (например, локомотивы, пути) для выполнения маневровых операций;

R_n — ресурсы для выполнения поездных операций;

C_i — пропускная способность узла;

τ_i — время ожидания перед началом операции i .

Минимизировать время простоя локомотивов и вагонов на узле, а также общее время выполнения маневровых и поездных операций при учете ограничений по ресурсам и пропускной способности:

$$\sum_{i=1}^n (T_{mi} + \tau_{mi} + T_{ni} + \tau_{ni}) \rightarrow \min,$$

где τ_{mi} и τ_{ni} — время ожидания выполнения маневровых и поездных операций соответственно.

Ограничения:

1. Одновременно можно задействовать ограниченное количество ресурсов для выполнения маневровых и поездных операций, и они не должны конфликтовать:

$$\sum_{i=1}^n R_m M_i + \sum_{i=1}^n R_n N_i \leq R_{об},$$

где $R_{об}$ — общее количество доступных ресурсов (например, количество локомотивов или путей).

2. Пропускная способность узла ограничивает количество маневровых и поездных операций, которые могут быть выполнены одновременно:

$$\sum_{i=1}^n (M_i + N_i) \leq C_i,$$

где C_i — максимальное количество операций, которое может быть выполнено на узле в единицу времени.

3. Время выполнения операций должно быть согласовано, чтобы избежать конфликтов и простоев:

$$T_{mi} + \tau_{mi} \leq T_{ni} + \tau_{ni},$$

где T_{mi} — время выполнения маневровой операции, а T_{ni} — время выполнения поездной операции.

4. Операции должны быть выполнены в соответствии с графиком прибытия и отправления поездов:

$$T_{mi} \geq S_{mi}, \quad T_{ni} \geq S_{ni},$$

где S_{mi} и S_{ni} — запланированное время для выполнения маневровых и магистральных операций.

Решение может быть найдено с помощью линейного программирования, учитывающего все ограничения и зависимости между операциями.

Своевременная подача локомотивов на железнодорожном узле — это важная задача для обеспечения бесперебойного движения составов и оптимизации грузооборота. Она включает в себя координацию подачи локомотивов к поездам для выполнения маневровых и поездных операций с минимальными задержками. Для данной задачи можно использовать модели теории расписаний и методы оптимизации.

Основные переменные и параметры:

L_i — локомотив i ;

T_{di} — время подачи локомотива L_i на место отправления;

T_{si} — запланированное время подачи локомотива L_i ;

W_i — весовая функция опоздания или ожидания локомотива i ;

D_i — задержка подачи локомотива i (разница между фактическим и запланированным временем);

P_i — время простоя локомотива i перед назначенной задачей;

C_i — эксплуатационные затраты на работу локомотива i ;

R_i — производительность локомотива i (в тонно-километрах).

Минимизировать задержку подачи локомотивов и эксплуатационные затраты при обеспечении своевременной подачи к запланированным операциям:

$$\sum_{i=1}^n (W_i D_i + C_i) \rightarrow \min,$$

где $D_i = \max(0, T_{di} - T_{si})$ — задержка подачи локомотива, если T_{di} превышает запланированное время подачи T_{si} .

Ограничения:

1. Локомотивы должны быть доступны для подачи в указанные временные интервалы:

$$T_{di} \geq T_{дост\ i},$$

где $T_{дост\ i}$ — время, когда локомотив i становится доступен для выполнения задачи.

2. Общее количество локомотивов, задействованных в конкретный момент времени, не должно превышать доступное количество локомотивов на узле:

$$\sum_{i=1}^n L_i \leq L_{об},$$

где $L_{об}$ — общее количество доступных локомотивов на узле.

3. Время простоя локомотивов до подачи должно быть минимизировано:

$$P_i \leq P_{\max},$$

где P_{\max} — максимально допустимое время простоя перед операцией.

4. Локомотивы должны подаваться к поездам в соответствии с графиком отправления, с минимальными отклонениями:

$$T_{di} \leq T_{si} + \epsilon,$$

где ϵ — допустимая задержка подачи локомотива.

С помощью линейного программирования можно найти оптимальные моменты подачи локомотивов T_{di} , которые удовлетворяют всем ограничениям и минимизируют затраты и задержки.

Оптимизация оборота локомотивов на железнодорожном узле — это задача, направленная на минимизацию простоев, сокращение затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также улучшение общей эффективности использования локомотивного парка. Для этой задачи можно использовать методы линейного программирования и теории расписаний.

Основные параметры и переменные:

L_i — локомотив i ;

$T_{об\ i}$ — время оборота локомотива i (время от начала одной поездки до возвращения для следующей);

$T_{техоб\ i}$ — время, необходимое для технического обслуживания локомотива i ;

$T_{прос\ i}$ — время простоя локомотива i между рейсами;

C_i — эксплуатационные затраты на локомотив i за один оборот;

n_i — количество оборотов локомотива i за период;

R_i — доход, полученный за оборот локомотива i ;

N — общее количество доступных локомотивов на узле.

Цель состоит в том, чтобы минимизировать общие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также минимизировать время простоя, при этом обеспечивая максимальный оборот локомотивов:

$$\sum_{i=1}^N (R_i n_i) - \sum_{i=1}^N (C_i + T_{\text{обс}i}) \rightarrow \max,$$

где R_i — доход от использования локомотива;

C_i — эксплуатационные затраты;

$T_{\text{обс}i}$ — время на обслуживание.

Ограничения:

1. Время оборота локомотива включает время на поездку, техническое обслуживание и возможные простои:

$$T_{\text{об}i} = T_{\text{ход}i} + T_{\text{техобс}i} + T_{\text{прос}i},$$

где $T_{\text{ход}i}$ — время поездки локомотива i .

2. Общее количество локомотивов не должно превышать доступное количество на узле:

$$\sum_{i=1}^N L_i \leq N,$$

где N — общее количество локомотивов.

3. Локомотивы должны проходить техническое обслуживание через определенные интервалы времени или после определенного количества оборотов:

$$T_{\text{техобс}i} \leq T_{\text{max техобс}},$$

где $T_{\text{max техобс}}$ — максимально допустимое время между техническими обслуживаниями.

4. Время простоя локомотива между рейсами должно быть минимизировано:

$$T_{\text{прос}i} \leq T_{\text{max прос}},$$

где $T_{\text{max прос}}$ — максимально допустимое время простоя локомотива.

5. Доход от использования локомотивов должен превышать расходы на их эксплуатацию:

$$R_i n_i \geq C_i + T_{\text{техобс}i},$$

для каждого локомотива i .

Заключение

Традиционно локомотивные плечи позволяют поддерживать регулярные графики работы локомотивов и бригад, что критично для больших расстояний и сложных маршрутов. Однако фиксированные плечи зачастую не учитывают изменяющиеся потребности в узлах, где скопление локомотивов может создать заторы или дефицит. Интеграция системы планирования с существующей моделью на основе локомотивных плеч создает гибридный подход: локомотивные плечи остаются основой, но их использование становится более гибким и эффективным. Она позволяет получать и анализировать оперативные данные для оптимизации работы локомотивного парка, улучшая распределение локомотивов и сокращая затраты.

Математическая модель оптимизации оборота локомотивов позволяет найти баланс между доходами и затратами на эксплуатацию и обслуживание, минимизировать простои и увеличить производительность локомотивного парка на железнодорожных узлах.

Таким образом, оптимизация распределения локомотивов на железнодорожном узле играет ключевую роль в повышении эффективности всей транспортной системы, улучшая работу узлов и обеспечивая бесперебойные перевозки грузов и пассажиров.

Необходимо внедрение интеллектуальных систем планирования, которые могут оптимизировать распределение локомотивов по участкам узла с учетом текущего спроса на грузовые и пассажирские перевозки, а также состояния путей и локомотивов. Эти системы позволят заранее предсказывать потребности в локомотивах и оптимизировать их использование. В следующих исследованиях будет рассматриваться разработка методики для интеграции модели с текущими системами планирования на реальном полигоне или с использованием симуляционных данных.

Список источников

1. Сатторов С. Б. Исследование способа размещения технических станций / С. Б. Сатторов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2017. — № 4. — С. 463–468.
2. Сатторов С. Б. Обоснование размещения технических станций в зависимости от числа полурейсов / С. Б. Сатторов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2018. — № 2. — С. 239–246.
3. Сатторов С. Б. Вопросы развития железнодорожной линии Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская / С. Б. Сатторов, А. Г. Котенко, В. Л. Белозеров // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — Т. 16. — № 3. — С. 439–448.
4. Ерофеев А. А. Интеллектуальная система автоматического управления технической станцией / А. А. Ерофеев // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2020: материалы Юбилейной Междунар. науч.-практ. конф. — СПб., 2020. — С. 92–96.
5. Ерофеев А. А. Принципы формирования управляющих решений в интеллектуальной системе управления перевозочным процессом / А. А. Ерофеев, А. Ф. Бородин // Проблемы

безопасности на транспорте: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. / Под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. — Гомель: БелГУТ, 2021. — С. 11–14.

6. Михеева Т. И. Модели транспортных потоков в интеллектуальных транспортных системах / Т. И. Михеева, С. В. Михеев, И. Г. Богданова // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 6. — С. 216.

7. Жанказиев С. В. Интеллектуальные транспортные системы: учеб. пособие / С.В. Жанказиев. — М.: МАДИ, 2016. — 120 с.

Дата поступления: 14.10.2024

Решение о публикации: 14.12.2024

Контактная информация:

САТТОРОВ Самандар Бахтиерович — канд. техн. наук, доц.; satorovsamandar100@gmail.com

САИДИВАЛИЕВ Шухрат Умарходжаевич — канд. техн. наук, доц.; shuxratxoja@mail.ru

БОЗОРОВ Рамазон Шамилович — канд. техн. наук; ramazon-bozorov@mail.ru

Dispatching Locomotives Across a Railway Junction Using the Intelligent Planning System

S. B. Sattorov, Sh. U. Saidivaliev, R. Sh. Bozorov

Tashkent State Transport University, 1, Temiryo'Ichilar Str., Tashkent, 100069, Republic of Uzbekistan

For citation: Sattorov S. B., Saidivaliev Sh. U., Bozorov R. Sh. Dispatching Locomotives Across a Railway Junction Using the Intelligent Planning System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 1, pp. 62–71. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-62-71

Summary

Purpose: The effective use of locomotives at a railway junction to minimize costs and downtime and maximize the locomotive fleet productivity and efficiency. This paper describes a mathematical model for optimizing locomotive turnover, which will allow finding a balance between revenues and costs of operating and servicing locomotives. **Methods:** Optimization of locomotive fleet operation is considered with the methods for linear programming and locomotive scheduling theory. **Results:** Minimizing the downtime of locomotives and their maximum loading will require accurate planning of shunting work and timely movement of locomotives to the desired sections. To ensure a balance between shunting work and train operation, it is important to allocate locomotives appropriately. Timely delivery of locomotives to trains for dispatch requires dispatchers' coordinated actions. This will lead to minimizing the locomotive downtime and maximizing the time in operation. **Practical significance:** The results of the work are important for the effective management of locomotive operation in railway transportation, which makes it more attractive for both shippers and passengers.

Keywords: Locomotives, distribution, junctions, planning, logistics, efficiency, forecasting, rolling stock, management, infrastructure.

References

1. Sattorov S. B. Issledovanie sposoba razmeshcheniya tekhnicheskikh stantsiy [Study of the method of placement of technical stations]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo*

universiteta [Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University]. 2017, Iss. 4, pp. 463–468. (In Russian)

2. Sattorov S. B. Obosnovanie razmeshcheniya tekhnicheskikh stantsiy v zavisimosti ot chisla polureysov [Justification of the placement of technical stations depending on the number of semi-trip]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University]. 2018, Iss. 2, pp. 239–246. (In Russian)

3. Sattorov S. B., Kotenko A. G., Belozarov V. L. Voprosy razvitiya zheleznodorozhnoy linii Akhangaran-Tukimachi-Syrdar'inskaya [Development issues of the Akhangaran-Tukimachi-Syrdarya railway line]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering]. 2019, vol. 16, Iss. 3, pp. 439–448. (In Russian)

4. Erofeev A. A. Intellektual'naya sistema avtomaticheskogo upravleniya tekhnicheskoy stantsiey [Intelligent automatic control system for a technical station]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2020: vaterialy Yubileynoy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Transport of Russia: Problems and Prospects — 2020: materials of the Jubilee Int. scientific-practical. conf.]. St. Petersburg, 2020, pp. 92–96. (In Russian)

5. Erofeev A. A., Borodin A. F. Printsipy formirovaniya upravlyayushchikh resheniy v intellektual'noy sisteme upravleniya perevozhnym protsessom [Principles of forming control decisions in an intelligent control system for the transportation process]. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 2 ch. Ch. 1. M-vo transp. i kommunikatsiy Resp. Belarus', Bel. zh. d., Belarus. gos. un-t transp. Pod obshch. red. Yu. I. Kulazhenko* [Problems of safety in transport: Proceedings of the XI Int. scientific-practical. conf.: in 2 parts. Part 1. Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus, Belarusian Railways, Belarusian State University of Transport. Under the general editorship of ed. Yu. I. Kulazhenko]. Gomel': BelGUT Publ., 2021, pp. 11–14. (In Russian)

6. Mikheeva T. I., Mikheev S. V., Bogdanova I. G. Modeli transportnykh potokov v intellektual'nykh transportnykh sistemakh [Models of traffic flows in intelligent transport systems]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2013, Iss. 6, p. 216. (In Russian)

7. Zhankaziev S. V. *Intellektual'nye transportnye sistemy: ucheb. posobie* [Intelligent transport systems: textbook]. Moscow: MADI Publ., 2016, 120 p. (In Russian)

Received: October 14, 2024

Accepted: December 14, 2024

Author's information:

Samandar B. SATTOROV — PhD in Engineering, Associate Professor;
sattorovsamandar100@gmail.com

Shukhrat U. SAIDIVALIEV — PhD in Engineering, Associate Professor; shukratxoja@mail.ru

Ramazon Sh. BOZOROV — PhD in Engineering; ramazon-bozorov@mail.ru

УДК 629.4.053.3

Применение фильтра низких частот для снижения влияния методической погрешности измерительного тракта в структуре системы автоматического управления скоростью

В. И. Легкая

Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Легкая В. И. Применение фильтра низких частот для снижения влияния методической погрешности измерительного тракта в структуре системы автоматического управления скоростью // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 72–87. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-72-87

Аннотация

Цель: Выбор структуры системы автоматического управления скоростью электропоезда. Оценка влияния погрешности измерения скорости на динамику процессов в тяговом приводе. Обоснование применения и выбор структуры фильтра низких частот — фильтра Баттерворта. Определение совокупности критериев качества управления скоростью движения электропоезда. Решение задачи параметрического синтеза. **Методы:** Имитационного моделирования, теории автоматического управления, оптимизации. **Результаты:** Установлено отрицательное влияние наличия погрешности измерения скорости на формирование управляющего сигнала силы тяги и, как следствие, на протекание переходного процесса в тяговом приводе. В результате решения задачи параметрического синтеза системы найдены рациональные параметры пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования закона управления. Установлена зависимость изменения значений параметров закона управления от порядка фильтра Баттерворта. Выявлено, что с увеличением порядка фильтра требуется увеличивать его частоту среза. Установлено, что включение фильтра Баттерворта в структуру системы автоматического управления скоростью обеспечивает сглаживание высокочастотных составляющих в сигнале измеренной скорости. **Практическая значимость:** Разработана структура системы автоматического управления скоростью, учитывающая наличие методической погрешности измерительного устройства (импульсного датчика скорости). Полученные результаты моделирования показывают эффективность применения устройств фильтрации в структуре систем управления.

Ключевые слова: Система автоматического управления, фильтр Баттерворта, качество управления, имитационное моделирование, параметрический синтез.

В настоящее время происходит активное совершенствование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) контроля и управления движением поездов. Применение автоматизации в процессах управления обосновано высокими требованиями, предъявляемыми к обеспечению безопасности движения и соблюдению точного выполнения планового графика движения. Система автоматического управления (САУ) скоростью является одной из подсистем ИТС, представляет собой внутренний контур, подчиненный по отношению к контуру регулирования времени хода в системе автоматического ведения поездов (САВП) на уровнях автоматизации (УА1–УА4) и реализует заданные САВП режимы движения [1, 2].

Модель системы автоматического управления скоростью

Разработана математическая модель САУ скоростью электропоезда, отличающаяся от существующих тем, что учитывает наличие методической погрешности измерения в тракте измерения скорости и обладает переменной в зависимости от режима движения структурой закона управления [3]. Функциональная схема предлагаемой САУ приведена на рис. 1.

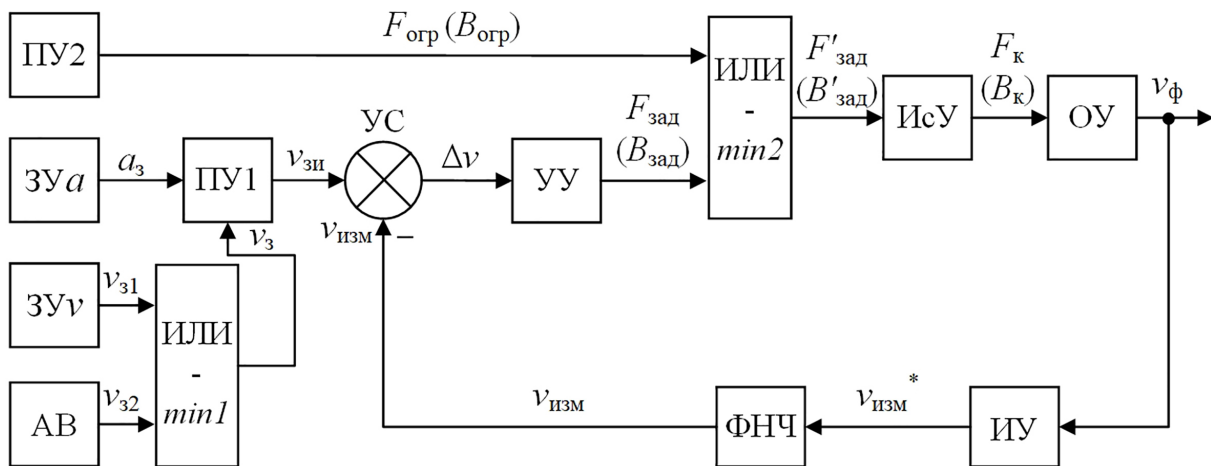


Рис. 1. Функциональная схема САУ скоростью электропоезда

В качестве объекта управления ОУ принята многомассовая модель электропоезда, движение каждого экипажа которой описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка [4]. В качестве модели межвагонной связи использована модель резинометаллического поглощающего аппарата в сочетании с беззазорным сцепным устройством. Измерительное устройство ИУ представляет собой импульсный датчик скорости с частотно-импульсной модуляцией сигнала; модель измерительного тракта будет подробно рассмотрена далее. Фильтр нижних частот ФНЧ, на вход которого поступает сигнал $v_{изм}^*$, обладающий погрешностью измерения, представляет собой фильтр Баттерворта 5-го порядка, необходимость и выбор параметров которого будут обоснованы в следующих разделах. Устройство сравнения УС реализует вычисление рассогласования Δv между отфильтрованным значением скорости $v_{изм}$ и значением $v_{зи}$, поступающим с выхода устройства ПУ1. Данное устройство реализует плавное изменение поступающего с ИЛИ-min1 минимального значения скорости $v_з$ из двух заданных: с контроллера машиниста ЗУв в виде сигнала $v_{з1}$ и контура регулирования времени хода системы автоведения АВ в виде сигнала $v_{з2}$. Характер изменения величины $v_з$ определяется темпом a_3 , заданным устройством задания ускорения ЗУа. Вычисленное рассогласование Δv поступает на вход устройства управления УУ, представляющее собой регулятор скорости, функционирующий согласно пропорционально-интегральному с прогнозом рассогласования закону управления с переменной структурой [5, 6]:

$$F_{\text{зад}}[nT] = k_1 \Delta v[nT] + \frac{1}{k_2} \sum_{i=0}^n \Delta v_i T + k_3 f_3[nT], \quad (1)$$

где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты при соответствующих частях закона управления;

$$f_3[nT] = \sum_{i=0}^M \Delta v[(n - M + i)T] L_i^{\text{э,кв,л}} \text{ — прогнозируемая в момент времени } t = nT$$

величина рассогласования $\Delta v[(n + 1)T]$;

M — количество отсчетов, используемых экстраполятором при работе.

Выбор модификации закона управления осуществляется следующим образом: до момента начала выполнения условия $v_{\text{изм}} \geq (v_3 - 2)$ км/ч или $v_{\text{изм}} \leq (v_3 + 2)$ км/ч, что соответствует переходным режимам — разгону и торможению, используется пропорциональный (П) закон. Выполнение величиной $v_{\text{изм}}$ вышеприведенных условий соответствует переходу в режим стабилизации, вследствие чего происходит переключение П-закона управления на пропорционально-интегральный (ПИ) с прогнозом рассогласования (Э) закон управления. Выходным сигналом УУ является величина заданной силы тяги $F_{\text{зад}}$ или торможения $B_{\text{зад}}$. Устройство ИЛИ-min2 определяет минимальный сигнал $F'_{\text{зад}}$ ($B'_{\text{зад}}$) из двух поступающих на его вход: $F_{\text{зад}}$ ($B_{\text{зад}}$) с устройства управления и $F_{\text{огр}}$ ($B_{\text{огр}}$), являющихся сигналом об ограничениях, введенных на тяговые и тормозные характеристики и запрограммируемых в промежуточном устройстве ПУ2. В дальнейшем с выхода ИЛИ-min2 сигнал о заданной силе тяги (торможения) поступает на вход исполнительного устройства ИСУ, математическая модель которого соответствует реализации тягового привода электропоезда и описана как апериодическое звено с постоянной времени $T_{\text{т.э.п.}} = 1,28$ с, выбранной согласно [7].

Модель измерительного устройства

Модель измерительного тракта САУ скоростью существенно влияет на показатели качества управления. В качестве измерительного устройства выбран датчик скорости с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ). Процесс определения цифрового эквивалента скорости движения заключается в подсчете вырабатываемых устройством импульсов за эталонный интервал времени, что соответствует способу преобразования частота-цифра № 1 согласно классификации [8].

Каждый из способов, приведенных в [8], характеризуется степенью его точности измерения, что определяет качество регулирования скорости. В данной работе выбор реализуемого измерительным устройством способа преобразования обоснован наихудшим значением показателя точности по причине наличия наибольшей методической погрешности измерения, возникшей из-за несовпадения

моментов начала и окончания эталонного временного интервала T импульсами счетной последовательности, а также учета только целого числа этих импульсов N в течение интервала T (рис. 2).

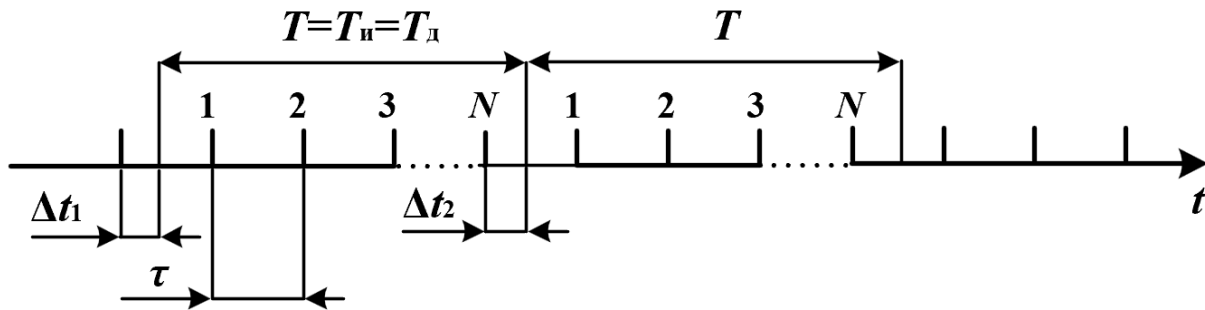


Рис. 2. Преобразование частотно-импульсного сигнала в цифровой эквивалент скорости движения

На рис. 2 использованы следующие обозначения:

Δt_1 — промежуток времени между фронтом временного интервала и предельным моментом времени, когда нулевой импульс уже не фиксируется счетным устройством;

Δt_2 — промежуток времени между спадом временного интервала и предельным моментом времени, когда импульс N еще фиксируется счетным устройством;

T_n — время измерения;

T_d — шаг временной дискретизации;

τ — временной интервал между импульсами.

При использовании принятого метода измерения цифровой эквивалент скорости определяется следующим образом:

$$v_{и} = \frac{s_0 N}{T}, \tag{2}$$

где $v_{и}$ — измеренное значение скорости;

s_0 — расстояние, соответствующее длине дуги окружности поверхности катания колеса, которое проходит электропоезд за время между двумя импульсами N .

Величина абсолютной методической погрешности $\Delta v_{м}$ метода измерения равна:

$$\Delta v_{м} = (\delta_2 - \delta_1) \frac{s_0}{T}, \tag{3}$$

где $\delta_1 = \frac{\Delta t_1}{\tau} = \frac{\Delta t_1 v}{s_0}$, при этом $0 \leq \delta_1 \leq 1$;

$$\delta_2 = \frac{\Delta t_2}{\tau} = \frac{\Delta t_2 v}{s_0}, \text{ при этом } 0 \leq \delta_2 \leq 1.$$

Таким образом, значение измеренной скорости с учетом методической погрешности $v_{\text{изм}}^*$:

$$v_{\text{изм}}^* = v_{\text{и}} + \Delta v_{\text{м}}. \quad (4)$$

Наибольшее абсолютное значение величины методической погрешности соответствует величине шага квантования по уровню при принятом методе преобразования скорости в цифровой эквивалент [8] и составляет:

$$\Delta v_{\text{м max}} = q = \frac{2\pi R}{z T_{\text{и}}} = 2,47 \text{ км/ч}, \quad (5)$$

где R — радиус бандажа колесной пары по кругу катания, $R = 0,46$ м;
 z — число импульсов, вырабатываемых за один оборот колеса, $z = 42$;
 $T_{\text{и}}$ — шаг временной дискретизации, $T_{\text{и}} = 0,1$ с.

В качестве закона, по которому распределяется $\Delta v_{\text{м}}$ в заданном диапазоне, согласно [8] принят треугольный закон распределения. Функция плотности распределения случайной величины $\Delta v_{\text{м}}$, описывающая соответствующее треугольное распределение, представлена в виде:

$$P(\Delta v_{\text{м}}) = \begin{cases} \frac{2}{q - |-q|} \cdot \frac{\Delta v_{\text{м}} - |-q|}{0 - |-q|}, & \text{если } -q \leq \Delta v_{\text{м}} \leq 0; \\ \frac{2}{q - |-q|} \cdot \frac{q - \Delta v_{\text{м}}}{q - 0}, & \text{если } 0 < \Delta v_{\text{м}} \leq q. \end{cases} \quad (6)$$

В данной работе для моделирования такого распределения использован метод обратных функций [9]. На первом этапе генерируется случайное число r , распределенное по равномерному закону в интервале $[0, 1]$: $r \in [0, 1]$. На втором этапе выполняется преобразование равномерно распределенной случайной величины в случайную величину, распределенную по треугольному закону. Данное преобразование выполняется с использованием следующей системы уравнений:

$$F^{-1}(r) = \begin{cases} a + \sqrt{r(m-a)(b-a)}, & \text{если } 0 \leq r \leq \frac{m-a}{b-a}, \\ b - \sqrt{(1-r)(b-m)(b-a)}, & \text{если } \frac{m-a}{b-a} \leq r \leq 1, \end{cases} \quad (7)$$

где $a = -q$ — величина, равная минимальному значению принятой погрешности;
 $b = q$ — величина, равная максимальному значению принятой погрешности;
 $m = 0$.

Результат пробного моделирования величины методической погрешности измерения скорости на интервале времени, равном $t = 50$ с, приведен на рис. 3. Как видно, рассчитанные значения величины погрешности Δv_M находятся в диапазоне от 2,47 км/ч до $-2,47$ км/ч в соответствии с заданной плотностью треугольного распределения (рис. 4).

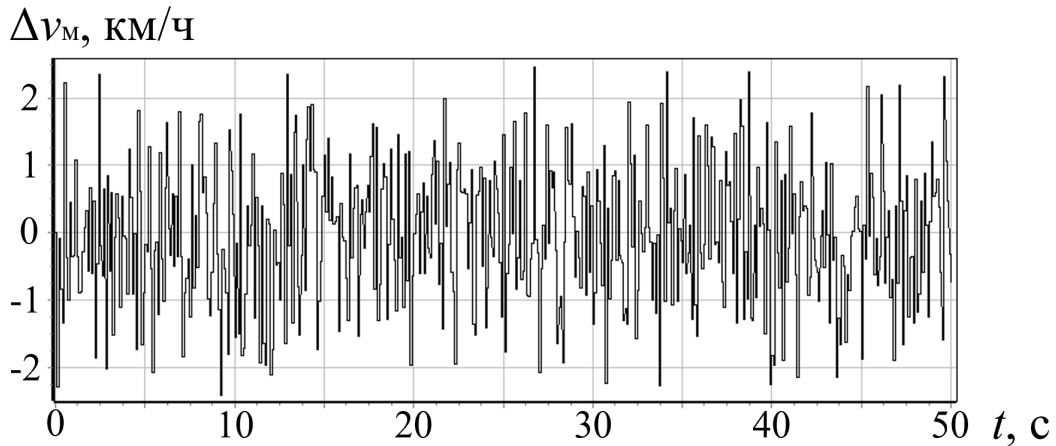


Рис. 3. Результат моделирования методической погрешности измерения

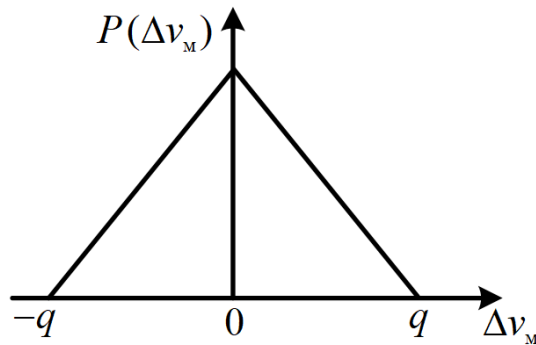


Рис. 4. График плотности распределения вероятности случайной величины погрешности по треугольному закону

Описанный выше способ преобразования скорости движения в числовой эквивалент реализован в тракте измерения, структурная схема модели которого представлена на рис. 5. Представленная модель реализует операции усреднения скорости за период дискретизации, квантования по уровню и временной дискретизации и, как было отмечено ранее, учитывает наличие Δv_M [8].

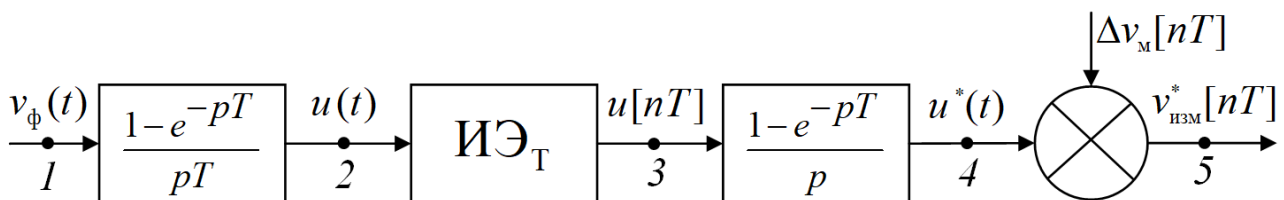


Рис. 5. Структурная схема канала измерения скорости

Звено между точками 1 и 2 реализует операцию усреднения входного сигнала, в качестве которого принимается текущая фактическая скорость движения поезда $v_{\phi}(t)$:

$$u(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_{t-T_{\text{и}}}^t v_{\phi}(t) \Delta t. \quad (8)$$

Звено между точками 2 и 3 является идеальным импульсным элементом, функцией которого является преобразование сигнала $u(t)$ в решетчатую функцию $u(t_i)$:

$$u(t_i) = u[nT] = u(t) \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT). \quad (9)$$

Звено между точками 3 и 4 выполняет операцию восстановления, доопределяя последовательность $u[nT]$ в промежутке времени $nT \leq t \leq (n+1)T$. Далее происходит наложение на сигнал $u^*(t)$ случайной величины $\Delta v_M(t)$, являющейся методической статической погрешностью. Величина цифрового сигнала $v_{\text{изм}}^*[nT]$ на выходе измерительного тракта соответствует выражению:

$$v_{\text{изм}}^*[nT] = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} v_{\phi}(t) dt + \Delta v_M[nT], \quad (10)$$

где t — текущее время.

Результаты имитационного моделирования работы САУ скоростью без фильтра в структуре

Проведено пробное имитационное моделирование работы САУ скоростью без фильтра в структуре при принятой модели измерительного тракта. Используемый в качестве ОУ электропоезд-прототип представляет собой 5-вагонный электропоезд ЭС1 общей массой 268 т. В качестве реализуемых режимов движения электропоезда по площадке выбраны следующие: разгон до $v_3 = 50$ км/ч с дальнейшей стабилизацией на заданном уровне. Время моделирования составляет $t = 70$ с. Выбор соответствующих режимов движения по площадке обоснован проведением исследования влияния выбранной структуры измерительного тракта на качество процесса управления, исключая при этом возможные внешние возмущения со стороны изменчивого профиля пути.

В качестве значений коэффициентов принятого пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования закона управления использованы значения, полученные при выполнении пробных расчетов и составляющие $k_1 = 67\,000$, $k_2 = 0,005$, $k_3 = 28\,000$, при этом количество отсчетов экстраполятора составило $M = 25$. Полученные в ходе моделирования зависимости от времени $v_{\text{зи}}(t)$, $v_{\phi}(t)$, $v_{\text{изм}}(t)$, $F_{\text{зад}}(t)$, $F_{\text{к}}(t)$ приведены на рис. 6, а–в.

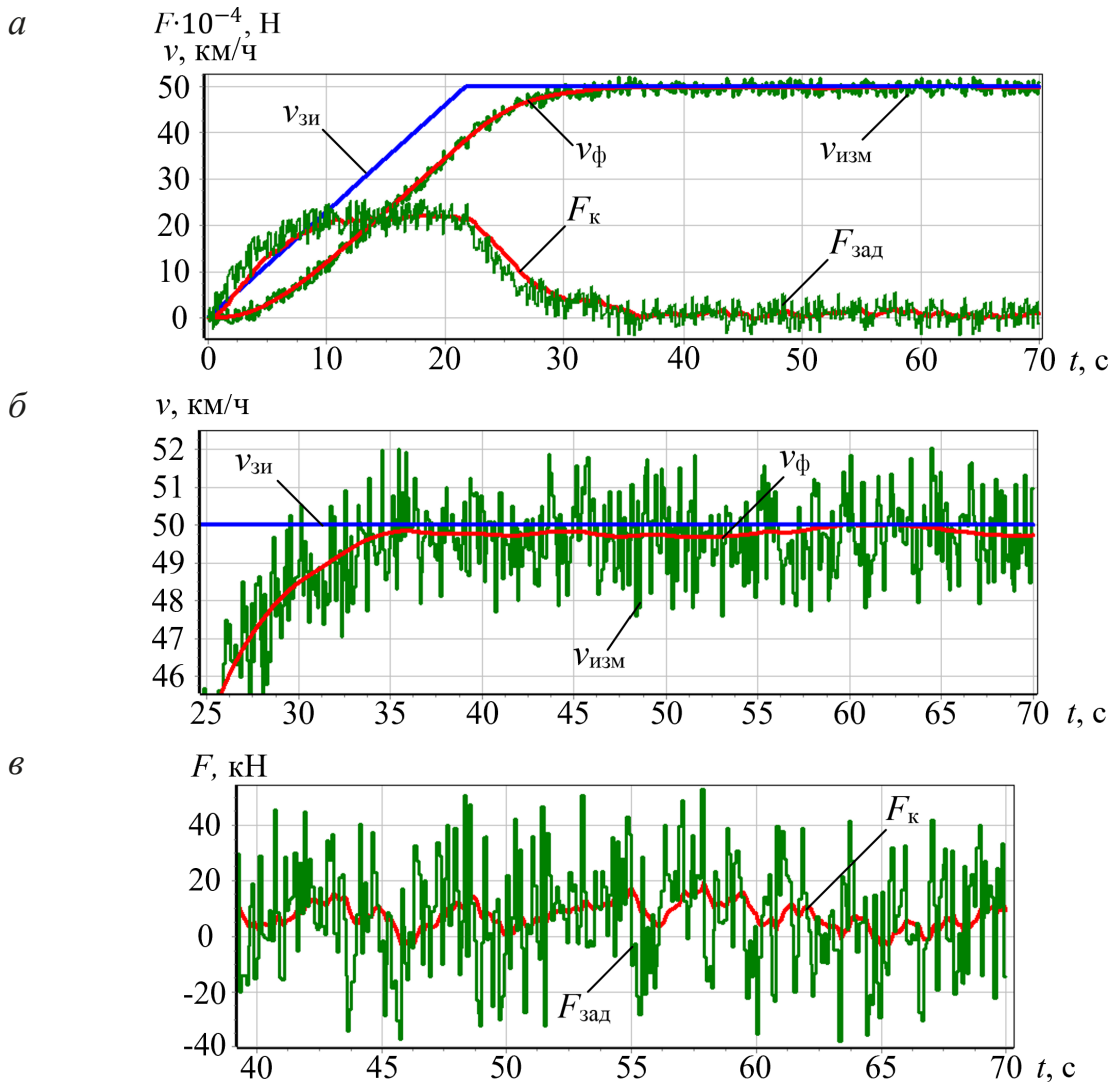


Рис. 6. Результаты моделирования работы САУ скоростью без фильтра: зависимости скоростей $v_{зи}$, $v_{изм}$, $v_{ф}$, сил тяги $F_{зад}$, $F_{к}$ от времени на интервале 0–70 с (а); зависимости скоростей $v_{зи}$, $v_{изм}$, $v_{ф}$ от времени на интервале 25–70 с (б); зависимости сил тяги $F_{зад}$, $F_{к}$ от времени на интервале 40–70 с (в)

В начале моделирования происходит разгон электропоезда, характеризующийся увеличением силы тяги и, как следствие, скорости движения. Согласно режиму движения САУ реализует пропорциональный закон управления. В момент времени 26,9 с впервые выполняется условие $v_{изм} \geq (v_3 - 2)$ км/ч, вследствие чего САУ переходит в режим стабилизации скорости, при этом происходит изменение закона управления САУ с пропорционального на пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования. Как видно, при этом заданная сила тяги $F_{зад}$ на входе тягового привода характеризуется скачкообразными знакопеременными колебаниями с наибольшей амплитудой 53 кН и скоростью изменения $\approx 15\,801$ кН/с. Хотя тяговый привод обладает значительной инерционностью и сглаживает поступающий от устройства управления сигнал $F_{зад}$, вследствие чего зависимость $F_{к}(t)$ имеет значительно меньшую частоту и амплитуду колебаний

с наибольшей амплитудой ≈ 19 кН и скоростью изменения фактической силы тяги $\approx 27,5$ кН/с, подобное знакопеременное колебательное изменение заданного и фактического значений силы тяги является недопустимым по условиям работы тягового привода. Необходимо отметить, что причиной описанного выше изменения величин $F_{\text{зад}}$ и $F_{\text{к}}$ является аддитивная помеха в сигнале измеренной скорости. При движении в режиме стабилизации фактическая скорость поддерживается на уровне заданного значения 50 км/ч, максимальное абсолютное отклонение которой составляет 0,33 км/ч.

Фильтр нижних частот Баттерворта

Улучшение протекания переходного процесса в контуре управления тяговым приводом возможно осуществить при минимизации аддитивной помехи, обусловленной методической погрешностью измерительного тракта. С этой целью в структуру САУ скоростью включен фильтр нижних частот (ФНЧ), расположенный между измерительным устройством ИУ и устройством сравнения УС, обеспечивающий фильтрацию величины измеренной скорости. В качестве ФНЧ выбран фильтр Баттерворта [10], отвечающий требованиям к виду его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), в том числе на полосах пропускания и подавления. Переходная полоса АЧХ фильтра (при частотах выше частоты среза ω_c) характеризуется монотонностью убывания со скоростью $20 \cdot n$ дБ/дек, определяемой порядком фильтра n .

Передаточная функция фильтра Баттерворта представлена как:

$$H(s) = \frac{b_0}{A(s)} = \frac{\omega_c^n}{A(s)}, \quad (11)$$

где n — порядок фильтра;

ω_c — частота среза, Гц;

$A(s)$ — характеристический полином n -го порядка.

Основными параметрами фильтра Баттерворта являются порядок n , обеспечивающий необходимую крутизну его АЧХ, и частота среза ω_c , выше которой происходит фильтрация сигнала от высокочастотных составляющих. Полином фильтра описывается как сочетание определенного количества, зависящего от порядка фильтра последовательно соединенных инерционных звеньев первого и второго порядков. Приведенные в [11] выражения полиномов являются нормализованными по частоте среза, равной $\omega_{\text{ср.н}} = 1$ Гц, поэтому для исследования эффективности применения ФНЧ в структуре САУ при различных ζ необходимо применить операцию денормирования, заключающуюся в замене в используемом полиноме фильтра комплексной переменной s на $\frac{s}{\omega_{\text{ср}}}$:

$$H(s) = A \left(\frac{s}{\omega_{\text{cp}}} \right), \quad (12)$$

где $\omega_{\text{cp}} = \omega_c$ — заданная частота среза ненормированного фильтра.

Критерии качества управления и задача параметрической оптимизации

Система автоматического управления скоростью должна удовлетворять ряду требований. К таким требованиям относятся требования к обеспечению устойчивости системы и требования к качеству процесса управления как в переходных, так и в установившемся режимах. Качество процесса управления скоростью оценивается следующей совокупностью критериев [12]: перерегулирование σ , максимальная допустимая величина которого по условиям соблюдения безопасности движения не должна превышать $[\sigma] = 1$ км/ч; время протекания переходного процесса $t_{\text{рег}}$; величина квадратичной интегральной ошибки в установившемся режиме $I_{2\text{уст}}$. Перед включением ФНЧ в структуру САУ необходимо определиться со значениями параметров закона управления k_1, k_2, k_3, M , а также n и ω_c , при которых обеспечивается удовлетворительное качество регулирования скорости за счет фильтрации шума. Кроме этого, необходимо оценить влияние наличия фильтра различных порядков в структуре САУ на значения параметров ее закона управления k_1, k_2, k_3, M .

Для поиска рациональных параметров $k_1, k_2, k_3, M, \omega_c$ при 2–7 порядках фильтра необходимо решить задачу параметрической оптимизации системы. Принятые показатели качества предъявляют различные требования к САУ скоростью (к значениям параметров ее закона управления). Для нахождения параметров САУ, обеспечивающих удовлетворительные значения всех показателей качества, при решении поставленной задачи оптимизации использована целевая функция свертки Π , описывающая условие компромисса между установленными показателями:

$$\Pi = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{U_i - U_i^*}{U_i^{**} - U_i^*} \right\}^2}, \quad (13)$$

где U_i^* — минимальное значение i -го критерия ($i = 1, 2, \dots, m$), являющееся результатом расчета однокритериальной оптимизации по данному i -му критерию;

U_i^{**} — максимальное или допустимое значение i -го критерия.

Рациональным значениям параметров соответствует минимальное значение целевой функции Π . Для нахождения ее минимума использован метод оптимизации Нелдера — Мида [13].

Результаты имитационного моделирования работы САУ скоростью с фильтром в структуре

В ходе параметрического синтеза системы реализовано моделирование разгона электропоезда на площадке до 50 км/ч с дальнейшей стабилизацией скорости на подъеме 12 ‰, определены значения параметров k_1 , k_2 , k_3 , M , ω_c , обеспечивающие требуемый компромисс между принятыми критериями качества. Наилучшие сочетания параметров, а также значения показателей качества, полученные в результате проведения моделирования работы САУ скоростью при заданных вначале экспериментальных условиях, при каждом из порядков ФНЧ приведены в таблице.

Параметры и показатели САУ с фильтром Баттерворта 2–7 порядков

n	Параметры					Показатели		
	k_1	k_2	k_3	M	ω_c	$t_{\text{рег}}$	σ	$I_{2\text{уст}}$
2	61295	0,0000793	40639	14	5,87690	29,549	0,344	0,246
3	68017	0,0000758	33379	18	5,90357	27,135	0,190	0,171
4	61004	0,0001381	13600	19	6,02314	27,415	0,168	0,165
5	54992	0,0001123	17915	51	6,40479	28,275	0,245	0,169
6	53138	0,0001110	15851	51	6,25567	27,885	0,268	0,202
7	48400	0,0001150	8900	85	6,46805	28,835	0,275	0,246

Как видно из полученных результатов, изменение порядка фильтра n в структуре САУ оказывает влияние на параметры закона управления. Так, с увеличением порядка фильтра n : происходит уменьшение значения k_1 с 61 295 (при $n = 2$) до 48 400 (при $n = 7$), при этом значение k_2 остается практически неизменным; количество отсчетов экстраполятора M увеличивается со значения 14 до 85; значение параметра k_3 при прогнозной части уменьшается с 40 639 (при $n = 2$) до 8900 (при $n = 7$). Также отметим увеличение значения частоты среза фильтра ω_c с возрастанием его порядка.

В ходе проведенного анализа установлено, что для обеспечения удовлетворительного качества регулирования скорости за счет более эффективного процесса фильтрации следует придерживаться закономерности, заключающейся в увеличении значения используемой ω_c в соответствии с увеличением n .

В результате решения задачи параметрического синтеза системы при каждом из порядков фильтра n найдены рациональные значения параметров закона управления, обеспечивающие допустимые значения показателей качества $t_{\text{рег}}$, σ , $I_{2\text{уст}}$ (таблица), при этом основным различием полученных результатов моделирования работы САУ при n фильтра от 2-го до 7-го является характер изменения величины $v_{\text{изм}}$ и, как следствие, $F_{\text{зад}}$ на входе тягового привода. При меньших порядках фильтра (например, при $n = 2$) величина $F_{\text{зад}}$ характеризуется

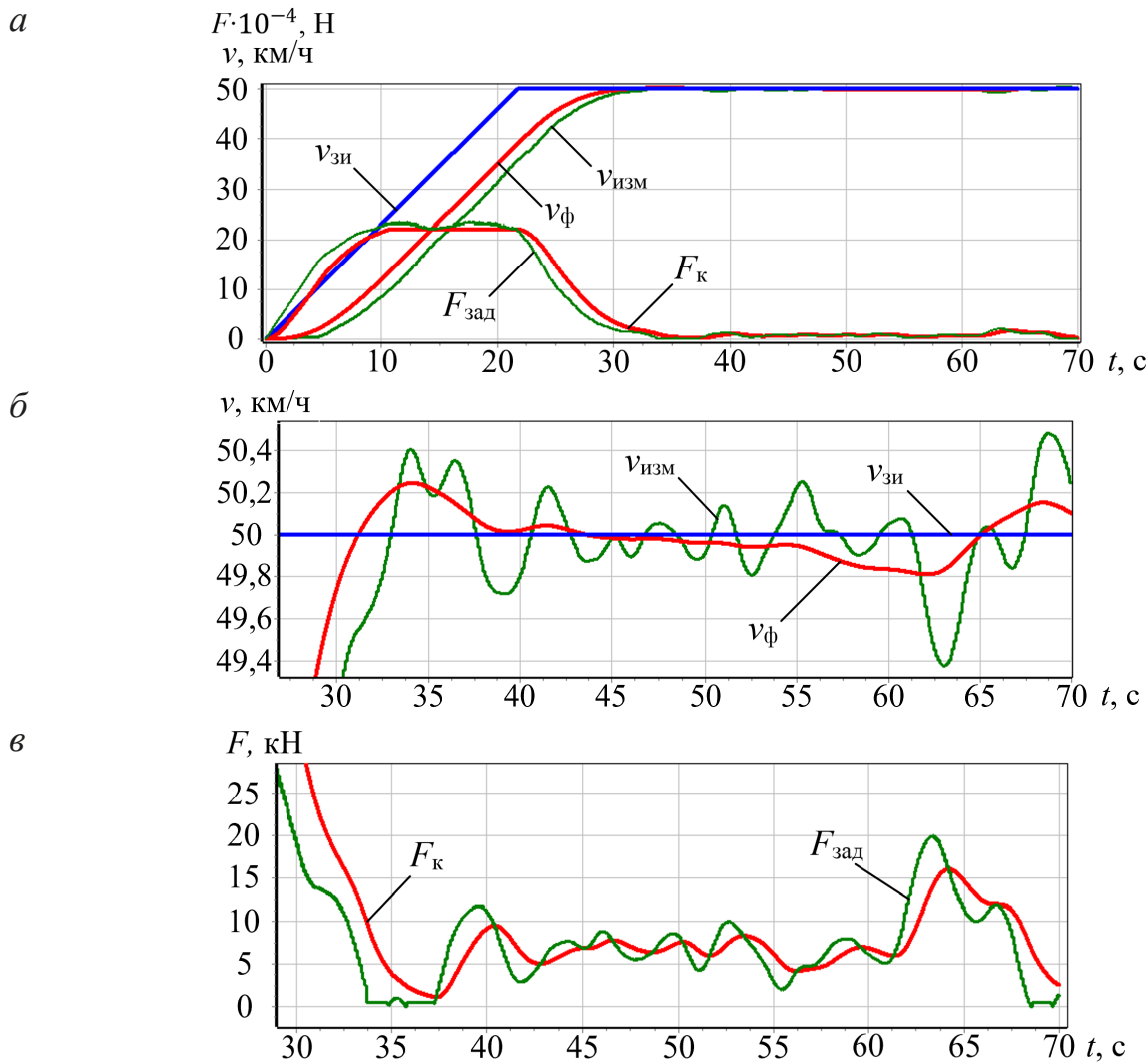


Рис. 7. Результаты моделирования работы САУ скоростью с фильтром 5 порядка: зависимости скоростей $v_{зи}$, $v_{изм}$, v_{ϕ} , сил тяги $F_{зад}$, $F_{к}$ от времени на интервале 0–70 с (а); зависимости скоростей $v_{зи}$, $v_{изм}$, v_{ϕ} от времени на интервале 30–70 с (б); зависимости сил тяги $F_{зад}$, $F_{к}$ от времени на интервале 30–70 с (в)

знакопеременным изменением с амплитудой $\approx 34,7$ кН и скоростью изменения $\approx 635,4$ кН/с, а $F_{к}$ — амплитудой $\approx 24,8$ кН и скоростью изменения $\approx 5,5$ кН/с. При больших порядках (например, при $n = 7$) в режиме стабилизации заданная сила тяги характеризуется постоянством поддержания требуемого значения $F_{зад} > 0$, амплитудой ≈ 22 кН и скоростью изменения $\approx 124,8$ кН/с; амплитуда $F_{к}$ составила $\approx 20,8$ кН, скорость изменения $\approx 3,3$ кН/с. Для предлагаемой структуры САУ скоростью в качестве устройства, уменьшающего влияние погрешности измерения на сигнал измеренной скорости, выбран фильтр нижних частот Баттерворта 5-го порядка как оптимальный среди рассмотренных для решения поставленных задач регулирования.

На рис. 7, а–в приведены результаты моделирования при параметрах

$k_1 = 54\,992$, $k_2 = 0,0001123$, $k_3 = 17\,915$, $M = 51$, $\omega_c = 6,40479$ Гц, соответствующих $n = 5$. Показатели качества составили: $\sigma = 0,245$ км/ч, $t_{\text{рег}} = 28,275$ с, $I_{2\text{уст}} = 0,169$. Использование фильтра Баттерворта сглаживает высокочастотные колебания. Вследствие этого изменился вид кривой $F_{\text{зад}}(t)$ на входе тягового привода, характеризующейся амплитудой ≈ 20 кН и скоростью изменения $\approx 195,4$ кН/с. Фактическая сила тяги F_k в режиме стабилизации поддерживается на уровне $\approx 7,5$ кН, при этом амплитуда составляет $\approx 16,3$ кН, а скорость изменения $F_k \approx 4,6$ кН/с.

Заключение

При моделировании работы САУ скоростью учтена методическая погрешность измерительного тракта с частотно-импульсной модуляцией. Выявлено ухудшение характера изменения управляющего сигнала силы тяги, поступающего на вход тягового привода, из-за наличия аддитивной помехи, обусловленной методической погрешностью измерителя скорости. Для уменьшения влияния аддитивной помехи на качество процесса управления необходимо дополнить структуру САУ скоростью фильтром Баттерворта 5-го порядка, установленным между выходом тракта измерения скорости и входом устройства сравнения. Применение фильтра нижних частот позволяет минимизировать влияние методической погрешности измерителя скорости и улучшить характер протекания переходных процессов в тяговом электроприводе, снизив динамическое воздействие на элементы тяговой передачи. В процессе решения задачи параметрического синтеза системы установлены зависимости значений параметров закона управления САУ от порядка фильтра Баттерворта. Найденные параметры обеспечивают требуемое качество управления как переходных, так и установившихся режимов работы.

Список источников

1. ГОСТ Р 70059—2022. Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозок пассажиров в пригородном сообщении: принципы построения и основные функциональные требования. — М.: Российский институт стандартизации, 2022.
2. Баранов Л. А. Принципы построения и модели системы автоматического управления вторым локомотивом при виртуальной сцепке / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина и др. // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8 — № 4. — С. 377–388.
3. Баранов Л. А. Система автоматического управления скоростью пригородного электропоезда / Л. А. Баранов, В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков // Электротехника. — 2024. — № 9. — С. 81–88.
4. Блохин Е. П. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер и др. — М.: Транспорт, 1986. — 263 с.

5. Баранов Л. А. Влияние прогноза рассогласования на качество управления в замкнутых автоматических системах / Л. А. Баранов, О. Е. Пудовиков, Е. П. Балакина // *Электротехника*. — 2022. — № 9. — С. 8–15.
6. Легкая В. И. Система автоматического управления скоростью с адаптацией к изменению режима движения электропоезда / В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков // *Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта: сборник трудов международной научно-практической конференции*. — Екатеринбург: УрГУПС, 2024. — С. 79–83.
7. Баранов Л. А. Модели и методы синтеза микропроцессорных систем управления скоростью электроподвижного состава с непрерывным управлением тягой / Л. А. Баранов // *Вестник МИИТ*. — 2004. — № 10.
8. Баранов Л. А. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев и др. — М.: Транспорт, 1990. — 272 с.
9. Kotz S. *Beyond Beta: Other Continuous Families of Distributions With Bounded Support And Applications* / S. Kotz, J. R. V. Dorp // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. — 2004.
10. Вадутов О. С. *Электроника. Математические основы обработки сигналов: учебник и практикум для вузов* / О. С. Вадутов. — М.: Юрайт, 2022. — 307 с.
11. Лэм Г. *Аналоговые и цифровые фильтры. Пер. с англ.* / Г. Лэм. — М.: Мир, 1982. — 589 с.
12. Баранов Л. А. *Автоматизированные системы управления электроподвижным составом: учебник: в 3 ч. Ч. 1: Теория автоматического управления* / Л. А. Баранов, А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. — 400 с.
13. Химмельблау Д. *Прикладное нелинейное программирование. Пер. с англ.* / Д. Химмельблау. — М.: Мир, 1975. — 534 с.

Дата поступления: 25.11.2024

Решение о публикации: 14.02.2025

Контактная информация:

ЛЕГКАЯ Валерия Игоревна — аспирант; tiger.rut@yandex.ru

Application of a Low-Pass Filter to Reduce the Influence of Measurement Path Errors in the Automatic Speed Control System

V. I. Legkaya

Russian University of Transport (MIIT), 9, bld. 9, Obratsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Legkaya V. I. Application of a Low-Pass Filter to Reduce the Influence of Measurement Path Errors in the Automatic Speed Control System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 72–87. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-72-87

Summary

Purpose: To select an automatic speed control system of an electric train. To estimate the speed measurement error effects on the traction drive dynamics. To justify the selection and application of the low-pass filter, particularly Butterworth filter. To determine a set of quality criteria for an electric train speed control. To solve the problem of parametric synthesis of automatic speed control system. **Methods:** Simulation modelling, automatic control theory, optimizations. **Results:** Negative influence of speed measurement errors on the formation of the traction force control signal and, consequently, on the transient process in the traction drive has been established. As a result of solving the problem of the system parametric synthesis, proportional-integral rational parameters with mismatch prediction of control law have been determined. The dependence of the value change of the control law parameters on the Butterworth filter order has been established. It has been revealed that with increasing the filter order it is required to increase its cut-off frequency. The inclusion of the Butterworth filter in the structure of the automatic speed control system has been proved to provide smoothing of high-frequency components in the measured speed signal. **Practical significance:** The structure of the automatic speed control system has been developed taking into account the presence of method error of the measuring device (pulse speed sensor). The simulation results obtained have shown the filters' efficiency in the control system.

Keywords: Automatic control system, Butterworth filter, control quality, simulation modelling, parametric synthesis.

References

1. GOST R 70059—2022. *Sistemy upravleniya i kontrolya zheleznodorozhnogo transporta dlya perevozki passazhirov v prigorodnom soobshchenii: printsipy postroyeniya i osnovnyye funktsional'nyye trebovaniya* [GOST R 70059—2022. Rail transport control and monitoring systems for suburban passenger transportation: design principles and basic functional requirements]. Moscow: Vserossiyskiy institut standartizatsii Publ., 2022. (In Russian)
2. Baranov L. A., Bestem'yanov P. F., Balakina E. P. et al. Printsipy postroyeniya i modeli sistemy avtomaticheskogo upravleniya vtorym lokomotivom pri virtual'noy stsepke [Design principles and models of an automatic control system for the second locomotive with a virtual coupling]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2022, vol. 8, Iss. 4, pp. 377–388. (In Russian)
3. Baranov L. A., Legkaya V. I., Pudovikov O. E. Sistema avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu prigorodnogo elektropoyezda [Automatic speed control system for a suburban electric train]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2024, Iss. 9, pp. 81–88. (In Russian)

4. Blokhin E. P., Manashkin L. A., Stambler E. L. et al. *Raschety i ispytaniya tyazheloves-nykh poyezdov* [Calculations and testing of heavy trains]. Moscow: Transport Publ., 1986, 263 p. (In Russian)
5. Baranov L. A., Pudovikov O. E., Balakina E. P. Vliyaniye prognoza rassoglasovaniya na kachestvo upravleniya v zamknutykh avtomaticheskikh sistemakh [Influence of the mismatch forecast on the quality of control in closed automatic systems]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2022, Iss. 9, pp. 8–15. (In Russian)
6. Legkaya V. I., Pudovikov O. E. Sistema avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu s adaptatsiyey k izmeneniyu rezhima dvizheniya elektropoyezda [Automatic speed control system with adaptation to changes in the driving mode of an electric train]. *Issledovaniye i razvitiye rel'sovogo i avtomobil'nogo transporta: sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Research and development of rail and road transport: collection of papers of the international scientific and practical conference]. Yekaterinburg: UrGUPS Publ., 2024, pp. 79–83. (In Russian)
7. Baranov L. A. Modeli i metody sinteza mikroprotsessornykh sistem upravleniya skorost'yu elektropodvizhnogo sostava s nepreryvnyim upravleniyem tyagoy [Models and methods for synthesizing microprocessor-based speed control systems for electric rolling stock with continuous traction control]. *Vestnik MIIT* [MIIT Bulletin]. 2004, Iss. 10. (In Russian)
8. Baranov L. A., Golovicher Y. M., Yerofeyev E. V. et al. *Mikroprotses-sornyye sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava* [Microprocessor-based automatic control systems for electric rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1990, 272 p. (In Russian)
9. Kotz S., Dorp J. R. V. *Beyond Beta: Other Continuous Families of Distributions With Bounded Support And Applications*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2004.
10. Vadutov O. S. *Elektronika. Matematicheskiye osnovy obrabotki signalov: uchebnik i praktikum dlya vuzov* [Electronics. Mathematical foundations of signal processing: textbook and practical training for universities]. Moscow: Yurayt Publ., 2022, 307 p. (In Russian)
11. Lem G. *Analogovyye i tsifrovyye fil'try. Per. s angl.* [Analog and digital filters. Translated from English]. Moscow: Mir Publ., 1982, 589 p. (In Russian)
12. Baranov L. A., Savos'kin A. N., Pudovikov O. E. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya elektropodvizhnym sostavom: uchebnik: v 3 ch. CH. 1: Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automated control systems for electric rolling stock: textbook: in 3 parts. Part 1: Theory of automatic control]. Moscow: FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2013, 400 p. (In Russian)
13. Khimmel'blau D. *Prikladnoye nelineynoye programmirovaniye. Per. s angl.* [Applied nonlinear programming. Translated from English]. Moscow: Mir Publ., 1975, 534 p. (In Russian)

Received: November 25, 2024

Accepted: February 02, 2025

Author's information:

Valeria I. LEGKAYA — Postgraduate Student; tiger.rut@yandex.ru

УДК 621.331

Исследование модели ездового цикла электровоза с экспериментальным накопителем электроэнергии в процессе маневровых работ

С. Ф. Алеков¹, А. С. Куликов¹, Т. В. Голубчик², М. А. Иванов³

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский просп., 64

²Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

³ООО «Центр перспективных технологий ТМХ», Российская Федерация, 121205, Москва, ул. Нобеля (инновационного центра Сколково Тер), эт. 3, пом. 28, раб. 1

Для цитирования: Алеков С. Ф., Куликов А. С., Голубчик Т. В., Иванов М. А. Исследование модели ездового цикла электровоза с экспериментальным накопителем электроэнергии в процессе маневровых работ // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 88–105. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-88-105

Аннотация

В настоящее время наблюдается активный переход на электрифицированные транспортные средства, обусловленный снижением стоимости энергии и ростом плотности химических источников тока. В железнодорожной отрасли это проявляется в электрификации подвижного состава, особенно для работ на вокзалах и в депо, где использование дизелей ограничено экологическими факторами. Кроме того, электровозы могут функционировать на неэлектрифицированных участках железнодорожных путей, что открывает новые перспективы для устойчивого развития транспортной инфраструктуры. **Цель:** Исследование технических параметров и энергетических характеристик накопителя электроэнергии (НЭ) для эффективного применения в составе электровозов. **Методы:** В данной статье рассмотрены ключевые вопросы энергетики ездовых циклов движения и актуальности применения накопителя электроэнергии в составе электровоза. Показано сравнение полученных экспериментальных данных с расчетными. **Результаты:** Приведена модель ездового цикла аккумуляторного локомотива, основанная на расчете времени эксплуатационной работы дизель-генераторной установки (ДГУ) традиционного дизельного локомотива. Представлены экспериментальные данные работы накопителя энергии (НЭ) в составе электровоза, а также результаты анализа полученных данных. Выявлены необходимые технические параметры НЭ, которые обеспечивают эффективное функционирование электровоза в рамках суточного цикла работы на железнодорожном вокзале. **Практическая значимость:** Проведенные исследования дают представление об энергетических параметрах и режимах работы контактно-аккумуляторного маневрового локомотива в течение рабочего дня. Позволяют определить параметры НЭ, такие как мощности заряда и разряда, средние и максимальные значения расхода энергии. Исследования могут привести к созданию более эффективных механизмов накопления и использования электроэнергии, что позволит снизить эксплуатационные затраты электровозов и повысить их энергетическую эффективность. Практическое исследование накопителей электроэнергии может быть полезно не только для железнодорожного транспорта, но и для других областей, где необходимы эффективные системы энергосбережения.

Ключевые слова: Накопитель электроэнергии, электровоз, ездовые циклы, литий-ионный аккумулятор, железнодорожный транспорт.

Введение

Дизельные маневровые локомотивы, которые используются сегодня, обладают обширным спектром мощностей. Однако интересно отметить, что максимальная мощность задействуется лишь в 5–10 % случаев в течение всего времени эксплуатации. Для достижения этой максимальной мощности необходима специализированная силовая установка, которая чаще всего функционирует на уровне мощностей ниже максимальных, менее эффективных. Такое оборудование, рассчитанное на пиковые нагрузки, неизбежно ведет к увеличению стоимости локомотива. Применение накопителей электроэнергии (НЭ) позволяет значительно уменьшить требования к мощности первичного источника энергии, что, в свою очередь, может снизить затраты на силовую установку и обеспечить более стабильную ее работу, способствуя повышению эффективности использования энергии [1].

С развитием электрификации всей транспортной системы встал вопрос о перспективе работы гибридных контактно-аккумуляторных локомотивов. Исследования по созданию локомотивов с системами аккумулирования энергии, проведенные как в России, так и за рубежом, демонстрируют перспективы уменьшения потребления топлива на уровне 40–60 % в сравнении с маневровыми локомотивами, работающими по традиционной схеме. Кроме того, применение таких технологий может привести к сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу на 80–90 % [2, 3].

Существенный интерес такой разработки в первую очередь обусловлен снижением стоимости серийно выпускаемых литий-ионных аккумуляторов, прогнозируемое изменение стоимости кВт · ч аккумуляторов представлено на рис. 1 [4–7].

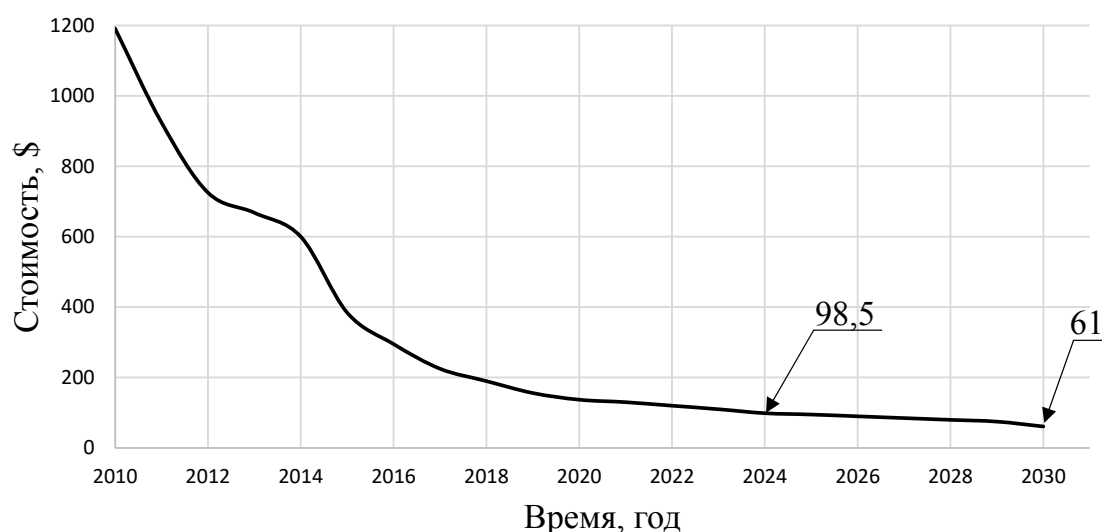


Рис. 1. Изменение цены и прогнозная стоимость литий-ионных аккумуляторов за кВт · ч

Дальнейшее снижение стоимости элементов окажет весомое влияние на экономические показатели и доступность их применения в системах накопления электроэнергии. В свою очередь, техническое усовершенствование НЭ способствует увеличению дальности хода и улучшению динамических характеристик электрических транспортных средств.

В процессе разработки НЭ для транспортных средств цена на системы хранения энергии долгое время оставалась одним из основных сдерживающих факторов. Однако не менее значимым ограничением была и невозможность создания накопителей с высокой емкостью.

Ситуация начала меняться с появлением литиевых аккумуляторов, а особенно с разработкой безопасных литий-железо-фосфатных (LFP) аккумуляторных ячеек. Эти новые технологии отвечают требованиям безопасности для транспортных средств [8–11], что стало основополагающим для создания НЭ.

Использование таких перевозимых источников энергии находит применение в различных областях техники [12–14], одним из примеров являются электровозы, где высокая емкость и безопасность аккумуляторов играют ключевую роль в обеспечении эффективной работы [15–17].

Для оценки эффективности применения накопителей электроэнергии в конструкции электровоза с целью выполнения маневровых работ критически важно иметь точное понимание режимов работы и реальных условий эксплуатации существующих локомотивов.

Конструкция и режимы работы накопителя электроэнергии

Экспериментальный накопитель электроэнергии состоит из батарейных модулей (БМ), системы управления накопителем энергии (СУНЭ), системы контроля и управления накопителем электроэнергии (СКУНЭ), системы термостатирования, оборудования коммутации и защиты.

Накопитель энергии предназначен для аккумуляции электрической энергии, получаемой от преобразователя при питании маневрового электровоза от контактной сети постоянного тока с номинальным напряжением 3000 В или от стационарного зарядного устройства локомотивного депо. При этом НЭ обеспечивает передачу запасенной электроэнергии в тяговую систему и питание преобразователя собственных нужд при движении электровоза по неэлектрифицированным железнодорожным участкам. Состоит из двух секций, в каждой из которых находятся 28 ед. БМ. Количество аккумуляторных ячеек в БМ — 18 шт. [18]. В конструкции применены аккумуляторные элементы электрохимии LiFePO_4 , что обусловлено их преимуществами [19, 20].

Основные технические характеристики НЭ:

– номинальная емкость 288 А · ч:

- номинальное напряжение 870 В;
- кратность тока разряда 2С;
- ток заряда 1С.

Суточный цикл движения (модель ездового цикла) определяет требования к временным показателям в процессе эксплуатации для конкретных режимов работы. Рассмотрим его на примере расчета времени эксплуатационной работы ДГУ тепловоза [21, 22].

Различают 3 режима работы локомотива: резервный, когда к локомотиву не присоединен состав; режим тяги; режим простоя.

Тепловозы выполняют маневровую работу по станции: перемещение вагонов из парка отстоя до станции и наоборот — для формирования поездов или их разделения. Потребность маневровых локомотивов — 2 единицы круглосуточно, соответственно, для обеспечения указанных режимов работа локомотива с НЭ должна совпадать с работой дизельного локомотива. При этом заряд НЭ возможен между всеми циклами разряда в моменты простоя. Режимы работы определены как режим тяги и выбега в одну сторону (РТВ1), когда локомотив тянет состав только в парк отстоя или на вокзал. Режим тяги и выбега в 2 стороны (РТВ2), когда локомотив тянет состав в оба направления. И режим резерва (РР), когда локомотив не переставляет составы. На основе времени и сценариев работы рассчитаны максимальные и среднесуточные циклы разряда НЭ (потребности электровоза в электроэнергии), которые представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Модель ездового цикла электровоза на базе работы ДГУ тепловоза

№	Режим	Максимальные суточные циклы разряда НЭ, кВт · ч	Среднесуточные циклы разряда НЭ, кВт · ч
1	РТВ1	114	89
2	РТВ1	114	89
3	РТВ1	114	113
4	РТВ1	114	89
5	РТВ2	145	114
6	РР	50	39
7	РР	50	39
8	РТВ2	145	114
9	РР	50	39
	Суммарный суточный расход	926	726

В расчетах модели ездового цикла [22] время работы дизельного локомотива составляет в среднем 1260 мин, в зависимости от сценария. Простой составляет 180 мин, за это время можно обеспечить заряд НЭ. Максимальное необходимое время для полного заряда накопителя на величину полезной энергоемкости НЭ $200 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ должно быть не более 50 мин.

Программный комплекс управления режимами разряда и заряда выполняется под управлением операционной системы Linux x Debian 10.x с версией ядра 4.14.78. Программный комплекс написан на языке C++ с применением стандарта C++11. С помощью СУ НЭ были получены данные для последующего исследования.

Исследование экспериментальных данных

В соответствии с разработанным ездовым циклом производились испытания электровоза с НЭ, в результате были получены экспериментальные данные режимов работы НЭ электровоза в процессе маневровых работ. На рис. 2 и 3 представлены графики токов заряда и разряда НЭ соответственно.

Полученный максимальный ток заряда — 157 А, при этом максимальный ток разряда НЭ — 288 А. Можно констатировать, что в разработанном рабочем цикле ток заряда является оптимальным и предотвращает быстрое деградирование аккумулярующих элементов НЭ [23, 24].

Максимальный разрядный ток составил 239 А, что в два раза ниже номинального разрядного тока аккумуляторных элементов, входящих в состав НЭ, имеющих оптимальную разрядную характеристику.

На рис. 4 представлено изменение напряжения НЭ в процессе проведения испытаний, а на рис. 5 — напряжение на аккумуляторной ячейке в момент разряда в интервале от 10 300 до 10 500 с.

Минимальное напряжение на ячейке 3,09 В указывает на максимальную глубину разряда НЭ — 80 % в процессе испытаний на 10 500 с (около 3 ч эксплуатации), что позволяет сделать вывод о граничной емкости аккумуляторной батареи. Это демонстрирует соблюдение баланса оптимального веса на единицу энергоемкости и отсутствие резерва. Также присутствует опасность глубокого разряда НЭ, при которой аккумуляторные ячейки быстро деградируют [25–27].

По расчетам ездового цикла и рис. 2–4 следует, что максимальное нахождение локомотива в режиме движения резервом (без состава) составляет 21 мин период времени с 4499 по 5766 с.

На рис. 6 представлен график энергоемкости, затраченной за промежуток времени в режиме тяги, как видно из графика общая затраченная электроэнергия за исследуемый цикл разряда составляет $22 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ за 21 мин тяги.

На рис. 7, 8 и 9 соответственно представлен ток разряда, напряжение НЭ и минимальное напряжение аккумуляторной ячейки для исследуемой области.

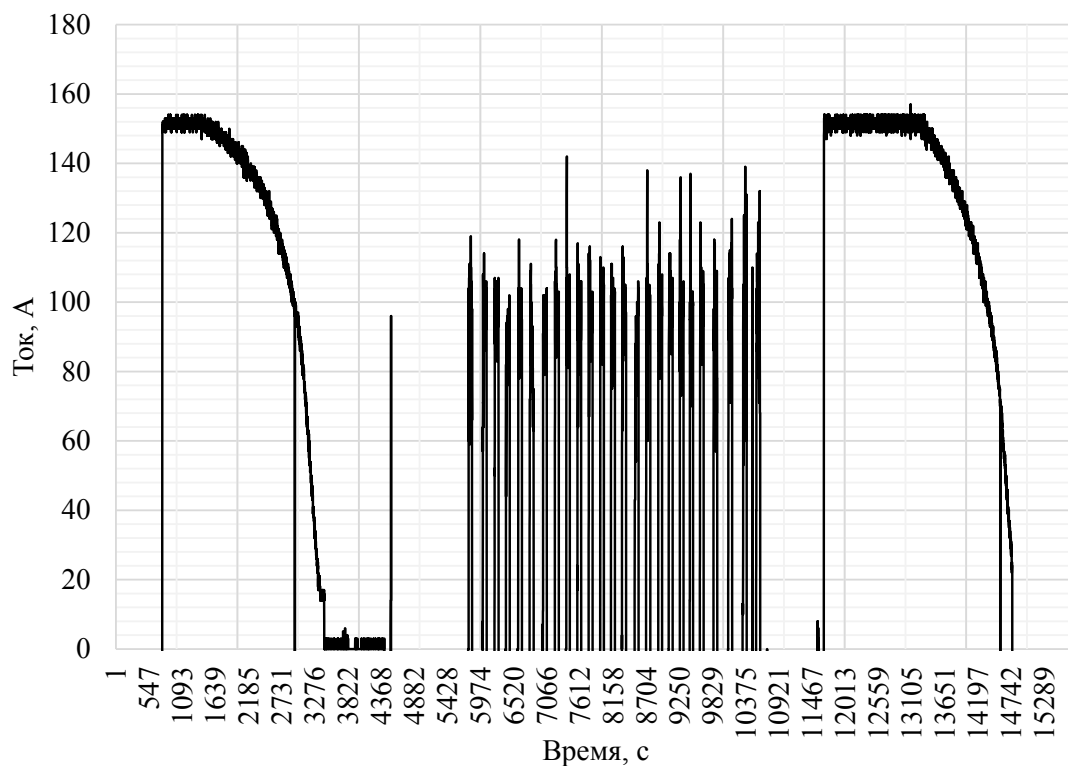


Рис. 2. Параметры заряда накопителя электроэнергии

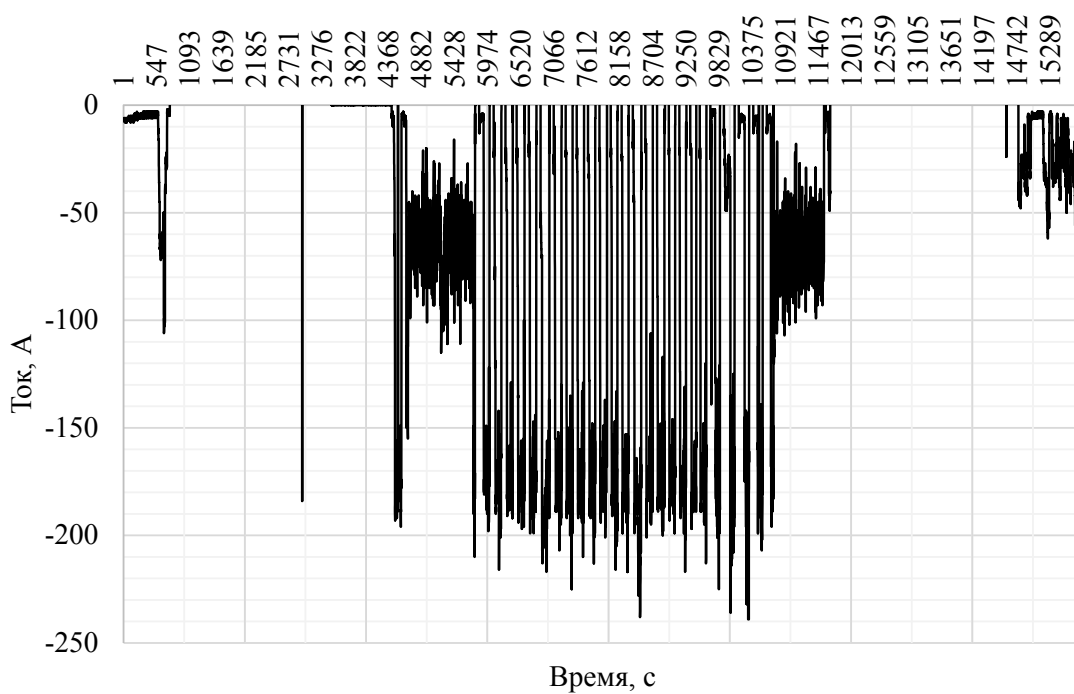


Рис. 3. Параметры разряда накопителя электроэнергии

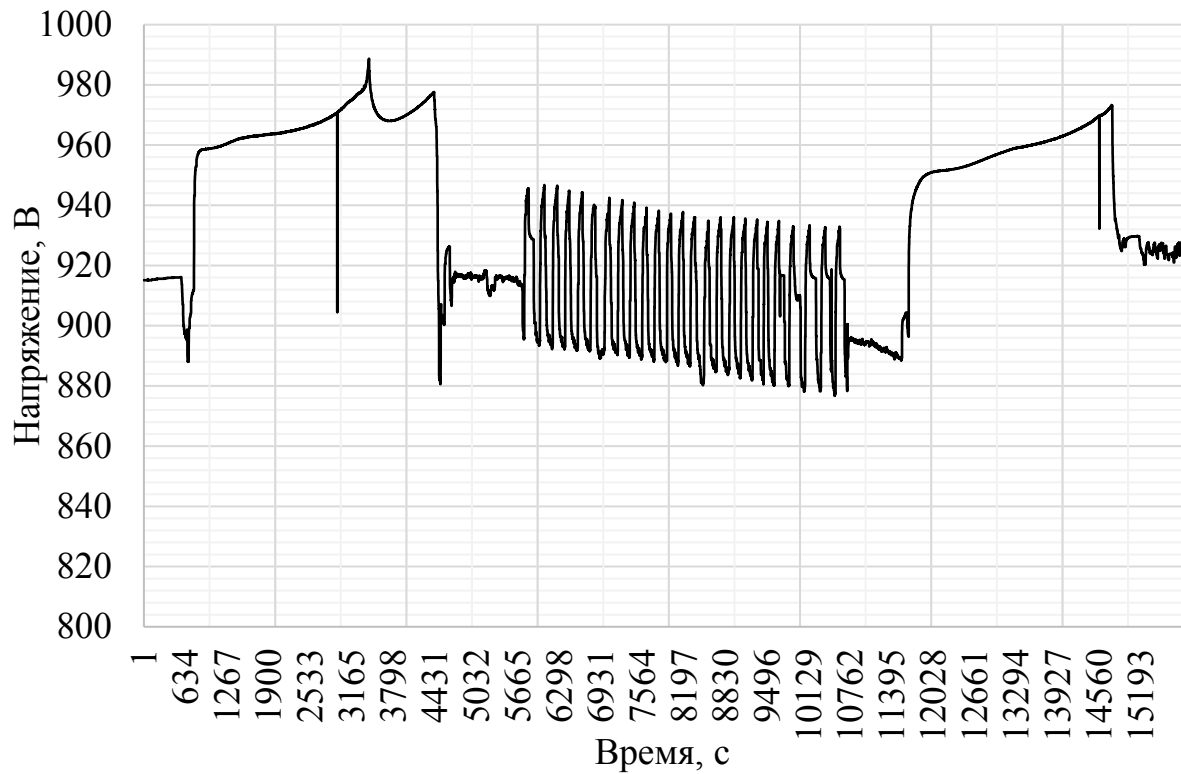


Рис. 4. Напряжение накопителя электроэнергии при ездовом цикле электровоза

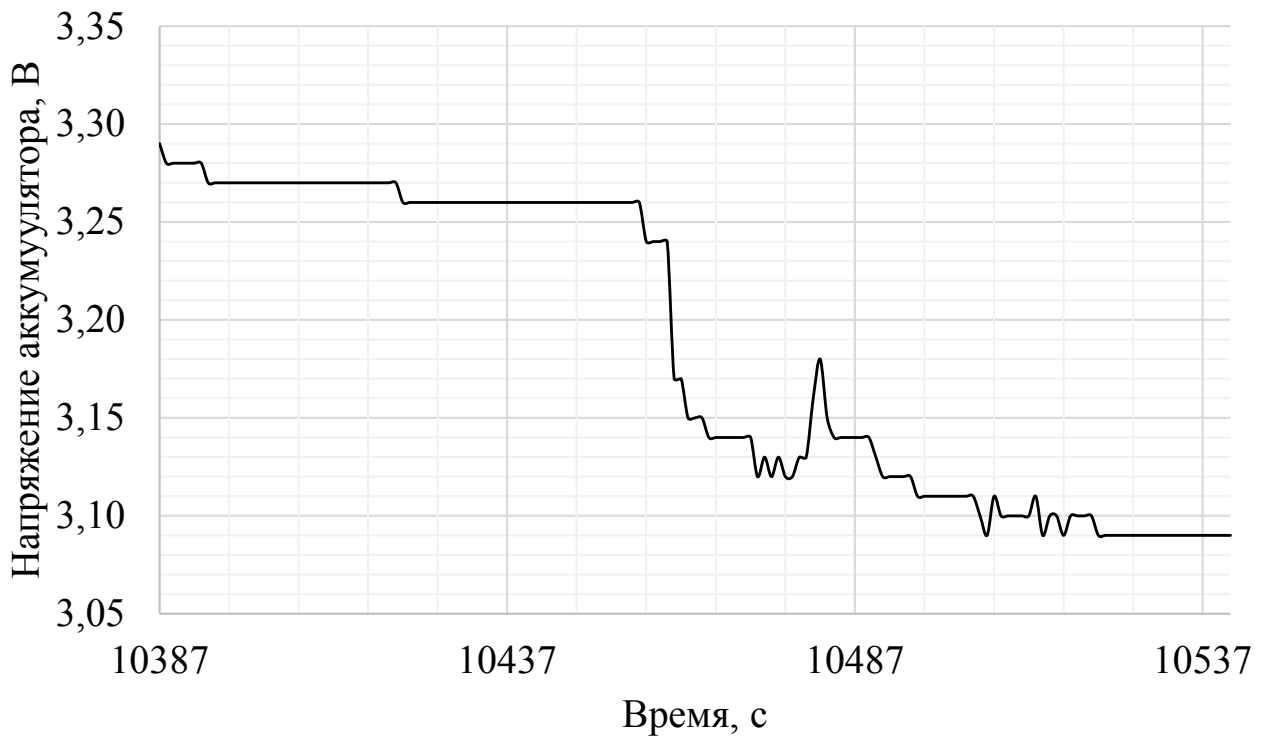


Рис. 5. Напряжение одного аккумуляторного элемента накопителя электроэнергии в момент разряда

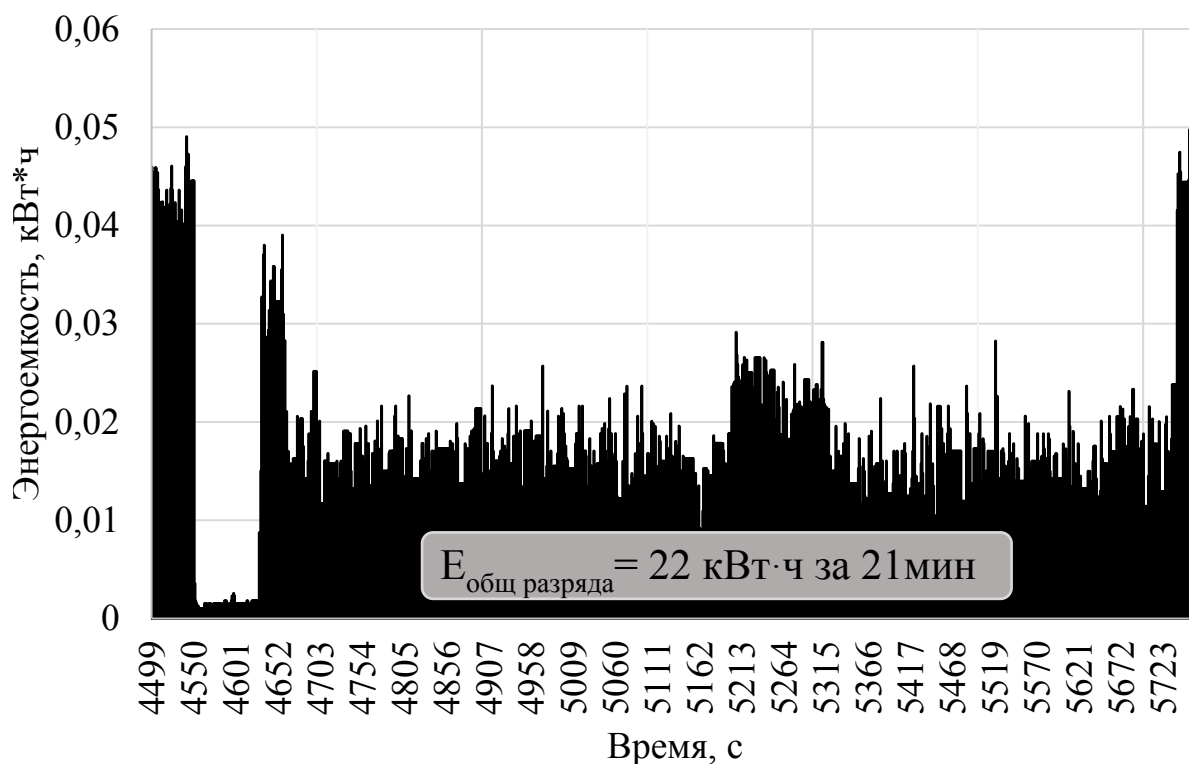


Рис. 6. Затраченная энергия на исследуемом промежутке времени в режиме тяги

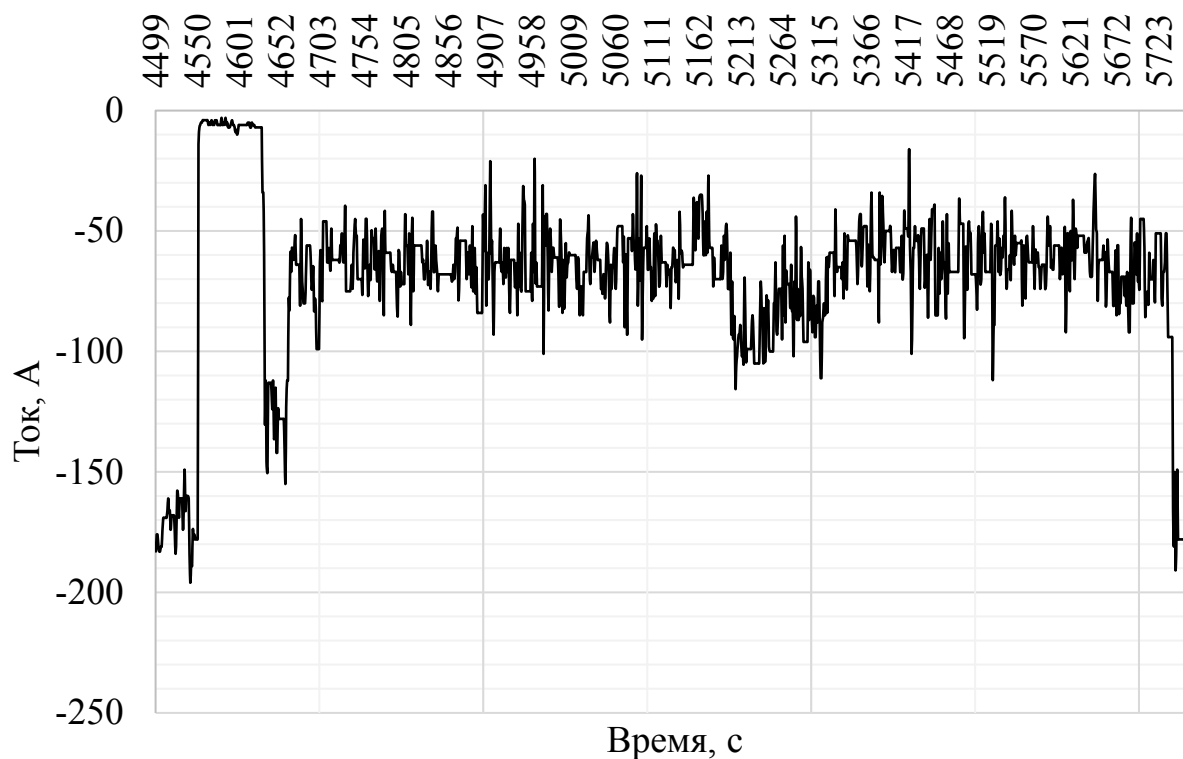


Рис. 7. Ток разряда накопителя электроэнергии на исследуемом промежутке времени разряда

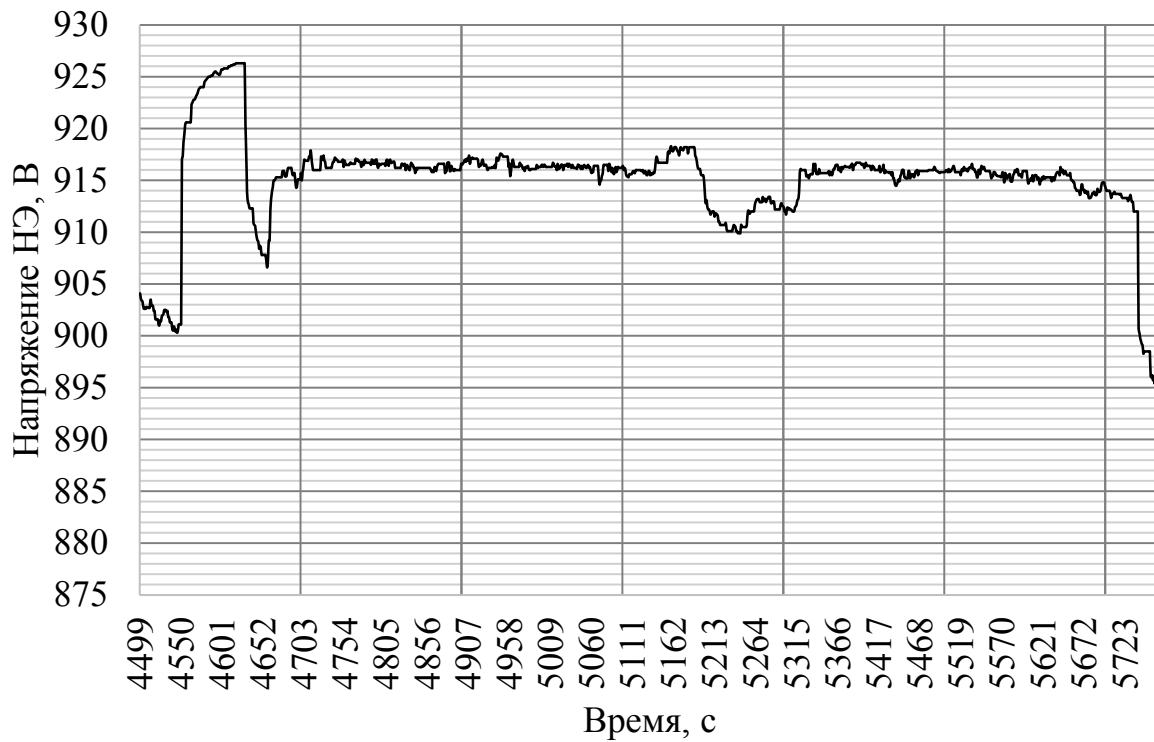


Рис. 8. Напряжение накопителя электроэнергии на исследуемом промежутке времени разряда

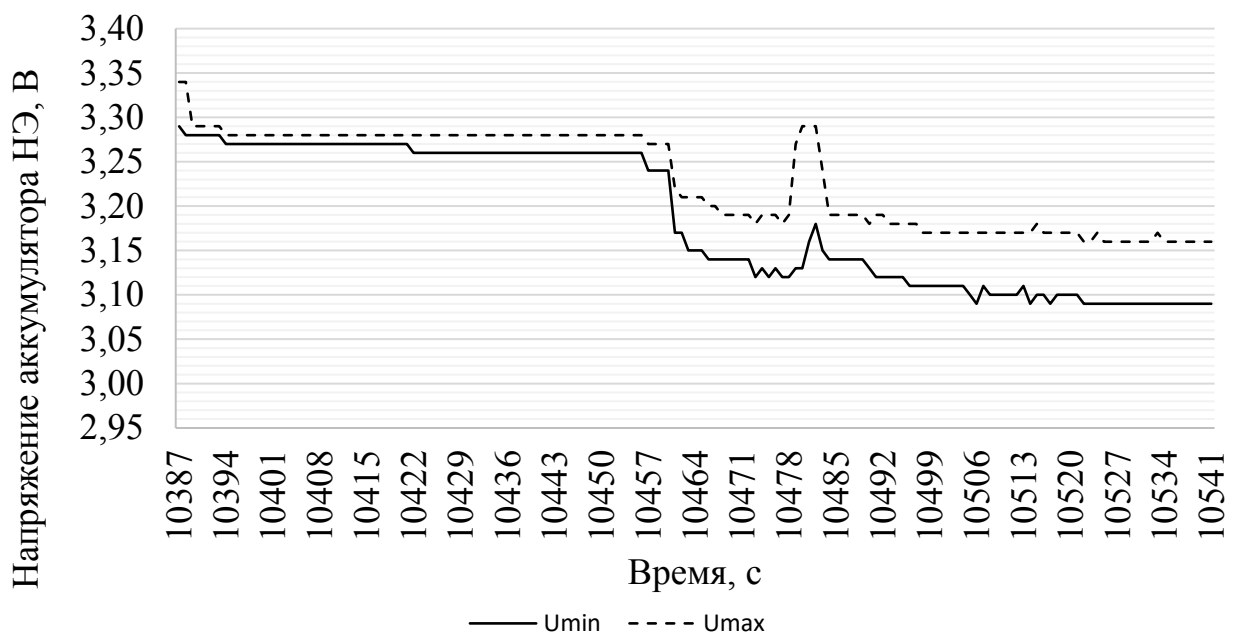


Рис. 9. Минимальное напряжение аккумуляторного элемента при разряде

Для расчета запасаемой энергии в НЭ примем самый длительный промежуток времени с 760 по 3473 с, в котором ток заряда был на номинальном уровне без колебаний. Выборка данного промежутка обусловлена оптимальным режимом заряда НЭ, при котором деградация аккумуляторных ячеек минимальна, поскольку такой режим считается предпочтительным, при этом время заряда составило 45 мин.

Резкое возрастание напряжения на рис. 8 и 9 обусловлено спадом нагрузки на НЭ.

На рис. 10 представлен график расчета энергоемкости. А на рис. 11–13 соответственно представлен ток разряда, напряжение НЭ и минимальное напряжение аккумуляторной ячейки для исследуемой области заряда.

Общее время прохождения дневного маршрута (суточного цикла работы электровоза) составляет $t_p = 21$ час тяги, как указано ранее [22]. При этом остается еще $t_3 = 3$ часа простоя, которые могут быть использованы для заряда накопителя энергии.

Согласно данным, представленным на рис. 6, рассчитана затраченная электроэнергия за исследуемый цикл разряда путем интегрирования мгновенной энергии, затраченной за 1 секунду, по времени. Результатом данного интегрирования стало значение $E_{пр} = 22$ кВт · ч, затраченное за $t_{пр} = 0,35$ часа тяги.

Расчетное значение общей затраченной энергии можно определить через

соотношение:
$$E_p = \frac{E_{пр}}{t_{пр}} t_p.$$

Проведя расчеты, получаем, что затраченная энергия за суточный цикл работы равняется $E_p = 1320$ кВт · ч.

Аналогичным образом можно рассчитать энергию заряда, которую электровоз может получить в режиме простоя. На основании данных, представленных на рис. 10, рассчитано, что за $t_{пз} = 0,75$ часа заряда накопитель энергии получит $E_{пз} = 88,7$ кВт · ч. Расчетное значение полученной энергии за цикл работы по

соотношению $E_3 = \frac{E_{пз}}{t_{пз}} t_3$ будет равно 354,8 кВт · ч.

Максимальная затраченная энергия, согласно модели ездового цикла электровоза, приведенной в табл. 1, составляет 926 кВт · ч, а среднесуточная — 726 кВт · ч. По расчетам, выполненным в предыдущих разделах, затраченная энергия исследуемого электровоза составляет 1320 кВт · ч. С учетом вычитания энергии, которую накопитель может запасти в моменты простоя, скорректированное значение затраченной энергии будет равняться $1320 - 354,8 = 965,2$ кВт · ч. Данный результат остается ниже, чем максимальное по модели ездового цикла тепловоза.

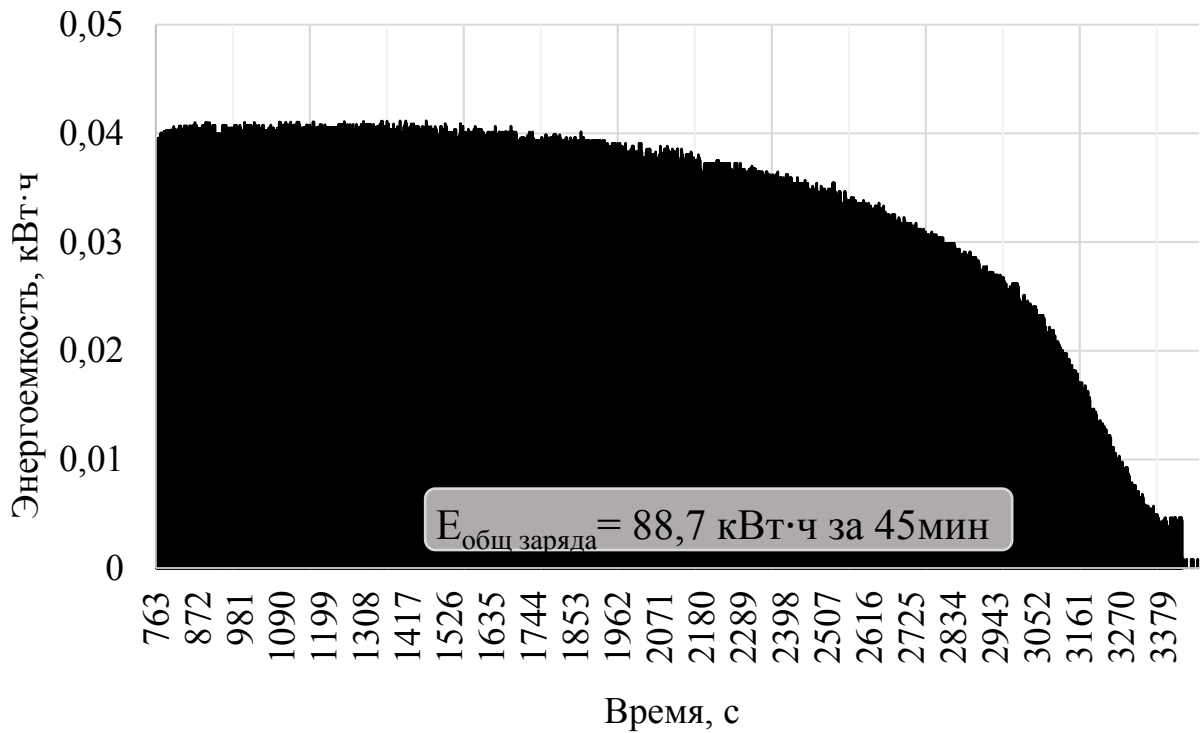


Рис. 10. Затраченная энергия накопителя электроэнергии на исследуемом промежутке времени заряда

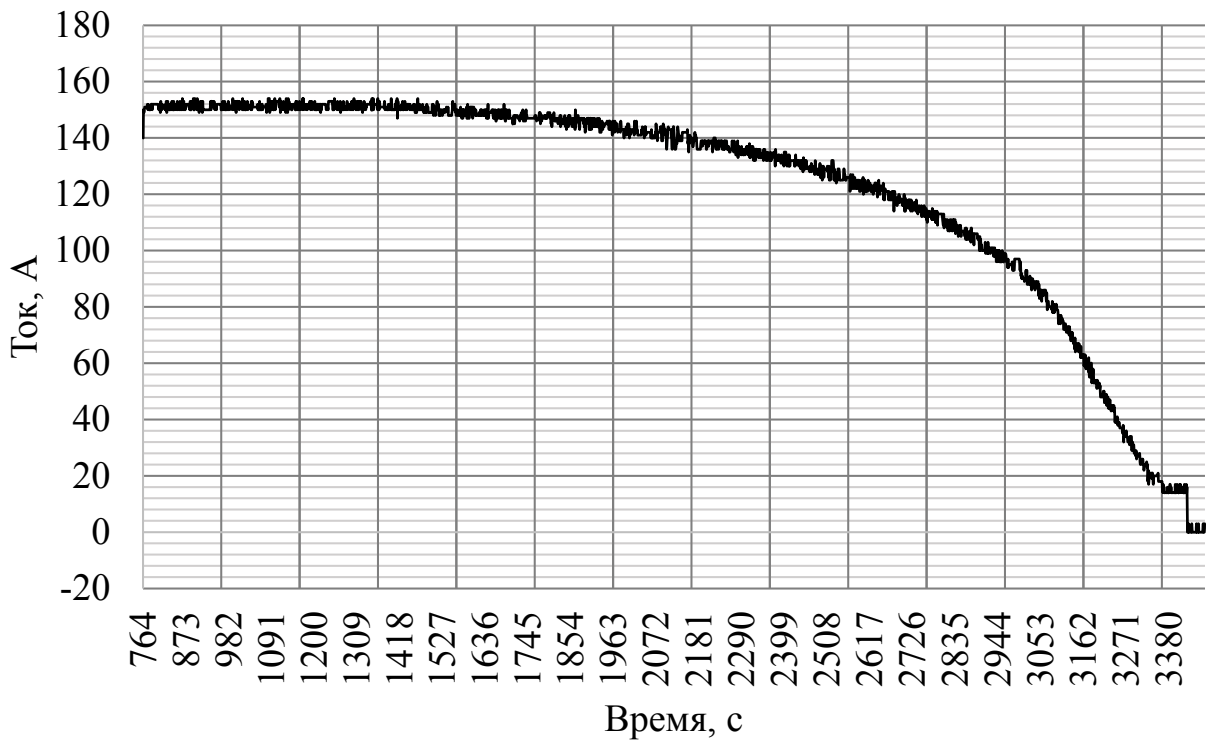


Рис. 11. Ток заряда накопителя электроэнергии на исследуемом промежутке времени разряда

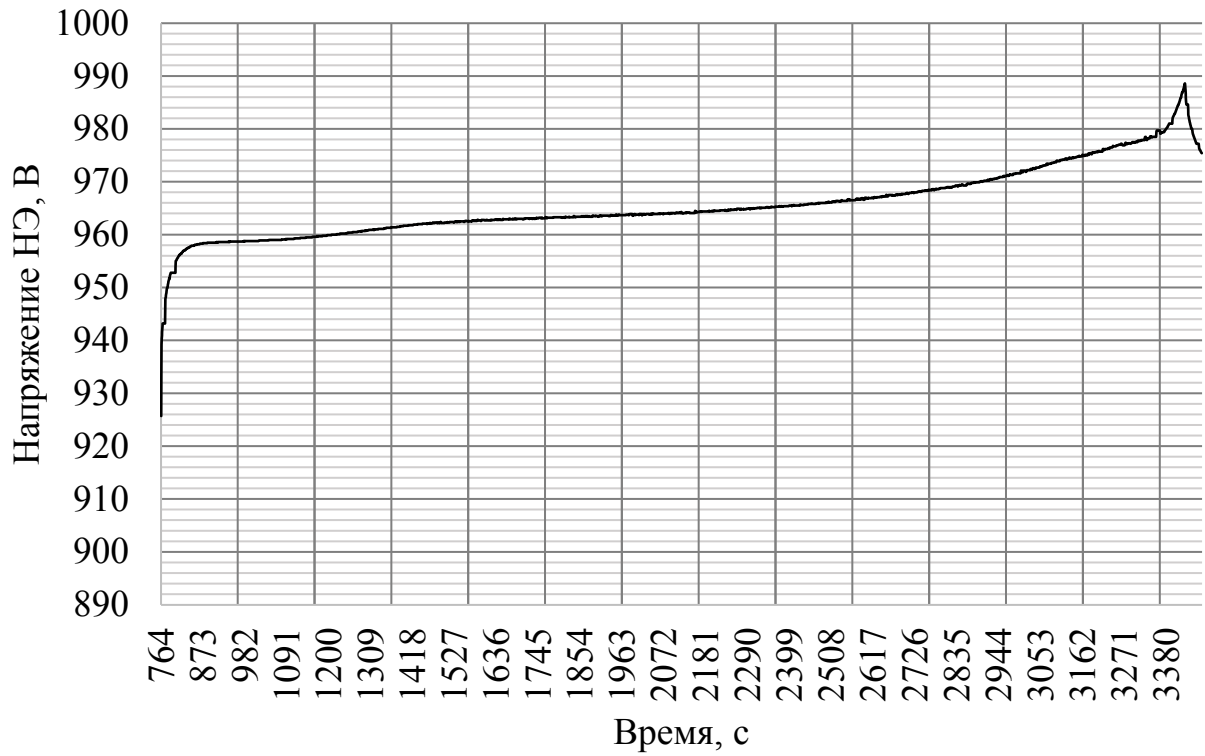


Рис. 12. Напряжение накопителя электроэнергии на исследуемом промежутке времени заряда

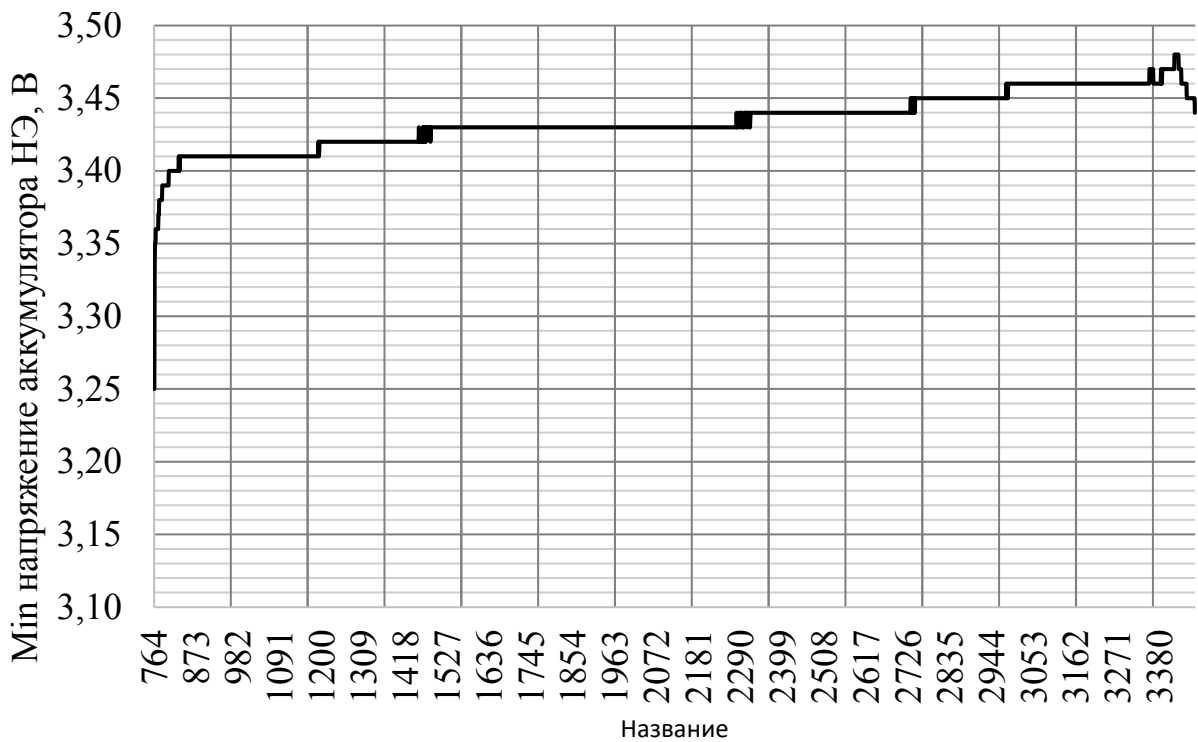


Рис. 13. Минимальное напряжение аккумуляторного элемента на исследуемом промежутке времени заряда

Надо отметить, что значение запасенной энергии получено при условии простоя электровоза. В реальных условиях существует возможность кратковременного подзаряда на всем участке пути, где присутствует контактная сеть. Такой режим работы можно видеть на рис. 1–4.

Дополнительно важно отметить, что заряд производился при значении тока 0,5С (рис. 11). Однако при режиме заряда в 1С возможно добиться показаний запасенной энергии в 2 раза выше.

Соответственно, можно считать, что батарея имеет достаточную энергоемкость, оптимальный размер и массу.

Заключение

В статье представлен разработанный цикл движения электровоза с экспериментальным накопителем электроэнергии при выполнении маневровых работ, а также результаты экспериментальных исследований НЭ при работе электровоза по ездовому циклу дизельного локомотива. По итогам анализа полученных данных можно сделать вывод, что характеристики НЭ удовлетворяют модели ездового цикла, а массогабаритные параметры экспериментального НЭ считаются оптимальными.

Результаты, полученные и представленные в этой статье, могут быть использованы для уточнения технических требований к накопителям электроэнергии железнодорожного транспорта.

Выявлено отсутствие резерва по емкости НЭ, эту задачу может решить добавление аккумуляторных ячеек, но при этом повышается масса, что может быть критичным фактором. Данную проблему можно решить путем повышения энергетической эффективности аккумулирующих элементов НЭ или применения в его составе двух вариантов электрохимии, влекущего усложнение конструкции, но в значительной степени повышение эффективности в процессе эксплуатации и на жизненном цикле, что влечет за собой последующий поиск решений и разработку программных и аппаратных комплексов для повышения их энергетической эффективности.

Список источников

1. Alekov S. F. Increasing the durability of diesel generator engines by using energy storage systems and optimizing operating modes / S. F. Alekov, A. A. Pegachkov // STEEL IN TRANSLATION 2024. — Pp. 220–225.
2. Marius A. G. Electric Drive Solution for Short Distance Passenger Railway Vehicles on Non-Electrified or Mixed Lines / A. G. Marius, P. Gabriel, A. Sorin // Electric Vehicles International Conference (EV) 2019. — 5 p.

3. Hoang-Phuong N. CO2 Reduction Potential by Putting Electric Vehicles into Operation in Phu Quoc Island, Viet Nam / N. Hoang-Phuong, V. Viet-Cuong, L. Tan-Dong et al. // IEEE Conference 2019. — 6 p.
4. Щуров Н. И. Анализ влияния режимов движения электромобилей на процесс старения тяговых аккумуляторов на основе цикла WLTC / Н. И. Щуров, А. А. Штанг, С. И. Дедов и др. // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. — 2020. — Т. 13(8). — С. 977–990.
5. Florian D. Modeling Large-Scale Manufacturing of Lithium-Ion Battery Cells: Impact of New Technologies on Production Economics / D. Florian // IEEE Transactions on Engineering Management 2023. — Pp. 6753–6769.
6. Mingyue J. Evaluation on Total Cost of Ownership of Electric Forklifts with lithium-ion battery / J. Mingyue, P. Fengwen, H. Xueqi et al. // IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC) 2021.
7. Umar S. Comparing the economic value of lithium-ion battery technologies in the nine wholesale electricity markets in North America 2022 / S. Umar, B. Sacha, J. Zekun et al. — Pp. 363–373.
8. ГОСТ Р 55364 — 2012. Электровозы. Общие технические требования. — М.: Стандартформ, 2013. — 36 с.
9. Федеральный закон от 22.07.2008 №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
10. ГОСТ 34394—2018. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав. Требования пожарной безопасности. М.: Стандартформ, 2018. — 19 с.
11. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» (редакция, действующая с 20 мая 2023 года). — 322 с.
12. Акуличев В. О. Применение мобильных систем накопления электрической энергии для электроснабжения удаленных потребителей малой и средней мощности / В.О. Акуличев, В. В. Микрюков, А.А. Пацев и др. // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2022. — № 6(75).
13. Аблазов Б. Г. Технология бесперебойного электроснабжения удаленных потребителей с применением мобильных систем накопления электрической энергии на базе литий-ионных аккумуляторных батарей / Б. Г. Аблазов, Е. В. Ежов, А. С. Куликов // Роснано. — URL: <https://www.rusnano.com/upload/documents/BMSNEE-Article.pdf>.
14. Helmut W. Battery powered high efficiency drive systems in practical applications / W. Helmut // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», г. Екатеринбург, 05–09 октября 2015 г. — Екатеринбург: УрФУ, 2015. — С. 163–166. — URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/35302> 2015.
15. Helmut W. Large lithium-ion battery-powered electric vehicles — from idea to reality / W. Helmut, W. Thomas, Z. Herbert // IEEE Conference 2018. — 5 p.
16. Shtang A. A. Battery-electric shunting locomotive with lithium-polymer storage batteries / A. A. Shtang, M. V. Yaroslavtsev // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST) 2016. — 4 p.

17. Yodsaphat W. A Design of Energy Storage System for Electric Locomotive / W. Yodsaphat, R. Tananat, T. Chanchai // IEEE Conference 2021. — 4 p.
18. Сокирка О. П. Дайджест перспективные технологии развития отрасли железнодорожного транспорта / О. П. Сокирка. — РОСЖЕЛДОР Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), 2023. — 124 с.
19. Алеков С. Ф. Обзор систем термостатирования литий-ионных ячеек аккумуляторной батареи / С. Ф. Алеков, Т. В. Голубчик // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2022. — № 6. — С. 20–25.
20. Голубчик Т. В. Результаты экспериментальных испытаний литий-железо-фосфатного аккумулятора производства компании «ЛИОТЕХ» в низкотемпературных условиях / Т. В. Голубчик, А. С. Куликов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2021. — № 1. — С. 17–20.
21. Михеев В. А. Оценка эксплуатационной экономичности дизельных локомотивов на заданном участке обслуживания / В. А. Михеев // Вестник СибАДИ. — 2015. — Вып. 1(41). — С. 91–96.
22. Михеев В. А. Расчет времени эксплуатационной работы дизель-генераторной установки тепловоза по позициям контроллера машиниста / В. А. Михеев // Вестник ИрГТУ. — 2010. — № 2(42). — С. 142–146.
23. Laxman T. Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study / T. Laxman, R. Payam, H. Phuong et al. // IEEE 2023. — Pp. 42431–42462.
24. Aramis P. Modelling the degradation process of lithium-ion batteries when operating at erratic state-of-charge swing ranges / P. Aramis, Q. Vanessa, R. Heraldo et al. // IEEE Conference 2017. — 6 p.
25. Ahmed S. A. Battery Energy Management Techniques for an Electric Vehicle Traction System / S. A. Ahmed, M. Shayok, R. Habibur // IEEE Access. 2022. — Vol. 10. — Pp. 84015–84037.
26. Mingyu L. Electric Vehicle Operation Scheduling Optimization Considering Electrochemical Characteristics of Li-ion Batteries / L. Mingyu, H. Bing, L. Shaofeng // 35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). — 2020. — Pp. 89–94.
27. Wang H. The influence of operating conditions on discharge characteristics for traction battery / H. Wang, H. Sun, W. Chen et al. // 5th International Conference on Information Science and Control Engineering. — 2018. — Pp. 1286–1290.

Дата поступления: 01.12.2024

Решение о публикации: 14.02.2025

Контактная информация:

АЛЕКОВ Степан Федорович — аспирант; VirusApienz@yandex.ru

КУЛИКОВ Алексей Сергеевич — аспирант; mechanicbird@gmail.com

ГОЛУБЧИК Тимофей Владимирович — канд. техн. наук, доц.; golubchik@bmstu.ru

ИВАНОВ Михаил Алексеевич — руководитель департамента специальных проектов; ma.ivanov@tmholding.ru

Studying an Electric Locomotive Driving Cycle Model with an Experimental Electric Energy Storage Device for Shunting Operations

S. F. Alekov¹, A. S. Kulikov¹, T. V. Golubchik², M. A. Ivanov³

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64, Leningradskiy pr., Moscow, 125319, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 5, bld. 1, 2-ya Baumanskaya Str., Moscow, 105005, Russian Federation

³ООО “Tsentр Perspektivnykh Tekhnologii TMH”, fl. 3, pom. 28, rab. 1, Nobel Str., (Skolkovo Ter Innovation Center), Moscow, 121205, Russian Federation

For citation: Alekov S. F., Kulikov A. S., Golubchik T. V., Ivanov M. A. Studying an Electric Locomotive Driving Cycle Model with an Experimental Electric Energy Storage Device for Shunting Operations. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 88–105. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-88-105

Summary

Currently, there has been an active transition to electrified vehicles due to energy cost reduction and increased density of electro-chemical power sources. This has been manifested in the rolling stock electrification in the railway industry, especially in railway stations and depots where the use of diesel engines is limited due to environmental factors. In addition, electric locomotives can operate on non-electrified railway sections and this opens up new prospects for the sustainable development of transport infrastructure. **Purpose:** To study the technical parameters and energy characteristics of the electric energy storage for efficient use on electric locomotives. **Methods:** This article considers the key issues of energy of driving cycles and application of electric energy storage on electric locomotives. The experimental data obtained have been compared with the calculated ones. **Results:** A driving cycle model of a battery locomotive has been developed based on the calculation of the diesel generator (DGS) operating time of a traditional diesel locomotive. The experimental data on the energy storage system (ESS) operation as part of an electric locomotive, as well as the obtained data analysis are presented. The ESS technical parameters necessary for ensuring the electric locomotive efficient operation within the daily cycle of work at the railway station have been identified. **Practical significance:** The conducted studies have illustrated the energy parameters and operating modes of the contact-battery shunting locomotive during the workday. They allow determining the ESS parameters such as charge and discharge capacity and energy consumption average and maximum values. The study can promote the creation of more efficient mechanisms for the electrical energy accumulation and application, which will reduce the electric locomotive operating costs and increase their energy efficiency. Practical research of electrical energy storage devices can be useful not only for rail transport but also for other areas where efficient energy saving systems are essential.

Keywords: Electrical energy storage device, electric locomotive, driving cycles, lithium-ion battery, rail transport.

References

1. Alekov S. F., Pegachkov A. A. Increasing the durability of diesel generator engines by using energy storage systems and optimizing operating modes. *STEEL IN TRANSLATION* 2024, pp. 220–225.
2. Marius A. G., Gabriel P., Sorin A. Electric Drive Solution for Short Distance Passenger Railway Vehicles on Non-Electrified or Mixed Lines. *Electric Vehicles International Conference (EV) 2019*, 5 p.

3. Hoang-Phuong N., Viet-Cuong V., Tan-Dong L. et al. CO2 Reduction Potential by Putting Electric Vehicles into Operation in Phu Quoc Island, Viet Nam. IEEE Conference 2019, 6 p.
4. Shchurov N. I., Shtang A. A., Dedov S. I. et al. Analiz vliyaniya rezhimov dvizheniya elektromobiley na protsess stareniya tyagovykh akkumulyatorov na osnove tsikla WLTC [Analysis of the influence of electric vehicle driving modes on the aging process of traction batteries based on the WLTC cycle]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies]. 2020, vol. 13(8), pp. 977–990. (In Russian)
5. Florian D. Modeling Large-Scale Manufacturing of Lithium-Ion Battery Cells: Impact of New Technologies on Production Economics. IEEE Transactions on Engineering Management 2023, pp. 6753–6769.
6. Mingyue J., Fengwen P., Xueqi H. et al. Evaluation on Total Cost of Ownership of Electric Forklifts with lithium-ion battery. IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC) 2021.
7. Umar S., Sacha B., Zekun J. et al. Comparing the economic value of lithium-ion battery technologies in the nine wholesale electricity markets in North America 2022, pp. 363–373.
8. *GOST R 55364 — 2012. Elektrovozy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [GOST R 55364—2012. Electric locomotives. General technical requirements]. Moscow: Standartforms Publ., 2013, 36 p. (In Russian)
9. *Federal'nyy zakon ot 22.07.2008 № 123-FZ "Tekhnicheskiy reglament o trebovaniyakh pozharnoy bezopasnosti"* [Federal Law of 22.07.2008 № 123-FZ "Technical Regulations on Fire Safety Requirements"]. (In Russian)
10. *GOST 34394—2018. Lokomotivy i motorvagonnyy podvizhnoy sostav. Trebovaniya pozharnoy bezopasnosti* [GOST 34394—2018. Locomotives and multiple unit rolling stock. Fire safety requirements]. Moscow: Standartforms Publ., 2018, 19 p. (In Russian)
11. *Tekhnicheskiy reglament Tamozhennogo soyuza TR TS 018/2011 "O bezopasnosti kolesnykh transportnykh sredstv" (redaktsiya, deystvuyushchaya s 20 maya 2023 goda)* [Technical Regulations of the Customs Union TR CU 018/2011 "On the Safety of Wheeled Vehicles" (as amended on May 20, 2023)]. 322 p. (In Russian)
12. Akulichev V. O., Mikryukov V. V., Patsev A. A. et al. Primenenie mobil'nykh sistem nakopleniya elektricheskoy energii dlya elektrosnabzheniya udalennykh potrebiteley maloy i sredney moshchnosti [Application of mobile systems for storing electric energy for power supply of remote consumers of low and medium power]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electricity. Transmission and Distribution]. 2022, Iss. 6(75). (In Russian)
13. Ablazov B. G., Ezhov E. V., Kulikov A. S. Tekhnologiya bespereboynogo elektrosnabzheniya udalennykh potrebiteley s primeneniem mobil'nykh sistem nakopleniya elektricheskoy energii na baze lityi-ionnykh akkumulyatornykh batarey [Technology of uninterruptible power supply of remote consumers using mobile systems for storing electrical energy based on lithium-ion batteries]. *Rosnano* [Rusnano]. 2022. Available at: <https://www.rusnano.com/upload/documents/BMSNEE-Article.pdf>. (In Russian)
14. Helmut W. Battery powered high efficiency drive systems in practical applications. *Trudy Mezhdunarodnoy shestnadtsatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka"*, g. Ekaterinburg, 05–09 oktyabrya 2015 g. [Proceedings of the International Sixteenth Scientific and Technical Conference "AC Electric Drives", Yekaterinburg, October 5–9, 2015]. Available at: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/35302> 2015. (In Russian)
15. Helmut W., Thomas W., Herbert Z. Large lithium-ion battery-powered electric vehicles — from idea to reality. IEEE Conference 2018, 5 p.

16. Shtang A. A., Yaroslavtsev M. V. Battery-electric shunting locomotive with lithium-polymer storage batteries. 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST) 2016, 4 p.
17. Yodsaphat W., Tananat R., Chanchai T. A Design of Energy Storage System for Electric Locomotive. IEEE Conference 2021, 4 p.
18. Sokirka O. P. *Daydzhest perspektivnye tekhnologii razvitiya otrasli zheleznodorozhnogo transporta. ROSZHELDOR Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya" (FGBOU VO RGUPS)* [Digest of promising technologies for the development of the railway transport industry. ROSZHELDOR Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Rostov State University of Railway Engineering" (FGBOU VO RGUPS)]. 2023, 124 p. (In Russian)
19. Alekov S. F., Golubchik T. V. Obzor sistem termostatirovaniya litiy-ionnykh yacheek akkumulyatornoy batarei [Review of thermostating systems for lithium-ion battery cells]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Restoration. Modernization]. 2022, Iss. 6, pp. 20–25. (In Russian)
20. Golubchik T. V., Kulikov A. S. Rezul'taty eksperimental'nykh ispytaniy litiy-zhelezo-fosfatnogo akkumulyatora proizvodstva kompanii "LIOTEKh" v nizkotemperaturnykh usloviyakh [Results of experimental tests of lithium-iron-phosphate battery produced by LIOTECH company in low-temperature conditions]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2021, Iss. 1, pp. 17–20. (In Russian)
21. Mikheev V. A. Otsenka ekspluatatsionnoy ekonomichnosti dizel'nykh lokomotivov na zadannom uchastke obsluzhivaniya [Evaluation of operational efficiency of diesel locomotives on a given service section]. *Vestnik SibADI* [Bulletin of SibADI]. 2015, Iss. 1(41), pp. 91–96. (In Russian)
22. Mikheev V. A. Raschet vremeni ekspluatatsionnoy raboty dizel'-generatornoy ustanovki teplovoza po pozitsiyam kontrollera mashinista [Calculation of operational time of diesel generator set of diesel locomotive based on driver's controller positions]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of IrSTU]. 2010, Iss. 2(42), pp. 142–146. (In Russian)
23. Laxman T., Payam R., Phuong H. et al. Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study. IEEE 2023, pp. 42431–42462.
24. Aramis P., Vanessa Q., Heraldo R. et al. Modelling the degradation process of lithium-ion batteries when operating at erratic state-of-charge swing ranges. IEEE Conference 2017, 6 p.
25. Ahmed S. A., Shayok M., Habibur R. Battery Energy Management Techniques for an Electric Vehicle Traction System. IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 84015–84037.
26. Mingyu L., Bing H., Shaofeng L. Electric Vehicle Operation Scheduling Optimization Considering Electrochemical Characteristics of Li-ion Batteries. 35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), 2020, pp. 89–94.
27. Wang H., Sun H., Chen W. et al. The influence of operating conditions on discharge characteristics for traction battery. 5th International Conference on Information Science and Control Engineering, 2018, pp. 1286–1290.

Received: December 01, 2024

Accepted: February 14, 2025

Author's information:

Stepan F. ALEKOV — Postgraduate Student; virusApienz@yandex.ru

Alexey S. KULIKOV — Postgraduate Student; mexanicbird@gmail.com

Timofey V. GOLUBCHIK — PhD in Engineering, Associate Professor; golubchik@bmstu.ru

Mikhail A. IVANOV — Head of Special Projects Department; ma.ivanov@tmholding.ru

УДК 621.331.3.025.1

Повышение эффективности заземления устройств контактной сети на участках переменного тока

И. А. Кремлев¹, Е. Ю. Салита¹, И. А. Терехин²

¹Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 644046, Омск, К. Маркса пр., 35

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Кремлев И. А., Салита Е. Ю., Терехин И. А. Повышение эффективности заземления опор контактной сети на участках переменного тока // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 106–118. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-106-118

Аннотация

Цель: Дать обоснование способам повышения эффективности работы устройств заземления и улучшения электробезопасности при эксплуатации участков железной дороги переменного тока благодаря изменению способов заземления опор контактной сети. **Методы:** Аналитически дана оценка рассматриваемым техническим решениям с точки зрения обеспечения электробезопасности и электромагнитной совместимости; путем имитационного моделирования проведен сравнительный анализ существующей и альтернативной систем заземления; расчетным путем получены оптимальные значения сопротивлений растеканию групп опор контактной сети. **Результаты:** В тексте рассмотрены аспекты воздействия аварийных режимов короткого замыкания на безопасность работников во время эксплуатации и обслуживания устройств контактной сети при различных вариантах заземления опор. Были разработаны модели различных систем заземления для проведения сравнительного анализа их эффективности с использованием программы MatLab — Simulink, а также выполнены расчеты необходимых значений сопротивления растеканию для групп опор. **Практическая значимость:** Преднамеренный отказ от соединения заземляющих спусков опор контактной сети с рельсами позволит снизить расходы на обслуживание и содержание заземляющих устройств. Полученные результаты могут быть использованы при организации эксплуатации разземленных от рельса участков тяговой сети переменного тока.

Ключевые слова: Контактная сеть, переменный ток, заземление, трос группового заземления, сопротивление растеканию, электробезопасность, разземленные опоры, релейная защита, распределение потенциала.

Введение

В настоящее время эксплуатируется пилотный опытный участок тяговой сети (ТС) на Западно-Сибирской железной дороге, опоры контактной сети (КС) которого были преднамеренно отсоединены от рельсов. Положительный опыт длительной эксплуатации показал, что в результате данного технического решения на указанном участке полностью были исключены отказы, связанные с эксплуатацией рельсовых цепей, а также снижены эксплуатационные расходы на

поддержание в необходимом состоянии устройств заземления. Вышеуказанные факты, а также иные гипотезы, нашедшие подтверждение при моделировании, дают повод говорить о внедрении подобных решений на всей протяженности ТС переменного тока.

Одной из основных причин соединения защитного заземления опор КС, которое не находится под напряжением в нормальном режиме эксплуатации, с тяговыми рельсами, является повышение чувствительности релейных защит (РЗ) фидеров, питающих КС [1]. В то же время необходимо учитывать тот факт, что наличие короткого замыкания (КЗ) в ТС, когда существует электрическое соединение опор с рельсами, аварийный ток посредством троса группового заземления (ТГЗ) поступает сразу в рельсовую сеть. Это приводит к появлению недопустимо высоких потенциалов, которые в ряде случаев могут превышать допустимые значения с точки зрения электробезопасности и электромагнитного влияния на прокладываемые параллельно железнодорожному полотну кабельные линии связи. Формируемая зона выноса потенциала может распространяться вдоль рельсовой сети в обе стороны от точки КЗ на сотни метров, что приводит к появлению высоких напряжений на устройствах, которые по условиям их работы должны иметь соединение с рельсами. Этот процесс, например, может вызывать многократные пробой искровых промежутков (ИП) неповрежденных групп опор, приводя к выходу их из строя [2].

Негативный эффект от соединения опор с рельсами также проявляется в том, что при обслуживании устройств КС электромонтер, находящийся на опоре, имеющей заземление на рельс через ИП, находится под потенциалом, близким к потенциалу удаленной земли. В режиме КЗ ИП может быть пробит в обратном направлении, и монтер попадет под разность потенциалов (U_{π}) между ТГЗ (или рельсом) и опорой (землей). Попадание под такой потенциал возможно и в случае нарушения изоляции КС.

Исключить указанные недостатки можно, если отказаться от глухого соединения элементов контактной сети с рельсами.

Исследование процессов при различных способах заземления опор

В случае отсутствия металлического соединения опор КС с тяговыми рельсами при возникновении КЗ зона выноса потенциала будет ограничиваться только несколькими метрами в зоне стекания тока с опор в землю, а следовательно, выноса опасного потенциала вдоль рельсовой сети наблюдаться не будет.

Также важно отметить, что в случае нарушения изоляции КС ее высокий потенциал, естественно, попадает на ТГЗ за счет его металлической связи с КС, однако за счет организованной гальванической связи между ТГЗ и арматурой опор одновременно с потенциалом ТГЗ будет расти и потенциал опоры, на которой

находится электромонтер, а следовательно, разности потенциалов возникать не будет. В связи с этим и ТГЗ, и работник будут находиться под одним и тем же потенциалом, поражения электрическим током не произойдет.

Таким образом, с точки зрения обеспечения безопасности система с разземленными опорами является более предпочтительной по сравнению с эксплуатируемой повсеместно.

Необходимо учитывать и изменение условий влияния контактной сети на смежные устройства при различных видах заземления.

Влияющая цепь электрической железной дороги представляет собой контур, который включает тяговую подстанцию, электроподвижной состав (ЭПС) и ТС. Напряжение в ТС соответствует рабочему напряжению переменного тока, а ток в земле, являющейся частью ТС и обеспечивающей параллельное протекание тока, может быть сопоставим с рабочим током. Известно, что ТС в значительной мере асимметрична и значительно влияет на соседние цепи. Изначально цепь, находящаяся под воздействием этого влияния, называется смежной. Положение влияющей и смежной линии, при котором могут возникнуть опасные и помеховые воздействия, обозначается как сближение, а расстояние между линиями, измеряемое перпендикулярно к влияющей линии, называется шириной сближения [3].

Напряжение, приложенное к линии, и ток, протекающий в ней, создают электрическое и магнитное поля в окружающем пространстве. Магнитное поле формируется током, проходящим по проводу, в то время как электрическое поле возникает из-за напряжения, приложенного к цепи «провод — земля».

Если около цепи «провод — земля» с действующим переменным напряжением и током разместить другую цепь, то под влиянием электрической и магнитной индукции в ней возникнут индуцированные напряжение и ток, а также будет протекать ток, обусловленный наличием земли в рассматриваемых электрических цепях. Влияющей называют электрическую цепь, в которой действует переменное напряжение и протекает переменный ток, а цепь, в которой индуцируются напряжение и ток, называют электрической цепью, подверженной влиянию.

Причиной, вызывающей влияние одной электрической цепи на другую, является наличие между проводами этих цепей емкостной и магнитной связи.

Для определения наведенных на ТГЗ потенциалов была разработана имитационная модель стандартной системы заземления, которая представлена на рис. 1. Максимальная длина ТГЗ ограничивается максимально допустимыми значениями наведенных потенциалов на нем. Однако максимальное значение напряжения в нормальном режиме работы согласно [4, 5] должно быть меньше или равно 2,0 В. Поэтому длина ТГЗ в приведенной системе должна составлять не более 400 м в случае Т-образной схемы [6].

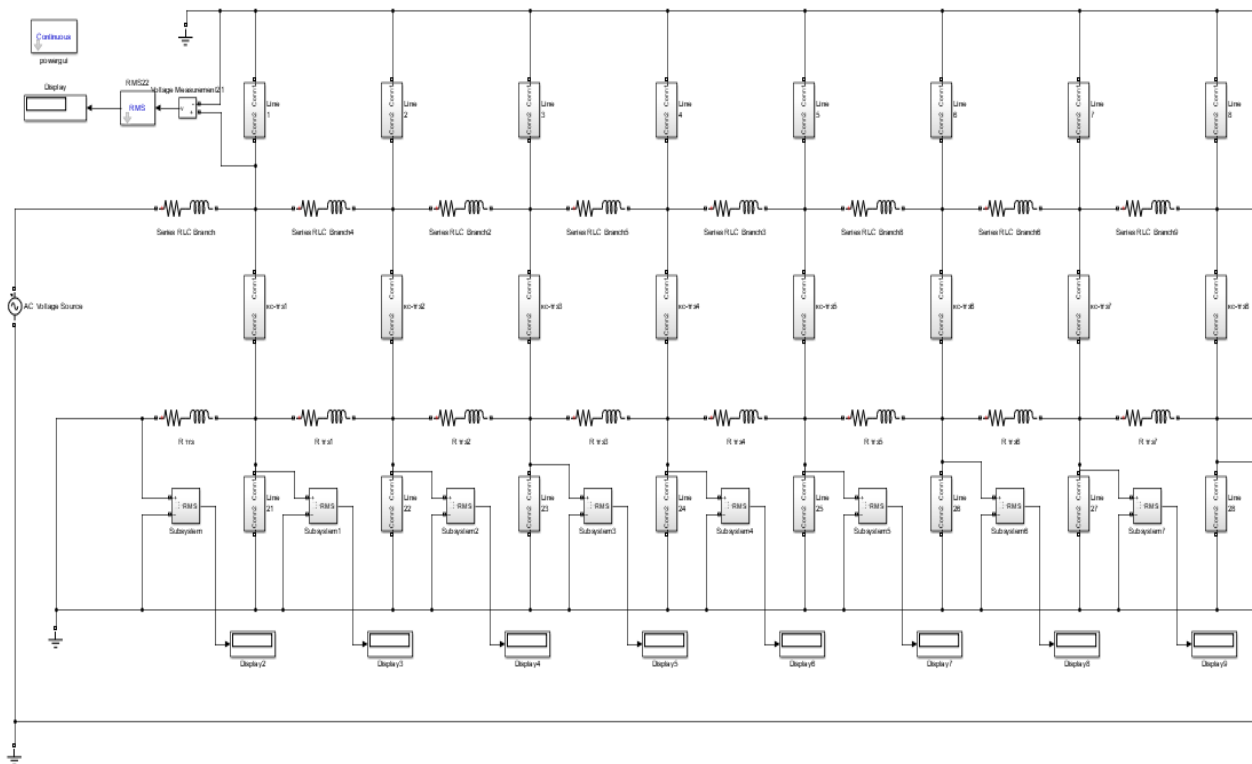


Рис. 1. Модель обычной системы заземления (на рельсовую цепь)

Результатом моделирования стала качественная диаграмма распределения потенциала вдоль всей длины ТГЗ в нормальном режиме эксплуатации (рис. 2), исходя из которой можно сделать следующие выводы:

1. Величина наведенного напряжения прямо пропорциональна длине ТГЗ.
2. При длине плеча ТГЗ, равной 200 м, наведенное напряжение достигает значение в 1,6 В.

Очевидным является вывод о том, что дальнейшее увеличение количества опор в группе невозможно.

Далее рассчитаем значение наведенного тока посредством электрического влияния в соответствии с выражением:

$$I_2 = Y_{(1-2)} U_1 l, \tag{1}$$

где U_1 — напряжение в контактной сети, принимаем 25 кВ;
 $Y_{(1-2)}$ — модуль полной взаимной проводимости между однопроводными линиями, являющийся параметром электрического влияния, Ом.

Для того чтобы найти ток, возникающий из-за электрического влияния, необходимо определить емкость между влияющим и подверженным влиянию проводниками. Ее можно определить через собственные (α_{11} и α_{22}) и взаимные (α_{12} и α_{21}) потенциальные коэффициенты, которые характеризуются геометрическими размерами линий, их геометрическим расположением в пространстве и свойствами окружающей среды [3, 7]. Схема для их расчета приведена на рис. 3.

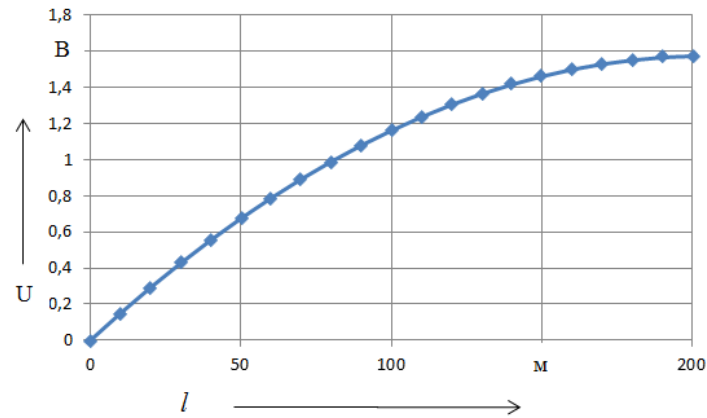


Рис. 2. Качественная диаграмма распределения потенциала по длине ТГЗ

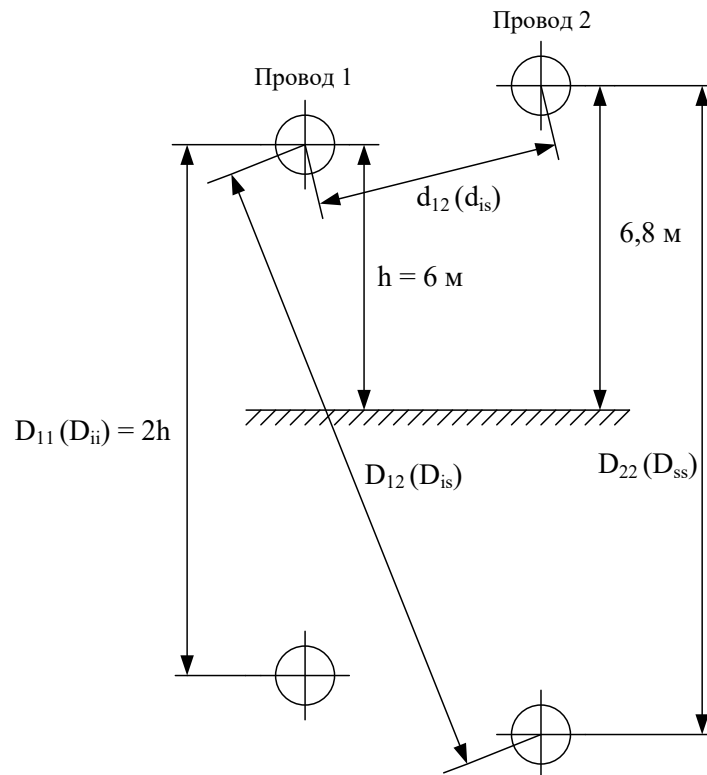


Рис. 3. Схема для расчета потенциальных коэффициентов

Потенциальные коэффициенты определяются по следующим формулам:

$$\alpha_{11} = \ln \left(\frac{D_{11}}{r_{11}} \right); \quad (2)$$

$$\alpha_{22} = \ln \left(\frac{D_{22}}{r_{22}} \right); \quad (3)$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \ln\left(\frac{D_{12}}{r_{12}}\right), \quad (4)$$

где r_{11} , r_{22} — радиусы соответственно ТГЗ, в рассматриваемом случае используются параметры провода ПБСМ-95 и контактного провода, рассматривается провод марки МФ-100, мм.

Полученные значения коэффициентов приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Значения потенциальных коэффициентов

№ п/п	Потенциальный коэффициент	Значение
1	α_{11}	7,69
2	α_{22}	7,79
3	$\alpha_{12} = \alpha_{21}$	1,19

Межпроводные емкости определяются по следующим формулам:

$$C_{(1-1)} = \frac{1}{k} \left(\frac{\alpha_{22} - \alpha_{12}}{\alpha_{11}\alpha_{22} - (\alpha_{12})^2} \right); \quad (5)$$

$$C_{(2-2)} = \frac{1}{k} \left(\frac{\alpha_{11} - \alpha_{12}}{\alpha_{11}\alpha_{22} - (\alpha_{12})^2} \right); \quad (6)$$

$$C_{(1-2)} = \frac{1}{k} \left(\frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}\alpha_{22} - (\alpha_{12})^2} \right), \quad (7)$$

где k — коэффициент, равный $18 \cdot 10^{-6}$ км/Ф.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Значения емкостей между проводами

№ п/п	Емкость между проводами	Значение, Ф
1	$C_{(1-1)}$	$6,27 \cdot 10^{-9}$
2	$C_{(2-2)}$	$6,17 \cdot 10^{-9}$
3	$C_{(1-2)}$	$1,13 \cdot 10^{-9}$

Модуль полной взаимной проводимости определяется по выражению:

$$Y_{(1-2)} = \sqrt{g_{(1-2)}^2 \alpha + (j \omega C_{(1-2)} \alpha 10^{-3})^2}.$$

В результате вычислений получаем модуль полной взаимной проводимости $Y_{(1-2)} = 4 \cdot 10^{-5}$. После чего, подставив полученные значения в выражение (1), получаем значение наведенного тока при электрическом влиянии, равное $I_2 = 0,2$ А.

В отличие от описанной ранее схемы группового заземления опор, в данной системе альтернативный трос заземляется с обеих сторон в каждом пролете через сопротивление растеканию опоры. Это приводит к тому, что в середине пролета трос оказывается под наибольшим напряжением относительно земли, которое уменьшается по мере приближения к концам троса. Это означает, что величина наведенного напряжения на участке пролета между соседними и заземленными опорами не может достигать установленного норматива в 2 В. Моделирование этой ситуации также проводилось в программе MatLab — Simulink (рис. 4).

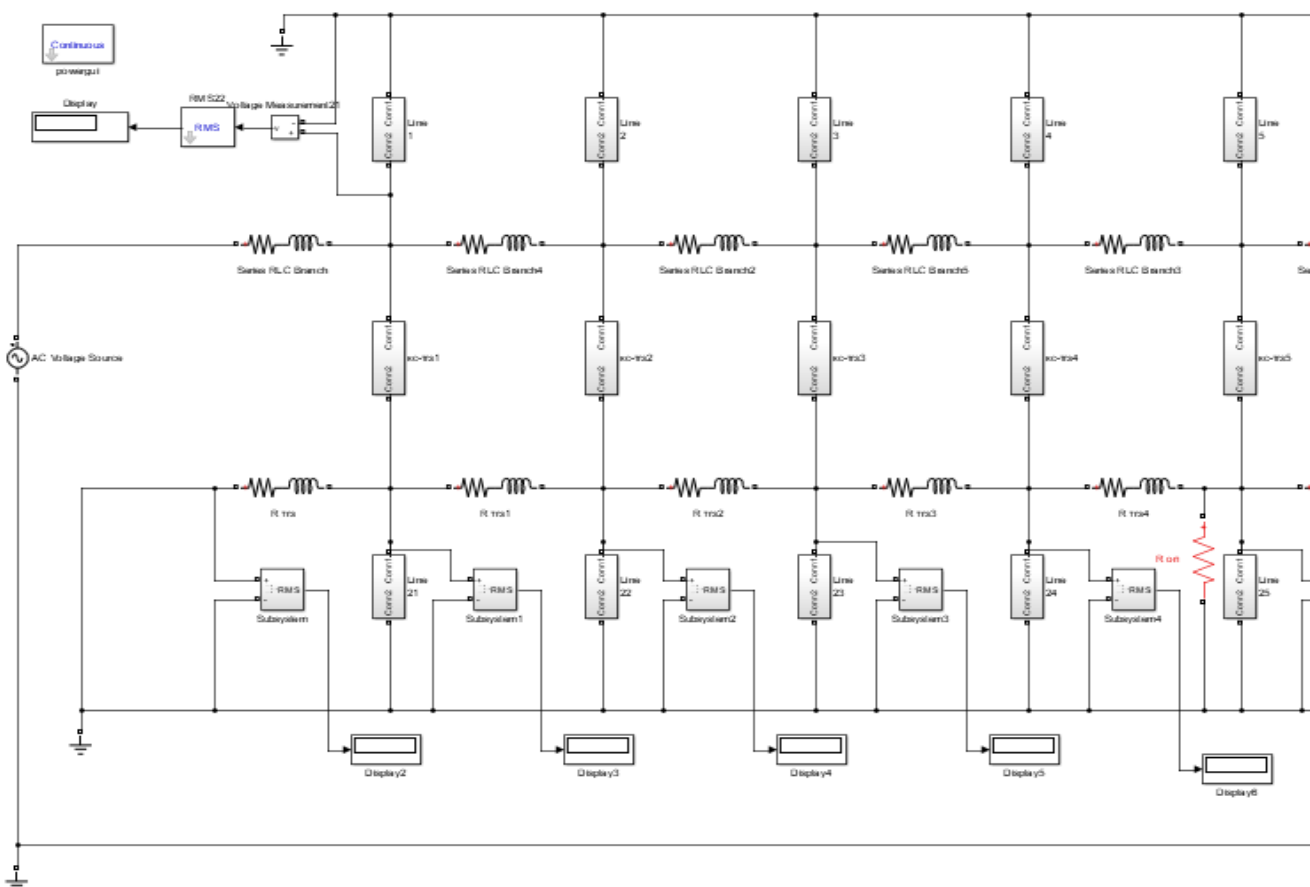


Рис. 4. Модель системы с разземленными опорами

По результатам моделирования получена диаграмма, отражающая характер изменения потенциала вдоль ТГЗ в системе с разземленными опорами (рис. 5). Как видно, полученные значения существенно меньше нормируемых значений, что позволяет гипотетически формировать группы опор, которые могут ограничиваться по длине только длиной блок-участков рельсовых цепей во избежание их случайного шунтирования [8].

Так как в качестве заземлителей в альтернативной системе используются опоры, это накладывает требования и к плотности тока через арматуру в различных режимах работы тяговой сети. Расчет тока показал, что наведенный ток при электрическом влиянии составит 0,05 А. Таким образом, плотность тока в длительном (нормальном) режиме не будет превышать допустимого нормированного значения 1 А/м².

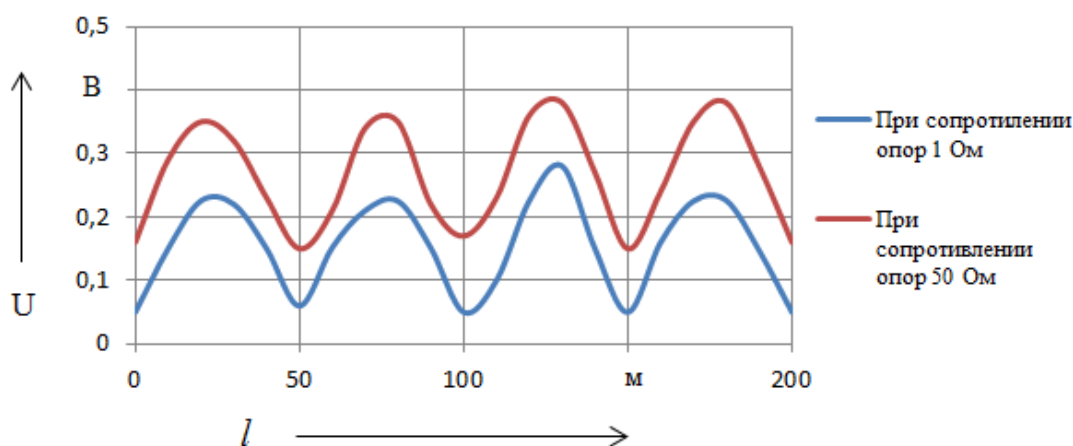


Рис. 5. Диаграмма, отражающая характер изменения потенциала вдоль ТГЗ в системе с разземленными опорами

При переходе к системе с разземленными опорами необходимо учесть и изменение условий функционирования релейной защиты, задачей которой является предотвращать или существенно снижать ущерб от КЗ и ненормальных режимов в ТС [9, 10].

Для обеспечения требуемой чувствительности защит необходимо обеспечение минимального сопротивления в месте возникновения короткого замыкания.

Определение оптимальных значений сопротивления растеканию опор

Очевидно, что при отказе от соединения опор с рельсами необходимо обеспечить электрическое соединение металлических конструкций опоры КС, которые в нормальном режиме изолированы от КС с арматурой опор КС или с их внутренним спуском заземления, что, в свою очередь, способствует уменьшению сопротивления растеканию тока КЗ с опор до значений, характерных для их фундаментных частей [11]. Объединение подобных опор ТГЗ позволит добиться снижения сопротивления растеканию до значений, при которых будет обеспечиваться надежная работа РЗ, т. е. будет соблюдаться необходимая чувствительность и селективность работы РЗ, а следовательно, необходимо обязательное соблюдение требований к допустимым параметрам, в том числе к максимально допустимому сопротивлению в месте КЗ [12].

Так, сопротивление перехода «группа опор — земля» с учетом дуги не должно превышать значения, определяемого выражением:

$$R_{\Pi} \leq \frac{\frac{Z_{H.min}}{K_B K_3 K_{\text{ч}} n} - z_{mn} l_{\text{АП}}}{1 + \frac{z_{\text{ПА}} + z_{mn} l_{\text{АП}}}{z_{\text{ПВ}} + z_{mn} l_{\text{ПВ}}}} - z_{\text{ТГЗ}} l_{\text{ТГЗ}}, \quad (9)$$

где $Z_{H.min}$ — минимальное сопротивление нагрузки, Ом;
 z_{mn} — удельное (погонное) сопротивление тяговой сети, Ом/км;
 n — количество задействованных путей на межподстанционной зоне;
 $K_{\text{ч}}$ — коэффициент чувствительности, принимаемый равным 1,25;
 $z_{\text{ТГЗ}}$ — погонное сопротивление троса группового заземления, Ом/км;
 K_3 — коэффициент запаса, принимаемый равным 1,1–1,3;
 $l_{\text{АП}}, l_{\text{ПВ}}$ — расстояния между подстанцией А и постом секционирования, постом секционирования и подстанцией В соответственно;
 K_B — коэффициент возврата, принимаемый равным 1,1–1,15;
 $l_{\text{ТГЗ}}$ — максимальная длина троса группового заземления, км.
 Расчетная схема участка тяговой сети приведена на рис. 6.

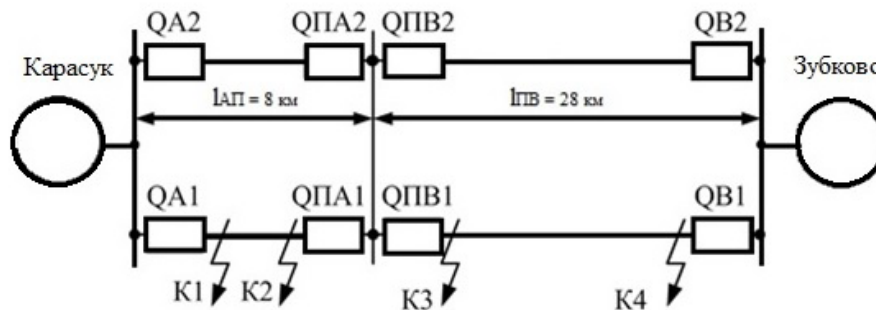


Рис. 6. Расчетная схема для определения сопротивления растеканию группы опор

После расчетов по выражению (9) с точки зрения обеспечения требуемой чувствительности РЗ максимально допустимое сопротивление перехода «опоры КС — земля» будет равно:

для участка Карасук — Чебачий: $R_{\Pi} = 8,1$ Ом.

для участка Чебачий — Зубково: $R_{\Pi} = 7,1$ Ом.

Полученные значения необходимо учитывать при формировании групп разземленных опор в пределах указанных участков.

В результате можно отметить, что необходимость группового заземления опор в тяговых сетях обусловлена следующими факторами:

- 1) повышением надежности эксплуатации рельсовых цепей;
- 2) обеспечением более эффективной электробезопасности обслуживающего персонала;

3) экономичностью в результате снижения затрат на обслуживание элементов цепи заземления;

4) простотой в обслуживании.

При этом для повышения эффективности группового заземления необходимо обеспечение надежной гальванической связи арматуры опор с ТГЗ и в случае необходимости устройство дополнительных контуров заземления [13].

Заключение

Система с опорами контактной сети, не имеющими гальванической связи с рельсами, является более безопасной, надежной и экономически выгодной в сравнении с эксплуатируемой с настоящее время системой, в которой опоры соединяются с тяговыми рельсами.

Список источников

1. Терехин И. А. К вопросу электробезопасности при разземлении опор контактной сети / И. А. Терехин, И. А. Кремлев // *Успехи современного естествознания*. — 2012. — № 6.
2. Кузнецов А. А. Обеспечение электробезопасности при преднамеренном разземлении опор контактной сети на участках железных дорог переменного тока / А. А. Кузнецов, Ю. В. Кондратьев, В. А. Квашук // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. — 2013. — № 1. — С. 328–333.
3. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость: учебник для вузов железнодорожного транспорта / М. П. Бадер. — М.: УМК МПС, 2002. — 638 с.
4. ГОСТ Р 12.1.038—2024. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. — 2021. — 173 с.
6. Инструкция по заземлению устройств энергоснабжения на электрифицированных железных дорогах: ЦЭ-346. — М., 1995, 65 с.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебное пособие / Л. А. Бессонов. — М.: Гардарик, 2003. — 317 с.
8. Кремлев И. А. Совершенствование методики определения опасного напряжения в смежных линиях связи при магнитном влиянии тяговой сети переменного тока / И. А. Кремлев, И. А. Терехин, И. В. Тарабин и др. // *Транспортные системы и технологии*. — 2020. — С. 92–100.
9. Пинчуков П. С. Комплексная оценка работы релейной защиты тяговой сети переменного тока / П. С. Пинчуков, С. И. Макашева, А. П. Костин // *Вестник Брянского государственного технического университета*. — 2020. — № 7. — С. 27–38.
10. Кремлев И. А. Проблемы внедрения системы тягового электроснабжения переменного тока с опорами контактной сети, не заземленными на рельс и пути их решения / И. А. Кремлев, И. А. Терехин, Е. Г. Абишов и др. // *Вопросы электротехнологии*. — 2020. — № 1. — С. 88–94.

11. Дынькин Б. Е. Защита контактной сети переменного тока при разземлении опор: учебное пособие / Б. Е. Дынькин. — Хабаровск: Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения, 2002. — 151 с.

12. Кремлев И. А. Перспектива перевода участков тяговой сети без заземления на рельсы / И. А. Кремлев, И. А. Терехин, И. В. Тарабин и др. // Тез. докл. междунар. симпозиума «Eltrans 10.0». — СПб.: Санкт-Петербургский ун-т путей сообщения, 2019. — С. 66–97.

13. Кремлев И. А. Перспектива внедрения системы тягового электроснабжения переменного тока с опорами контактной сети, не заземленными на рельс / И. А. Кремлев, Р. Б. Скоков, И. А. Терехин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2020. — № 4. — С. 57–66.

Дата поступления: 12.12.2024

Решение о публикации: 14.02.2025

Контактная информация:

КРЕМЛЕВ Иван Александрович — канд. техн. наук, доц.; ivkreml@mail.ru

САЛИТА Евгений Юрьевич — канд. техн. наук, доц.; salitaey@gmail.com

ТЕРЕХИН Илья Александрович — канд. техн. наук, доц.; terekhin@pgups.ru

Increasing the Efficiency of Grounding the Overhead Catenary Supports on AC Railway Sections

I. A. Kremlev¹, E. Yu. Salita¹, I. A. Terekhin²

¹Omsk State Transport University, 35, K. Marx Ave., Omsk, 644046, Russian Federation

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kremlev I. A., Salita E. Yu., Terekhin I. A. Increasing the Efficiency of Grounding the Overhead Catenary Supports on AC Railway Sections. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 106–118. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-106-118

Summary

Purpose: To provide justification of increasing the efficiency of grounding devices and improving electrical safety on AC railway sections using the new methods of grounding overhead catenary supports. **Methods:** Analytical assessment of the technical solutions under study in terms of electrical safety and electromagnetic compatibility has been made; a comparative analysis of the existing grounding systems and alternative ones has been carried out using simulation modelling; optimum values of the resistance to dissipation of groups of overhead catenary supports have been obtained by calculations. **Results:** The impact of short-circuit failure modes on the workers' safety during the operation and maintenance of catenary network devices at different types of support grounding have been considered in this paper. Different grounding system models have been developed for their efficiency comparative analysis using *MatLab-Simulink* software and the required values of resistance to dissipation for groups of supports have been calculate. **Practical significance:** The intended refusal

from connecting the catenary support grounding to the rails will reduce the grounding maintenance costs. The obtained results can allow organizing the operation of AC railway sections with the rail ungrounded system.

Keywords: Contact network, alternating current (AC), grounding, group grounding cable, resistance to dissipation, electrical safety, ungrounded supports, relay protection, potential distribution.

References

1. Terekhin I. A., Kremlev I. A. K voprosu elektrobezopasnosti pri razzemlenii opor kontaktnoy seti [On the issue of electrical safety during de-grounding of contact network supports]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in modern natural science]. 2012, Iss. 6. (In Russian)
2. Kuznetsov A. A., Kondrat'ev Yu. V., Kvashchuk V. A. Obespechenie elektrobezopasnosti pri prednamerennom razzemlenii opor kontaktnoy seti na uchastkakh zheleznnykh dorog peremennogo toka [Ensuring electrical safety during intentional de-grounding of contact network supports on sections of alternating current railways]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport of Siberia and the Far East.]. 2013, Iss. 1, pp. 328–333. (In Russian)
3. Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovместimost': uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [Electromagnetic compatibility: a textbook for universities of railway transport]. Moscow: UMK MPS Publ., 2002, 638 p. (In Russian)
4. *GOST R 12.1.038—2024. SSBT. Elektrobezopasnost'. Predel'no dopustimye znacheniya napryazheniy prikosnoveniya i tokov* [GOST R 12.1.038—2024. SSBT. Electrical safety. Maximum permissible values of touch voltages and currents]. (In Russian)
5. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebiteley* [Rules for the technical operation of electrical installations of consumers]. 2021, 173 p. (In Russian)
6. *Instruktsiya po zazemleniyu ustroystv energosnabzheniya na elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorogakh: TsE-346* [Instructions for grounding power supply devices on electrified railways: CE-346]. Moscow, 1995, 65 p. (In Russian)
7. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoye pole: uchebnoye posobie* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electromagnetic field: textbook]. Moscow: Gardarik Publ., 2003, 317 p. (In Russian)
8. Kremlev I. A., Terekhin I. A., Tarabin I. V. et al. Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya opasnogo napryazheniya v smezhnykh liniyakh svyazi pri magnitnom vliyaniy tyagovoy seti peremennogo toka [Improving the methodology for determining hazardous voltage in adjacent communication lines under the magnetic influence of an AC traction network]. *Transportnye sistemy i tekhnologii* [Transport systems and technologies]. 2020, pp. 92–100. (In Russian)
9. Pinchukov P. S., Makasheva S. I., Kostin A. P. Kompleksnaya otsenka raboty releynoy zashchity tyagovoy seti peremennogo toka [Comprehensive assessment of the operation of relay protection of an AC traction network]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University]. 2020, Iss. 7, pp. 27–38. (In Russian)
10. Kremlev I. A., Terekhin I. A., Abishov E. G. et al. Problemy vnedreniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka s oporami kontaktnoy seti, ne zazemlennymi na rel's i puti ikh resheniya [Problems of implementing an AC traction power supply system with contact network

supports not grounded to the rail and ways to solve them]. *Voprosy elektrotekhnologii* [Issues of Electrotechnology]. 2020, Iss. 1, pp. 88–94. (In Russian)

11. Dyn'kin B. E. *Zashchita kontaktной seti peremennogo toka pri razzemlenii opor: uchebnoe posobie* [Protection of an AC contact network when supporting ungrounded: a tutorial]. Khabarovsk: Dal'nevostochnyy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2002, 151 p. (In Russian)

12. Kremlev I. A., Terekhin I. A., Tarabin I. V. et al. Perspektiva perevoda uchastkov tyagovoy seti bez zazemleniya na rel'sy [Prospects for transferring sections of a traction network without grounding to rails]. *Tez. dokl. mezhdunar. simpozima "Eltrans 10.0"* [Abstracts of the report of the international. symposium "Eltrans 10.0"]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy un-t putey soobshcheniya Publ., 2019, pp. 66–97. (In Russian)

13. Kremlev I. A., Skokov R. B., Terekhin I. A. Perspektiva vnedreniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka s oporami kontaktной seti, ne zazemlennymi na rel's [Prospects for the implementation of an alternating current traction power supply system with contact network supports not grounded to the rail]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2020, Iss. 4, pp. 57–66. (In Russian)

Received: December 12, 2024

Accepted: February 14, 2025

Author's information:

Ivan A. KREMLEV — PhD in Engineering, Associate Professor; ivkreml@mail.ru

Evgeniy Yu. SALITA — PhD in Engineering, Associate Professor; salitaey@gmail.com

Ilya A. TEREKHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; terekhin@pgups.ru

УДК 625.1

К вопросу о воздействии гидродинамических факторов на береговые железнодорожные сооружения

А. А. Воробьев, А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин, В. С. Майоров, С. А. Краснобрыжий

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Воробьев А. А., Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Майоров В. С., Краснобрыжий С. А. К вопросу о воздействии гидродинамических факторов на береговые железнодорожные сооружения // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 119–130. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-119-130

Аннотация

Цель: Произвести анализ окружающего прибрежного рельефа перспективного с точки зрения развития высокоскоростного движения участка Северо-Кавказской железной дороги и традиционно применяемых на данном участке берегозащитных сооружений, построена трехмерная карта лоции вблизи исследуемого участка. Выполнен компьютерный эксперимент с помощью средств численного моделирования воздействия штормовых волн на берегозащитные сооружения и конструкции железнодорожного пути в районах интенсивного воздействия прибрежных штормовых приливов. Оценены интенсивность воздействия гидродинамических факторов на элементы конструкций и косвенное влияние традиционных берегозащитных сооружений на эрозию берега. **Методы:** Компьютерное моделирование методом гидродинамики сглаженных частиц. **Результаты:** Построена карта распределения скоростей потока и избыточного давления для набегающей и отраженной волны на примере участка берега, получены численные показатели воздействия гидродинамических факторов на береговые сооружения железнодорожного пути. Исследование показало преимущества интеграции указанных сооружений в естественный ландшафт благодаря значительному снижению воздействия отраженных волн на эрозию берега. **Практическая значимость:** Произведен сравнительный анализ воздействия указанных гидродинамических факторов на классическую и альтернативную конструкции нижнего строения пути в прибрежной зоне, обеспечивающую максимальное использование естественной защиты береговой линии.

Ключевые слова: Гидродинамика сглаженных частиц, подпорно-волноотбойные стены, железнодорожные сооружения, нижнее строение пути, эстакада.

Введение

Развитие высокоскоростного транспорта напрямую связано с обеспечением безопасности перевозок. Опыт эксплуатации зарубежных высокоскоростных магистралей в Европе и Японии показывает, что сильный порывистый боковой ветер может стать причиной значительных динамических нагрузок, действующих на движущийся подвижной состав, и, как следствие, вызывать колебания и перемещения надрессорного строения подвижного состава недопустимой амплитуды, приводящие к потере устойчивости и развитию аварийных ситуаций, в частности сходов и опрокидываний подвижного состава. Не менее

важным следствием воздействия ветровых нагрузок меньшей интенсивности на высокоскоростной подвижной состав является возникновение опрокидывающего момента, приводящего к перераспределению нагрузок на контактные поверхности колесных пар, снижению вследствие этого эффективности процесса торможения и повышению вероятности вкатывания реборды колеса на головку рельса. В настоящее время предельно допустимой является неравномерность распределения веса подвижного состава на колесные пары менее 10 %. Данные значения, как показывают результаты исследований, могут быть достигнуты при порывистом боковом ветре, характерном для прибрежных районов, а также долин некоторых рек и скорости подвижного состава порядка 250–300 км/ч. В нашей стране наиболее опасным в плане ветровых нагрузок является перспективный с точки зрения развития высокоскоростного движения участок Туапсе — Адлер Северо-Кавказской железной дороги в районе п. Головинка. Особенностью рельефа данной местности является наличие относительно плоского участка местности длиной 5 км и глубиной 2,4 км в устье реки Шахе, что способствует беспрепятственному разгону воздушных масс (рис. 1). Не менее важной особенностью данной местности является также значительный перепад глубин (более 200 м) в непосредственной близости от береговой линии, что создает условия формирования волн значительной высоты (до 6–8 м), что требует усиления устройства береговой линии. Опыт эксплуатации участка показал, что здесь возможны штормы с высотой волн порядка 8 метров и скоростью ветра до 40 м/с, приводящие к разрушению пути и берегоукрепляющих сооружений.



Рис. 1. Рельеф участка Туапсе — Адлер Северо-Кавказской железной дороги в районе п. Головинка (а) и последствия шторма 26 октября 2024 г. на перегоне Адлер — Хоста (б)

На рассматриваемом участке система берегозащиты традиционно представлена галечными пляжами, бетонными волноотбойными стенами, бунами (каменными или из бетонных блоков) и фасонными массивами.

Волноотбойные стены сооружались для защиты берега от разрушительного воздействия волн с глубокой древности. Первые стены, построенные из простой каменной кладки без фундамента, были недолговечны и быстро разрушались под воздействием стихии. Со временем конструкция этих сооружений претерпела значительные изменения. Современные морские подпорно-волноотбойные стены представляют собой сложные инженерные сооружения из железобетона, обладающие прочным, глубоко заложённым фундаментом и многоступенчатым профилем. Также для улучшения эксплуатационных характеристик фасада стены могут оснащаться стеклопластиковыми панелями.

Подпорно-волноотбойная стена выполняет двойную функцию:

1. Принимает на себя воздействие волн, предотвращая размыв земляного полотна железной дороги со стороны моря.
2. Служит подпорным сооружением с нагорной стороны, предотвращая осыпание грунта под воздействием вибраций от движения поездов и естественных оползневых явлений.

Строительство волноотбойных стен из железобетона считалось оптимальным решением для защиты береговой линии и обосновывалось заменой податливых к эрозии пород более прочным материалом [1]. Однако этот подход не всегда эффективен: практический опыт показал, что на некоторых участках волноотбойные стены выходят из строя менее чем через 15 лет эксплуатации. Анализ разрушений на таких участках выявил усадку отдельных бетонных блоков под действием собственного веса, вызванную подмывом основания стены. В ряде случаев это приводило к их обрушению в сторону моря. На участках, характеризующихся продольным перемещением наносов при отсутствии бун, были зафиксированы также случаи образования сквозных щелей высотой до 0,4 м с последующим вымыванием грунта из-за стены и ее опрокидыванием в сторону суши [2].

Данные явления возникают ввиду нескольких причин, одной из которых является то, что в результате работы стен происходит размыв и сокращение ширины пляжа. На некоторых участках рассматриваемого пути пляж имеет ширину всего 5–7 м (например, на перегоне Мамедова Щель — Лазаревское), при этом сочетание приглубого берега и галечных наносов способствует усилению гидродинамического ударного воздействия волн, особенно на уровне половины высоты прилива, и в некоторых случаях такое воздействие может превышать допустимые нагрузки для железобетонных конструкций, о чем свидетельствует характер разрушений. Кроме того, при ударе волны о стену мгновенно возникает сильный обратный поток, увлекающий за собой гальку и песок на глубину. Скорость этого потока может значительно превышать скорость течения в отсутствие стены, что приводит к усиленному размыву пляжа, деградация которого, в свою очередь, усиливает эрозионные процессы

на подводном склоне, что и ведет к деформации стены, снижению ее эксплуатационных характеристик и, как следствие, — деформации и даже разрушению железнодорожной насыпи.

В свою очередь, сам пляж также служит естественной защитой, постепенно рассеивая энергию накатывающихся волн без образования отраженной волны. Поэтому метод организации берегозащиты в виде интеграции инженерных сооружений в естественный рельеф является перспективным и востребованным, о чем также свидетельствуют отечественные и зарубежные исследования и публикации в области берегового строительства.

Методы и инструменты компьютерного моделирования гидродинамических процессов

Рассмотрим моделирование взаимодействия волн с неподвижными структурами. Современная вычислительная гидродинамика располагает рядом методов для проведения компьютерных экспериментов в рамках решения подобных задач.

Линейные и слабо нелинейные задачи взаимодействия волн и конструкций могут быть рассчитаны с высокой точностью и экономичностью с помощью уравнения потенциального течения для невязких безвихревых потоков. Однако этот метод имеет ограничения в обработке сильно нелинейных волн и ситуаций, связанных с явлениями разрушения волн. Взаимодействие волн второго порядка с неподвижными и плавающими конструкциями успешно исследовалось и рассматривалось в ряде отечественных и иностранных публикаций. Высокоточные вычислительные методы динамики жидкости, основанные на эйлерово-лагранжевой форме уравнений Навье — Стокса, с использованием сеточного или бессеточного подходов, предлагают альтернативные пути для решения этих сильно нелинейных задач [3].

Сеточные подходы используют метод конечных разностей (FD), метод конечных объемов (FV) или метод конечных элементов (FE) для пространственной дискретизации уравнений течения и получения численных решений. Сеточный подход реализован в таких программных продуктах, как SolidWorks Flow Simulation и Ansys Fluent (FV), а также Comsol Multyphysics (FE). Бессеточный подход может быть реализован с помощью перспективного метода — гидродинамики сглаженных частиц (SPH), разработанного изначально для применения в газодинамических расчетах в астрофизике, но в настоящее время широко используемого во многих других областях исследований для решения задач моделирования генерации гидродинамических волн и взаимодействия волн с подвижными и неподвижными структурами. Метод SPH реализован в таких программных продуктах, как LS-DYNA, или бесплатной решающей программе с открытым кодом DualSPHysics, которая используется в настоящем исследовании. Данная

программа хорошо зарекомендовала себя в решении подобного рода задач. В частности, достоверность метода доказана в исследовании группы ученых из Университета Дипонегоро [4]. Также группа ученых из Университета Калабрии использовала двухмерную SPH-модель для моделирования взаимодействия волн с проницаемым волноломом [5].

Суть метода SPH — разбиение жидкости на дискретные элементы-частицы. Любая физическая величина любой частицы может быть получена путем суммирования соответствующих величин всех частиц, которые находятся в пределах двух радиусов сглаживания, с помощью функции ядра.

Компьютерный эксперимент

Для оценки воздействия гидродинамических факторов на железнодорожные конструкции был проведен численный эксперимент. На основе данных о рельефе дна на рассматриваемом участке была составлена его твердотельная модель, затем с помощью генератора длинных волн моделировались 6-балльные штормовые волны и производился сравнительный анализ конструкций береговых сооружений. Эксперимент проводился для двух конфигураций расчетной модели (рис. 2):

1. Классическая конструкция с подпорно-волноотбойной стеной.
2. С размещением железнодорожных путей на эстакаде.

Сооружения, подобные представленному в конфигурации 2, используются для защиты железнодорожного пути на периодически подтапливаемых участках и интеграции инженерных сооружений в естественный рельеф.

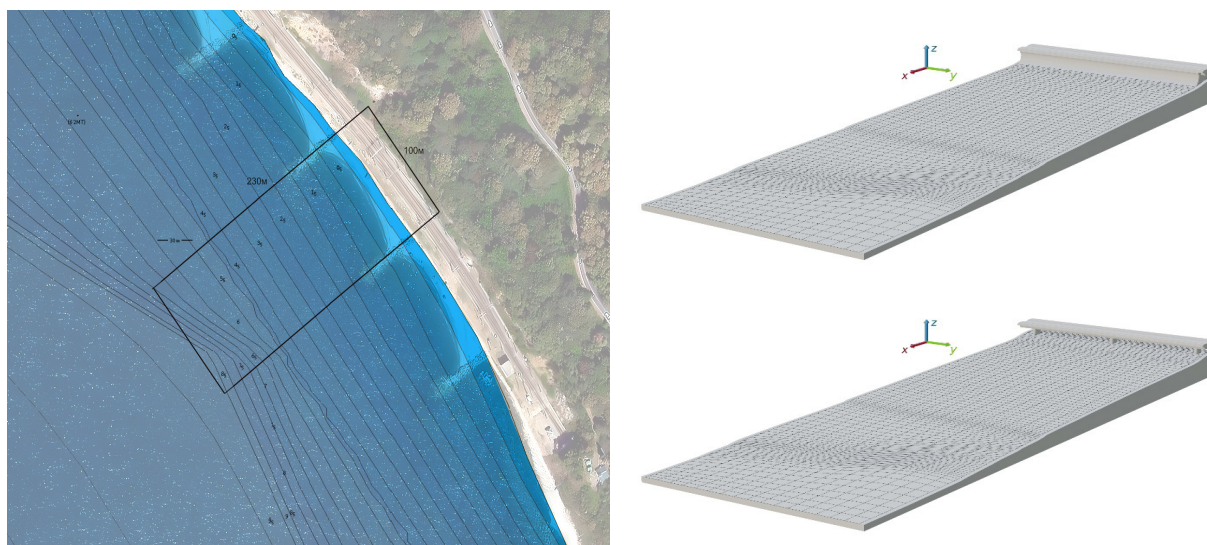


Рис. 2. Карта лоции рассматриваемого участка и компьютерная модель

В качестве примеров подобных конструкций можно привести эстакаду на Треслс Бич (Калифорния, США) — небольшой участок железнодорожного пути на подтапливаемом участке берега в устье Сан-Матео-Крик. Другим ярким примером служит эстакада, построенная на протяженной периодически затапливаемой отмели, ведущая к мосту через пролив Памбан между мысом Рамнад и островом Рамешварам (Индия). Отмель является частью Моста Рамы — геологически примечательного возвышения песчаного морского дна в виде вереницы отмелей и островков протяженностью 48 км между Индией и Шри-Ланкой, местами выступающей небольшими островками, но в высокий прилив ее большая часть лежит под водой на глубине от 1 до 1,25 м (незатапливаемые участки указанного участка дороги имеют классические железобетонные волноотбойные стены). Также стоит отметить подобные конструкции на железной дороге SGR (национальный парк Тсаво, Кения), построенной в 2022 г. китайскими инженерами: хотя в данном случае не стояла задача берегозащиты, проект содержит исключительно протяженные и высокие эстакады, возведенные для минимизации влияния железнодорожного движения на дикую природу Африки (дорога проходит через природоохранную зону, и, таким образом, при строительстве необходимо было решить задачу интеграции в естественный ландшафт).

В общем виде расчетная модель (рис. 3) состоит из основания 1, генератора волн 2, подводного склона 3, пляжа 4, берегового инженерного сооружения 5 (в данном случае — волноотбойной стены) и двухфазной среды 6. Модель также предусматривает возможность добавления волноломов разной конфигурации и подвижных объектов.



Рис. 3 Общий вид расчетной модели

В ходе компьютерного эксперимента была выполнена симуляция со следующими параметрами.

В качестве функции сглаживающего ядра была использована функция Вендланда [6], которая имеет ряд преимуществ перед функцией Гаусса, кубическим или В-сплайном, часто используемыми в данном методе [7]. Функция имеет вид:

$$W(r, h) = \frac{7}{4\pi h^2} \left(1 - \frac{r}{2h}\right)^4 \left(\frac{2r}{h} + 1\right),$$

где r — расстояние между любыми двумя частицами,

h — радиус сглаживания, в предварительном расчете принятый равным 0,05 м.

В расчете использовался симплектический интегратор, время симуляции составляло 60 с. Граничные условия моделирования были заданы методом динамических граничных условий. В данном методе граничные частицы подчиняются тем же уравнениям, что и частицы жидкости, однако они не движутся под действием приложенных к ним сил. Вместо этого они остаются либо неподвижными, либо движутся в соответствии с заданной функцией движения (в данном случае — функции движения генератора волн).

В эксперименте был использован генератор волн второго порядка, основанный на теории генерации длинных волн Мадсена [8], не требующей существенных вычислительных ресурсов, при этом обеспечивающей эффективность и точность для волн первого и второго порядка. Коэффициент искусственной вязкости по Монагану был принят равным $\alpha = 0,001$ [9]. Глубина у подножия подводного склона — 9 м, дистанция — 200 м.

В результате эксперимента были получены распределения избыточного давления и скоростей потока (рис. 4). Сравнение эпюр показало, что волноотбойная стена увеличивает скорость обратного потока в 1,5–2 раза и таким образом действительно способствует вымыванию грунта. Также данный расчет позволяет определить силу воздействия волн на элементы сооружений (рис. 5).

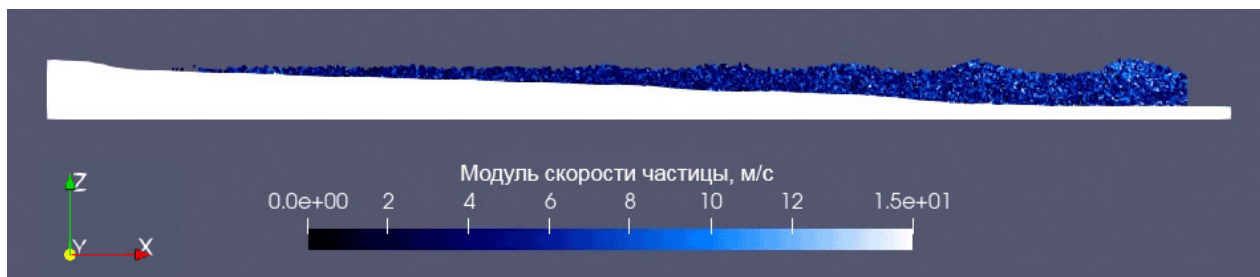


Рис. 4. Генерация волн в центральном сечении участка

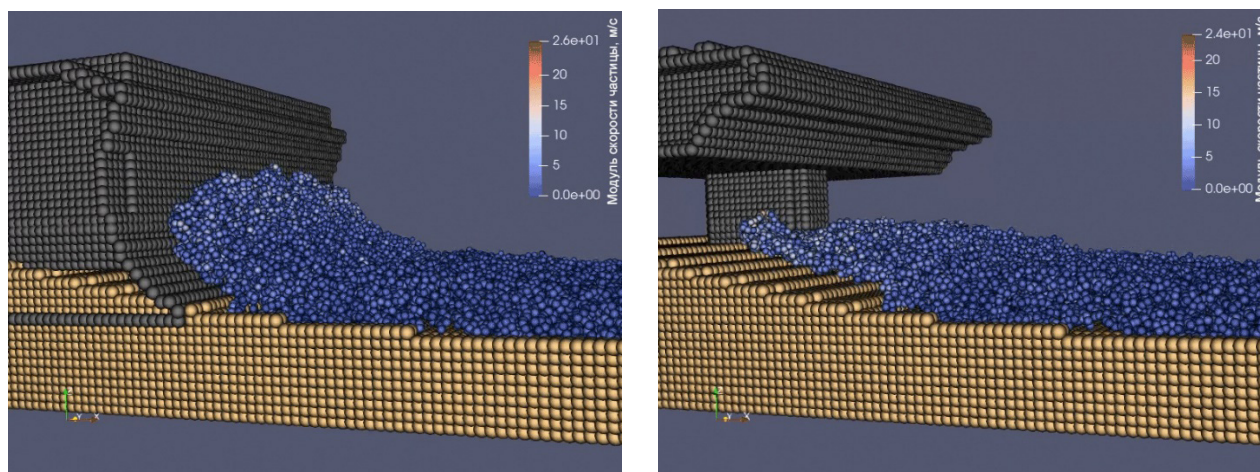


Рис. 5. Набегание волны на опору эстакады и волноотбойную стену

На рис. 6, 7 показаны эпюры изменения проекций вектора скорости потока на ось X по времени, в центральном сечении участка, в точках, соответствующих глубине 0,5, 1 и 1,5 м. Отрицательные значения показывают движение воды в сторону берега, положительные — в сторону моря. Интересен вид графиков в правой части, после отметки 4 с: при сравнении видно бóльшую скорость обратного потока на рис. 6, соответствующем конфигурации 1 модели с волноотбойной стеной, вызванную отражением набегающей волны.

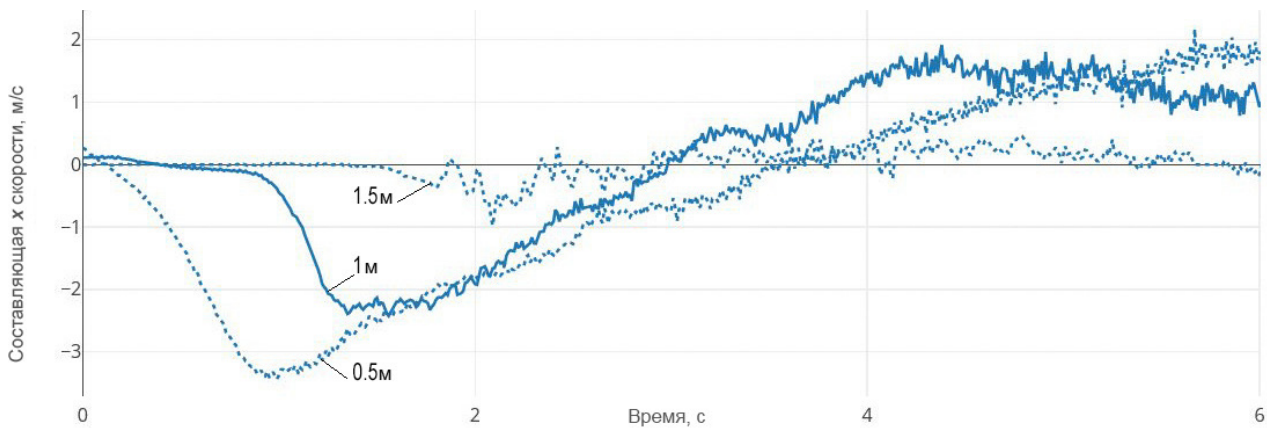


Рис. 6. Эпюры скоростей потока для конфигурации модели 1 (с волноотбойной стеной)

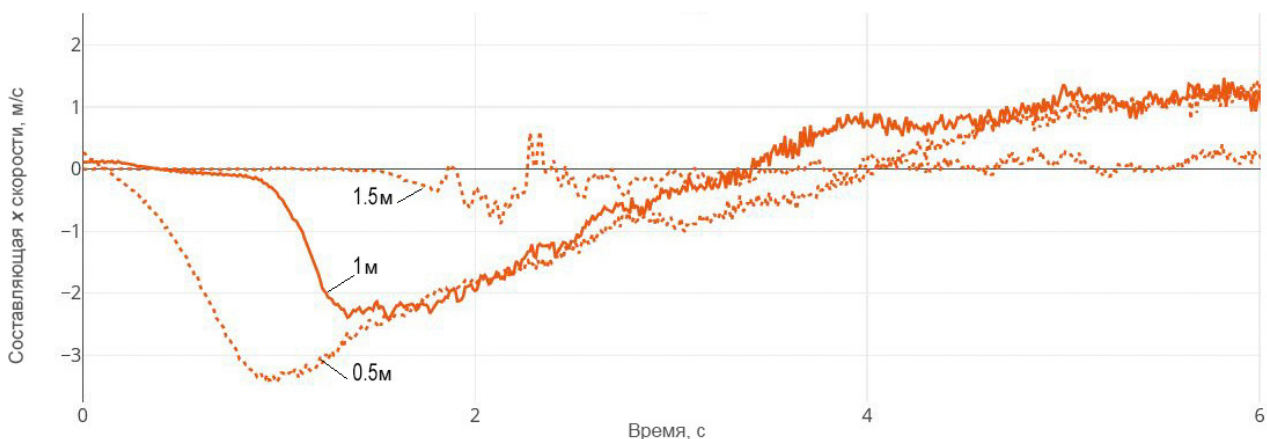


Рис. 7. Эпюры скоростей потока для конфигурации модели 2 (с эстакадой)

Результирующая сила, с которой набегающая волна воздействует на береговое сооружение, может быть получена как произведение избыточного давления на смоченную поверхность стенки сооружения. В силу конструктивных особенностей оба параметра для опор эстакады будут всегда меньше, чем для участка волноотбойной стены на аналогичной длине железнодорожного пути, а следовательно — и силовое воздействие волн, что наглядно показывают приведенные на рис. 8, 9 графики.

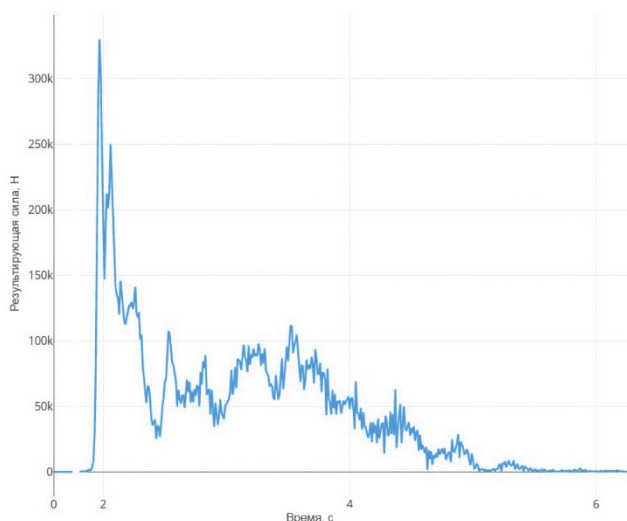


Рис. 8. Результирующая сила для конфигурации 1

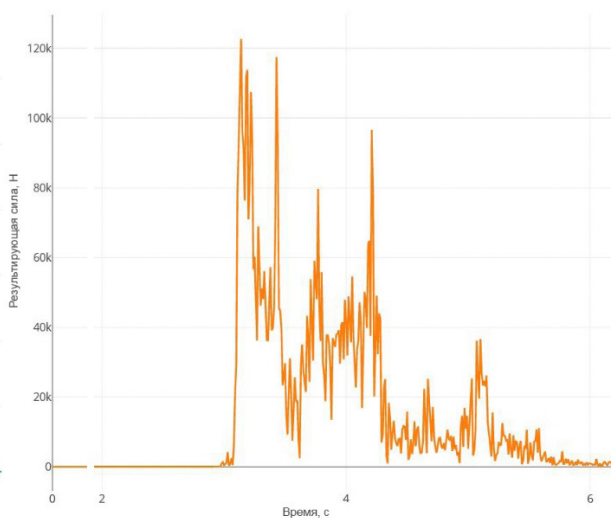


Рис. 9. Результирующая сила для конфигурации 2

Заключение

Выполнено численное моделирование воздействия штормовых волн на берегозащитные сооружения и конструкции железнодорожного пути в районах интенсивного воздействия прибрежных штормовых приливов. Оценена интенсивность воздействия гидродинамических факторов на элементы конструкций и косвенное влияние сооружений на эрозию берега

Построена карта распределения скоростей потока и избыточного давления для набегающей и отраженной волны на примере участка берега. Исследование показало преимущества интеграции береговых железнодорожных сооружений в естественный ландшафт.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Список источников

1. Серебряков Г. Б. Обзор методов берегозащиты на Черноморском побережье России / Г. Б. Серебряков, Н. А. Гришин // Архитектура Сочи. — URL: <https://arch-sochi.ru/2012/10/obzor-metodov-beregozashhityi-na-chernomorskom-poberezhe-rossi>.
2. Ашпиз Е. С. Защита железнодорожного пути линии Туапсе - Адлер от опасных склоновых процессов / Е. С. Ашпиз, А. Н. Савин, В. А. Явна // Железнодорожный транспорт: научно-теоретический технико-экономический журнал. — 2017. — № 7. — С. 52–57.

3. Ouyang Z. Two-Phase Smoothed Particle Hydrodynamics Modelling of Hydrodynamic-Aerodynamic and Wave-Structure Interaction / Z. Ouyang, B. C. Khoo // *Energies* 2022. — Apr 28. — Vol. 15(9). — P. 3251. — DOI:10.3390/en15093251.
4. Trimulyono A. Numerical simulation of water wave propagation using DualSPHysics / A. Trimulyono, B. R. Dhanureski, S. Samuel et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2024. — Vol. 1298. — Iss. 1. — Pp 1–9. — DOI: 10.1088/1755-1315/1298/1/012002.
5. Meringolo D. SPH numerical modeling of wave-perforated breakwater interaction / D. Meringolo, F. Aristodemo, P. Veltri // *Coastal Engineering*. — 2015. — Vol. 101. — Pp 48–68. — DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.04.004.
6. Wendland H. Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree / H. Wendland // *Advances in Computational Mathematics*. — 1995. — Vol. 4(1). — Iss. 1. — Pp. 389–96. — DOI: 10.1007/BF02123482.
7. Macià F. Benefits of using a Wendland Kernel for free-surface flows / F. Macià, A. Colagrossi, M. Antuono et al. // 6th ERCOFTAC SPHERIC workshop on SPH applications, Hamburg, Germany, June, 08–10 2011. — URL: https://www.researchgate.net/publication/303637287_Benefits_of_using_a_Wendland_kernel_for_free-surface_flows.
8. Madsen O. S. On the generation of long waves / Madsen O. S. // *Journal of Geophysical Research*. — 1971. — Vol. 76(36). — Pp. 8672–8683. — DOI: 10.1029/JC076i036p08672.
9. Trimulyono A. et al. Sensitivity analysis of SPH parameters for long-distance water wave propagation / A. Trimulyono et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1198. — 2023. — DOI: 10.1088/1755-1315/1198/1/012001.

Дата поступления: 08.12.2024

Решение о публикации: 31.01.2025

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, проф.; nttk@pgups.ru

ВАТАЕВ Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; avataev@yandex.ru

ВАТУЛИН Ян Семенович — канд. техн. наук, доц.; avataev@yandex.ru

МАЙОРОВ Владимир Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; mayorov.pgups@gmail.com

КРАСНОБРЫЖИЙ Станислав Андреевич — канд. техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

On the Issue of Hydrodynamic Forces Acting on Coastal Railway Structures

A. A. Vorobev, A. S. Vataev, Ya. S. Vatulin, V. S. Mayorov, S. A. Krasnobryzhiy

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Vorobiev A. A., Vataev A. S., Vatulin Y. S., Mayorov V. S., Krasnobryzhiy S. A. On the Issue of Hydrodynamic Forces Acting on Coastal Railway Structures. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 119–130. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-119-130

Summary

Purpose: Numerical modelling of the storm wave impact on the coastal protection structures and railway tracks in the areas of intensive coastal storm tides has been performed. The intensity of the hydrodynamic impact on structural elements and the indirect effect of man-made structures on coastal erosion have been evaluated. **Methods:** Computer simulation by SPH method. **Results:** A map of the sea-wave velocity and overpressure distribution for incoming and reflected waves for a coastline zone has been built. The study has shown the benefits of inserting coastal rail facilities in the natural landscape. **Practical significance:** A comparative analysis of the stated-above hydrodynamic impact on the standard and alternative railtrack substructure in the coastal area has been conducted.

Keywords: Hydrodynamics of smoothed particles, retaining walls, railway structures, track substructure, trestle.

References

1. Serebryakov G. B., Grishin N. A. Obzor metodov beregozashchity na Chernomorskom poberezh'e Rossii [Review of coastal protection methods on the Black Sea coast of Russia]. *Arkhitektura Sochi* [Architecture of Sochi]. Available at: <https://arch-sochi.ru/2012/10/obzor-metodov-beregozashhityi-na-chernomorskom-poberezhe-rossi>. (In Russian)

2. Ashpiz E. S., Savin A. N., Yavna V. A. Zashchita zheleznodorozhnogo puti linii Tuapse - Adler ot opasnykh sklonovykh protsessov [Protection of the Tuapse - Adler railway line from dangerous slope processes]. *Zheleznodorozhnyy transport: nauchno-teoreticheskiy tekhniko-ekonomicheskii zhurnal* [Railway transport: scientific-theoretical technical and economic journal]. 2017, Iss. 7, pp. 52–57. (In Russian)

3. Ouyang Z., Khoo B. C. Two-Phase Smoothed Particle Hydrodynamics Modelling of Hydrodynamic-Aerodynamic and Wave-Structure Interaction. *Energies* 2022, Apr 28, vol. 15(9), p. 3251. DOI:10.3390/en15093251.

4. Trimulyono A., Dhanureski B. R., Samuel S. et al. Numerical simulation of water wave propagation using DualSPHysics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, vol. 1298, Iss. 1, pp 1–9. DOI: 10.1088/1755-1315/1298/1/012002.

5. Meringolo D., Aristodemo F., Veltri P. SPH numerical modeling of wave-perforated breakwater interaction. *Coastal Engineering*, 2015, vol. 101, pp 48–68. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.04.004.

6. Wendland H. Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in Computational Mathematics*, 1995, vol. 4(1), Iss. 1, pp. 389–96. DOI: 10.1007/BF02123482.

7. Macià F., Colagrossi A., Antuono M. et al. Benefits of using a Wendland Kernel for free-surface flows. 6th ERCOFTAC SPHERIC workshop on SPH applications, Hamburg, Germany, June, 08–10 2011. Available at: https://www.researchgate.net/publication/303637287_Benefits_of_using_a_Wendland_kernel_for_free-surface_flows.

8. Madsen O. S. On the generation of long waves. *Journal of Geophysical Research*, 1971, vol. 76(36), pp. 8672–8683. DOI: 10.1029/JC076i036p08672.

9. Trimulyono A. et al. Sensitivity analysis of SPH parameters for long-distance water wave propagation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1198, 2023. DOI: 10.1088/1755-1315/1198/1/012001.

Received: December 08, 2024

Accepted: January 31, 2025

Author's information:

Alexander A. VOROBIEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; nttk@pgups.ru

Andrey S. VATAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; avataev@yandex.ru

Jan S. VATULIN — PhD in Engineering, Associate Professor; yan-roos@yandex.ru

Vladimir S. MAYOROV — PhD in Engineering, Associate Professor; mayorov.pgups@gmail.com

Stanislav A. KRASNOBRYZHIY — PhD in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru

УДК 355.691.21+656.2

О повышении надежности элементов пневматической части тормозной системы грузового вагона

В. Ф. Куликов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Куликов В. Ф. О повышении надежности элементов пневматической части тормозной системы грузового вагона // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 131–148. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-131-148

Аннотация

Цель: Выполнить расчетную оценку путей повышения надежности элементов пневматической части тормозной системы (ТС) грузового вагона, включая магистральный воздухопровод, места его крепления, безрезьбовые соединения и воздухораспределитель. Особое внимание уделено анализу отказов, связанных с потерей герметичности безрезьбового соединения участков воздухопровода и засорением отверстий тормозных приборов. **Методы:** Расчет прочности воздухопровода при внутреннем давлении с учетом температурных эффектов и коррозионной стойкости сталей; частотный анализ колебаний воздухопровода в SolidWorks Simulation для определения оптимального числа точек крепления; моделирование напряженно-деформированного состояния уплотнительных колец из резины и композита «Констафтор 200» при различных температурах. **Результаты:** Установлено, что запас прочности магистрального воздухопровода к внутреннему давлению ($n = 67$) значительно превышает требуемый минимум ($n = 5$). Это позволяет снизить массу конструкции за счет уменьшения толщины труб без ущерба надежности. Разработана регрессионная зависимость частоты собственных колебаний воздухопровода от расстояния между креплениями: $f_1 = 215,04 \cdot \exp(-0,95 \cdot \Delta l)$. Для исключения резонанса рекомендовано не менее 5 точек крепления при длине трубы 12 м. Показано, что замена резиновых уплотнений на «Констафтор 200» снижает максимальные деформации в 300 раз (с 0,6 мм до 0,0022 мм) и повышает герметичность соединений при экстремальных температурах (-60°C). **Практическая значимость:** Предложены меры по оптимизации конструкции: уменьшение толщины труб, увеличение числа креплений, замена материала уплотнений. Рекомендована химическая обработка внутренней поверхности труб для предотвращения засорения тормозных приборов. Реализация результатов повысит надежность тормозных систем грузовых вагонов, сократит эксплуатационные расходы и риск аварийных ситуаций.

Ключевые слова: Тормозная система, грузовой вагон, расчетное обоснование, воздухораспределитель, надежность элементов.

Введение

Анализ данных по причинам отказов пневматической части тормозной системы (ТС) показал, что одним из наиболее часто встречающихся видов отказов является неисправность воздухораспределителя (ВР). Причем в большинстве случаев они связаны с нарушением целостности резиновых уплотнительных элементов (разрывы, надрывы, расслоения и т. п.) или забивкой отверстий во внутренней полости ВР. Вместе с отказами тормозной магистрали и арматуры тормозного оборудования они составляют от 82 до 87 % от общего числа [1].

Цель работы заключалась в расчетной оценке путей повышения надежности элементов пневматической части ТС грузового вагона с привлечением опубликованных в открытой печати экспериментальных данных. В число рассматриваемых элементов ТС были включены магистральный воздухопровод, подвергнутый действию внутреннего давления, места крепления воздухопровода к раме, уплотнительный элемент безрезьбового соединения участков воздухопровода и ВР с забитыми отверстиями.

Прочность магистрального воздухопровода к действию внутреннего давления

Магистральный воздухопровод и подводящие трубки предназначены для подачи сжатого воздуха от компрессора к исполнительным приборам ТС. При этом в тормозной магистрали (ТМ) применяются два типоразмера труб [2]:

- магистральная труба — наружный диаметр 42 мм, толщина стенки 4 мм;
- подводящие трубки — наружный диаметр 27 мм, толщина стенки 3,2 мм.

В ТМ грузового вагона используются бесшовные холоднокатанные трубы по ГОСТ 8734—75. Согласно данному ГОСТу, используемые трубы относятся к толстостенным. Марки сталей, допускаемых к изготовлению труб ТМ, и нормируемые показатели основных механических свойств для этих марок установлены требованиями ГОСТ 8733—74 [3] и приведены в табл. 1, в которой приняты следующие обозначения: σ_b — предел прочности на растяжение; σ_T — предел текучести при растяжении; δ_5 — относительное удлинение при разрыве; HV — твердость по Бринеллю (при толщине стенки более 10 мм).

Основными нагрузками, действующими на воздухопроводы ТМ грузового вагона, являются внутреннее давление сжатого воздуха, вибрационная нагрузка и сборочные усилия в местах соединений. Запас прочности к действию внутреннего давления вычисляется по величине предельного давления P , определяемого моментом выхода пластических деформаций на наружную поверхность трубы. В качестве сопутствующего фактора выступает температура воздуха, которая по условиям эксплуатации может варьироваться от минус 60 до плюс 60 °С.

Используются различные модели для описания поведения материала воздухопровода (зависимость «напряжение — деформация»), которые приводят к различным соотношениям для вычисления предельного давления P . Так, для несжимаемого идеально-пластического материала предельное давление P определяется из соотношения [5, 6]:

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \ln \frac{d_H}{d_{BH}},$$

где d_H и d_{BH} — наружный и внутренний диаметр соответственно.

ТАБЛИЦА 1. Марки сталей и основные механические характеристики [3, 4]

Марка стали	Механическая характеристика					
	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	НВ	E^* , МПа	λ
10	343	206	24	137	569	0,9972
20	412	245	21	156	792	0,9960
35	510	294	17	187	1263	0,9937
45	589	323	14	207	1882	0,9906
10Г2	422	245	22	197	801	0,9960
15Х	412	—	19	179	—	—
20Х	431	—	17	179	—	—
40Х	618	—	14	217	—	—
30ХГСА	491	—	18	229	—	—
15ХМ	431	226	21	179	971	0,9951

Примечание. Прочерк у величины σ_T означает отсутствие требований.

Для сравнения: использование для описания диаграммы «напряжение — деформация» модели с линейным упрочнением приводит к следующему соотношению для вычисления предельного давления P^* [5, 6]:

$$P^* = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} \left[2\lambda \ln \frac{d_H}{d_{BH}} + (1 - \lambda) \left(\frac{d_H^2}{d_{BH}^2} - 1 \right) \right].$$

Для материала с линейным упрочнением используются величины модуля упрочнения E^* и параметра упрочнения λ , определяемых по следующим соотношениям [5, 6]:

$$E^* = \frac{\sigma_b - \sigma_T}{\delta_5 + \frac{\sigma_b - \sigma_T}{E}}, \lambda = 1 - \frac{E^*}{E}.$$

Здесь E — модуль упругости стали, величина которого в расчетах принята равной $2 \cdot 10^5$ МПа. Рассчитанные величины E^* и λ также приведены в табл. 1. При значении $\lambda = 1$ имеем модель идеально-пластического материала.

Атмосферостойкость низколегированных сталей оценивается по величине индекса коррозионной стойкости CI [7]:

$$CI = 26,01 \cdot Cu + 3,88 \cdot Ni + 1,20 \cdot Cr + 1,49 \cdot Si + 17,28 \cdot P - 7,29 \cdot Cu \cdot Ni - 9,10 \cdot Ni \cdot P - 33,39 \cdot Cu^2.$$

Граничным значением данного показателя является 6 [8]. Если значение CI меньше 6, то сталь не является атмосферостойкой. Полученные значения данного критерия для сталей по ГОСТ 8733—74 при максимальном содержании элементов приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Содержание элементов в сталях и индекс СІ [4]

Марка стали	Содержание элементов					Индекс СІ
	Cu	Ni	Cr	Si	P	
10	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,15	0,17–0,37	≤ 0,035	6,5
20	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,25	0,17–0,37	≤ 0,035	6,7
35	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,25	0,17–0,37	≤ 0,035	6,7
45	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,25	0,17–0,37	≤ 0,035	6,7
10Г2	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	0,17–0,37	≤ 0,035	6,7
15Х	≤ 0,30	≤ 0,30	0,70–1,00	0,17–0,37	≤ 0,035	7,5
20Х	≤ 0,30	≤ 0,30	0,70–1,00	0,17–0,37	≤ 0,035	7,5
40Х	≤ 0,30	≤ 0,30	0,80–1,10	0,17–0,37	≤ 0,035	7,7
30ХГСА	≤ 0,30	≤ 0,30	0,80–1,10	0,90–1,20	≤ 0,025	8,8
15ХМ	≤ 0,30	≤ 0,30	0,80–1,10	0,17–0,37	≤ 0,035	7,7

Как видно из табл. 2, для всех рассматриваемых сталей индекс СІ имеет величину, большую 6. То есть данные стали являются атмосферостойкими. Однако необходимо отметить, что расчет индекса СІ для средних значений содержания элементов (нижняя граница диапазона изменения содержания равна нулю) и нижнего значения оговоренного диапазона (для Cr и Si) дает существенно меньшие величины. Так, для стали 10, например, приведенное значение СІ = 6,5 уменьшается до величины 4,2. То есть сталь является неатмосферостойкой. Также уменьшается значение СІ для всех других сталей, переводя их в разряд неатмосферостойких.

Исследования коррозионной стойкости стали 10, результаты которых изложены в работе [9], показали, что образцы имеют повреждение в виде питтинговой коррозии. То есть данные исследования подтверждают факт необходимости осуществления мероприятий по нанесению защитных покрытий поверхностей воздухопровода, изготовленного из сталей, регламентированных ГОСТ 8733—74.

Еще один момент заключается в контроле качества трубы после ремонта ТС. Очистка внутреннего канала магистрального воздухопровода осуществляется механическим способом. Для чего трубу обстукивают деревянным молотком и пропускают ерш. Состояние внутреннего канала воздухопровода после чистки оценивается путем пропускания металлического шарика диаметром (28_{-1}) мм, что для внутреннего диаметра 34 мм слишком мало. Про подводящие трубки ничего не сказано [10].

Такой подход к качеству наружной и внутренней поверхности воздухопровода (магистральные и подводящие трубы) не исключает наличие на них загрязнений различной природы (окалина, окислы и т. п.), которые могут при воздействии вибрации отделиться от металлической поверхности и попасть в тормозные приборы. Вследствие этого могут забиваться дроссельные отверстия. Более эффективной мерой по устранению загрязнения внутреннего пространства ТС может служить химическая

обработка труб последующим пассивированием. При выборе наиболее подходящего метода могут быть использованы рекомендации ИТС 36—2017 [11].

Влияние температуры сказывается на величине предела текучести материала. Чем выше температура, тем меньше значение предела текучести. Температура T окружающей среды учитывается путем введения коэффициента K_T , величина которого определяется с использованием справочных данных для применяемых материалов:

$$P^* = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} K_T \left[2\lambda \ln \frac{d_H}{d_{BH}} + (1 - \lambda) \left(\frac{d_H^2}{d_{BH}^2} - 1 \right) \right].$$

Коэффициент K_T представляет собой отношение величины предела текучести при данной температуре $\sigma_T(T)$ к значению предела текучести при 20 °С. То есть:

$$K_T = \frac{\sigma_T(T)}{\sigma_T(20\text{ °С})}.$$

Коэффициент запаса прочности определяется как отношение предельного давления к максимальному значению P_{\max} при эксплуатации с учетом добавки от прихода воздушной волны, то есть:

$$n = \frac{P^*}{P_{\max}}.$$

Расчеты прочности трубопровода проводятся для материала, предел текучести которого имеет наименьшее значение из числа используемых материалов. Согласно данным, приведенным в табл. 1, это сталь 10. Если требования по прочности для нее выполняются, то для остальных сталей они выполняются автоматически.

На рис. 1 показана зависимость K_T от температуры. Точками обозначены экспериментальные данные [4, 12, 13]. Сплошной линией показана аппроксимационная зависимость, полученная с помощью программы Sigma Plot v.12.5.

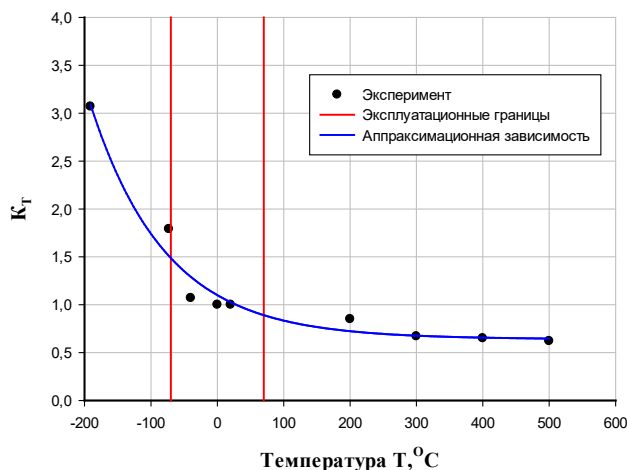


Рис. 1. Зависимость $K_T = f(T)$

Согласно расчету, зависимость коэффициента K_T от температуры T выглядит следующим образом:

$$K_T = 0,4479 e^{-0,0089T} + 0,6516 e^{-3,293 \cdot 10^{-5}T}.$$

Близость аппроксимационной кривой к экспериментальным точкам оценивается по величине коэффициента корреляции, который для данного соотношения получился равным 0,984, то есть достаточно близким к единице. В эксплуатационном диапазоне изменения температуры ± 60 °С (показан на рис. 1 красными линиями) минимальное значение коэффициента K_T реализуется при температуре 60 °С и равно 0,92.

Расчет величины предельного давления P^* дал следующий результат (для $T = +60$ °С):

$$P^* = \frac{206}{\sqrt{3}} 0,92 \left[2 \cdot 0,9972 \ln \frac{42}{34} + (1 - 0,9972) \left(\frac{42^2}{34^2} - 1 \right) \right] = 46,6 \text{ МПа}.$$

Расчет предельного давления P без учета упрочнения дал величину 44,7 МПа. Результаты практически совпадают, но это относится только к стали 10, поскольку разница между пределами текучести и прочности небольшая и значение параметра λ близко к единице.

Согласно [14] расчет магистрального воздухопровода необходимо проводить на давление $P_{тр} = 0,7$ МПа. Таким образом, запас прочности по предельному внутреннему давлению равен:

$$n = \frac{P^*}{P_{тр}} = \frac{46,6}{0,7} = 67.$$

Для оценки достаточности полученного запаса прочности с точки зрения обеспечения необходимого уровня надежности 0,995 рассмотрим модель «Нагрузка q — прочность r », которые являются случайными величинами [15]. В графическом виде данная модель показана на рис. 2.

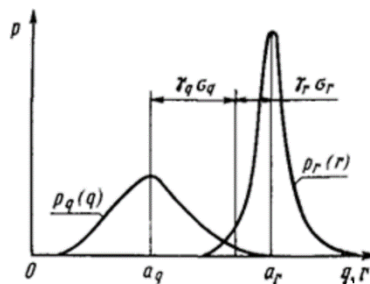


Рис. 2. Модель «Нагрузка q — прочность r »:

- P_q и P_r — плотность вероятности нагрузки и прочности соответственно;
- a_q и a_r — математические ожидания нагрузки и прочности соответственно;
- σ_q и σ_r — средние квадратичные отклонения нагрузки и прочности соответственно;
- γ_q и γ_r — гауссовский уровень надежности нагрузки и прочности соответственно

Данная модель для случая известных функций P_q и P_r позволяет рассматривать несколько подходов к назначению требуемого запаса — отношение математических ожиданий прочности и нагрузки, отношение минимального значения прочности к максимальному значению нагрузки и т. д.

Рассмотрим требуемый коэффициент запаса как отношение средних значений прочности q и нагрузки r при условии $\gamma_q = \gamma_r = \gamma$. В этом случае для определения требуемого запаса прочности $n_{\text{тр}}$ используется следующее соотношение [15]:

$$n_{\text{тр}} = \frac{1}{1 - \gamma^2 w_q^2} \left[1 + \sqrt{1 - (1 - \gamma^2 w_q^2)(1 - \gamma^2 w_r^2)} \right].$$

Здесь w_q и w_r — коэффициенты вариации нагрузки и прочности соответственно.

Коэффициенты вариации нагрузки и прочности меняются в достаточно широком диапазоне — от (1–2) % до (20–30) % [16]. Для проведения оценки достаточности коэффициента запаса прочности $n_{\text{тр}}$ примем коэффициенты вариации нагрузки и прочности равными максимальному значению 30 %. Согласно [15] величина требуемого запаса прочности для обеспечения надежности 0,995 должна быть не ниже 5,0. У нас запас прочности получен 67, то есть требования надежности по обеспечению прочности к действию внутреннего давления выполняются. Избыточность запаса прочности к действию давления представляет собой скрытый резерв для увеличения грузоподъемности состава. Для примера рассмотрим вариант изменения толщины магистрального воздухопровода ТС с 4 мм на 3 мм при сохранении наружного диаметра $d_{\text{н}} = 42$ мм. В этом случае внутренний диаметр становится равным $d_{\text{в}} = 36$ мм.

Расчеты по приведенным выше соотношениям показывают, что при уменьшении толщины магистрального воздухопровода на ~ 30 % происходит снижение величины предельного давления практически в два раза. Тем не менее запас прочности по отношению к максимальному рабочему давлению 0,7 МПа остается достаточно высоким $n = 49$, существенно, практически на порядок, превышающем требуемую величину $n_{\text{тр}} = 5$. Уменьшение толщины воздухопровода на 30 % приводит к уменьшению погонной массы на 0,864 кг/м. При использовании более прочной стали корректировка используемой толщины воздухопровода может дать больший эффект.

Расчет собственной частоты колебаний магистрального воздухопровода

В качестве расчетной схемы для определения характера изменения частоты собственных поперечных колебаний магистрального воздухопровода рассмотрим балку с шарнирно опертыми концами, показанную на рис. 3. Балка нагружена равномерно распределенной по длине l нагрузкой m_0 , равной распределенной массе трубы. Примем начало координат на левой опоре, то есть для нее $z = 0$. Обозначим через u поперечное перемещение балки.

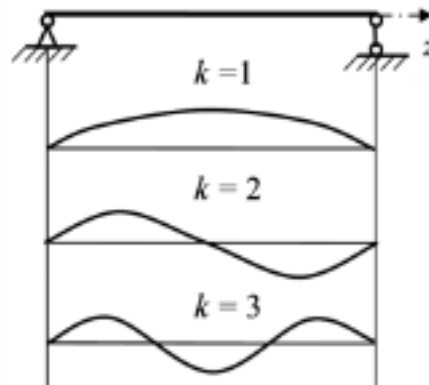


Рис. 3. Формы колебаний балки

Граничными условиями являются соотношения [17]:

– на левом конце балки $u(0) = 0$ и $\frac{d^2u}{dz^2}(0) = 0$;

– на правом конце балки $u(l) = 0$ и $\frac{d^2u}{dz^2}(l) = 0$.

Такие же условия предъявляются к участкам трубопровода в местах крепления. Частота собственных колебаний магистрального воздухопровода равна [17]:

$$f_k = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 k^2 \sqrt{\frac{EJ}{m_0}} = f_k = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 k^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho S}},$$

где E и ρ — модуль упругости и плотность стали;

J — момент инерции поперечного сечения;

S — площадь поперечного сечения;

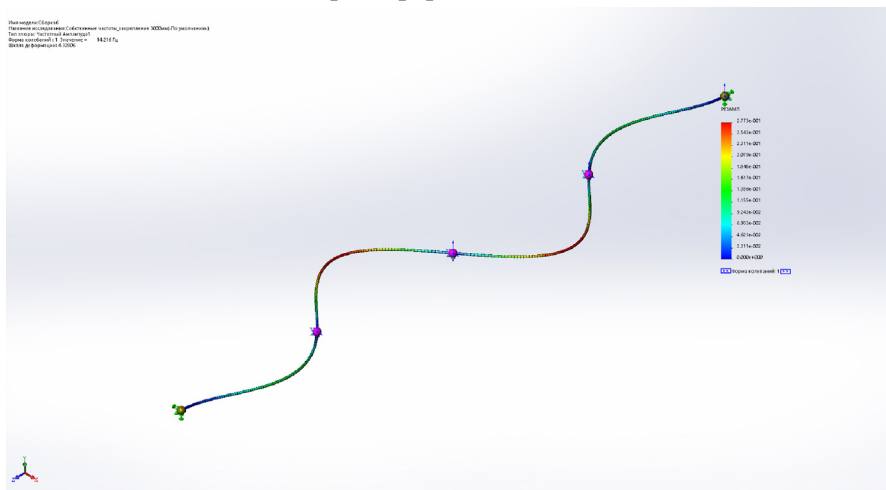
k — параметр формы колебаний (количество полуволн).

Величины E , ρ , J , S по условиям задачи являются постоянными величинами, характеризующими материал и форму поперечного сечения балки (воздухопровода).

Из данного соотношения следуют два положения. Во-первых, минимальная собственная частота колебания рассматриваемой балки соответствует первой форме колебаний $k = 1$ (см. рис. 3). Во-вторых, величина частоты обратно пропорционально зависит от величины l^2 — расстояния между опорами. То есть чем меньше расстояние, тем выше частота.

Для оценки влияния дополнительных мест крепления магистрального воздухопровода на величину собственной частоты первой формы колебаний был использован частотный анализ, реализованный в программном пакете SolidWorks Simulation.

Первая форма колебаний



Вторая форма колебаний

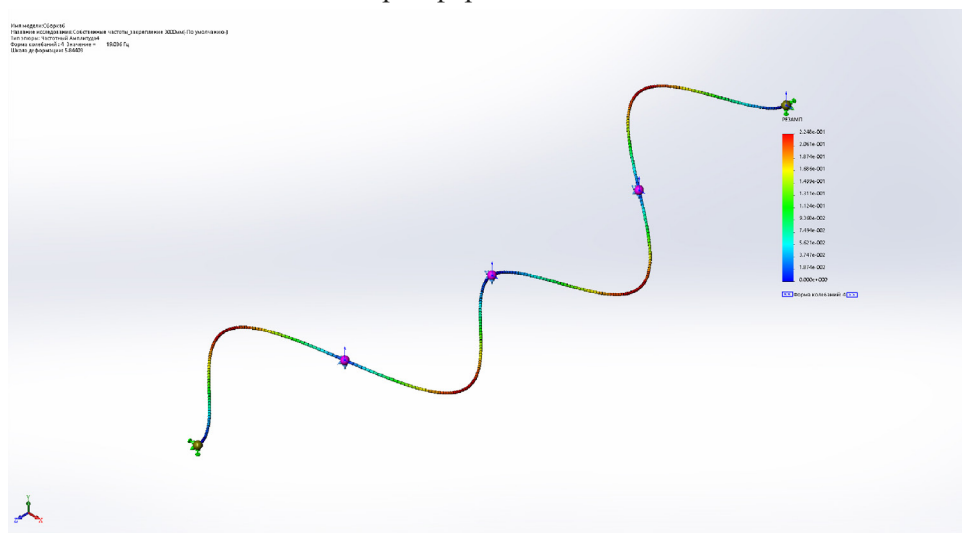


Рис. 4. Перемещения трубы при различных формах колебаний

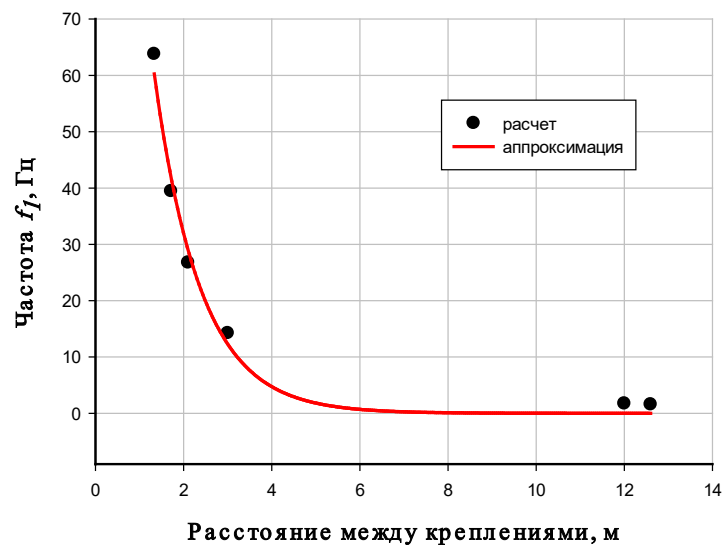
Для более наглядного представления внешнего вида воздухопровода в процессе колебаний была выбрана искаженная форма изгиба трубы с нереальными масштабами перемещений. На рис. 4 приведены распределения перемещений u при первой и второй формах колебаний воздухопровода для случая трех дополнительных мест его крепления.

Учитывая, что первая форма колебаний воздухопровода показывает наименьшие частоты, все дальнейшие расчеты для различного числа мест дополнительных креплений воздухопровода проводились для первой формы колебаний. В табл. 3 приведены результаты расчетов собственных колебаний трубы при различном количестве n мест дополнительного крепления магистрального воздухопровода. Расчеты проводились для длин трубы 12 м (основной вариант) и 12,6 м (дополнительный вариант). Наличие дополнительного варианта позволило увеличить число вариаций расстояний Δl между дополнительными и основными (крайними) опорами.

ТАБЛИЦА 3. Собственные частоты воздухопровода при различных n и l

l , м	n	l , м	f_1 , Гц
12,6	0	12,600	1,57
12,6	5	2,100	26,78
12,0	0	12,000	1,73
12,0	3	3,000	14,22
12,0	6	1,714	39,41
12,0	8	1,333	63,79

На рис. 5 показана зависимость $f_1 = f(\Delta l)$. Точками отмечены результаты расчетов.

Рис. 5. Зависимость $f_1 = f(\Delta l)$

Приведенная на рис. 5 аппроксимационная зависимость описывается следующим соотношением:

$$f_1 = 215,04 \exp(-0,95l).$$

Коэффициент корреляции $R = 0,983$, то есть данная зависимость достаточно хорошо описывает расчетные данные.

Для определения необходимого числа дополнительных мест закрепления магистрального воздухопровода воспользуемся результатами исследований ускорений и частот колебаний различных типов грузовых вагонов, представленных в работе [18]. Согласно этим данным частоты колебаний грузовых вагонов лежат в пределах от 1,5 до 18 Гц. То есть для предотвращения возникновения явления резонанса необходимо обеспечить расстояние между местами крепления воздухопровода не более 2,3 м (см. рис. 5). Для длины воздухопровода 12 м это реализуется при 5 и более дополнительных мест крепления.

Результаты расчета безрезьбового соединения воздухопроводов

Для расчета была взята муфта 4379-01, внешний вид которой в подготовленном для сборки состоянии показан на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид муфты 4379-01

В состав муфты 4379-01 входят: корпус 4379.00.02; гайка накидная 4370.00.04; кольцо 4370.00.05; шайба 4370.00.04 и кольцо уплотнительное 4370.00.06.

Герметизация соединения осуществляется за счет деформации уплотнительного кольца от действия сборочного усилия, создаваемого при навинчивании накидной гайки на корпус. Уплотнительное кольцо в рабочем состоянии оказывается под действием сборочного усилия со стороны накидной гайки, передаваемой через шайбу, внутреннего давления воздуха в тормозной магистрали и температурной деформации $\varepsilon_T = \alpha \Delta T$. Здесь α — коэффициент линейного расширения материала уплотнительного кольца (резина или «Констафтор 200» на основе фторопласта) и ΔT — разность температур сборки (20 °С) и эксплуатации (± 60 °С).

Для определения сборочного усилия P , создаваемого моментом затяжки накидной гайки M , было использовано следующее соотношение [19]:

$$P = \frac{M}{K_2},$$

где K_2 — коэффициент, зависящий от трения в резьбе и по опорной поверхности. В [19] даны рекомендации по определению данного коэффициента. При проведении расчетов сборочное усилие определялось по повороту накидной гайки на один виток, то есть по горизонтальному перемещению гайки на величину шага резьбы.

На рис. 7 показаны математическая модель муфты (а), которая с учетом условия симметричности представляет собой половину корпуса, и сетка конечных элементов (б, в). В программном пакете SolidWorks Simulation сетка строится автоматически.

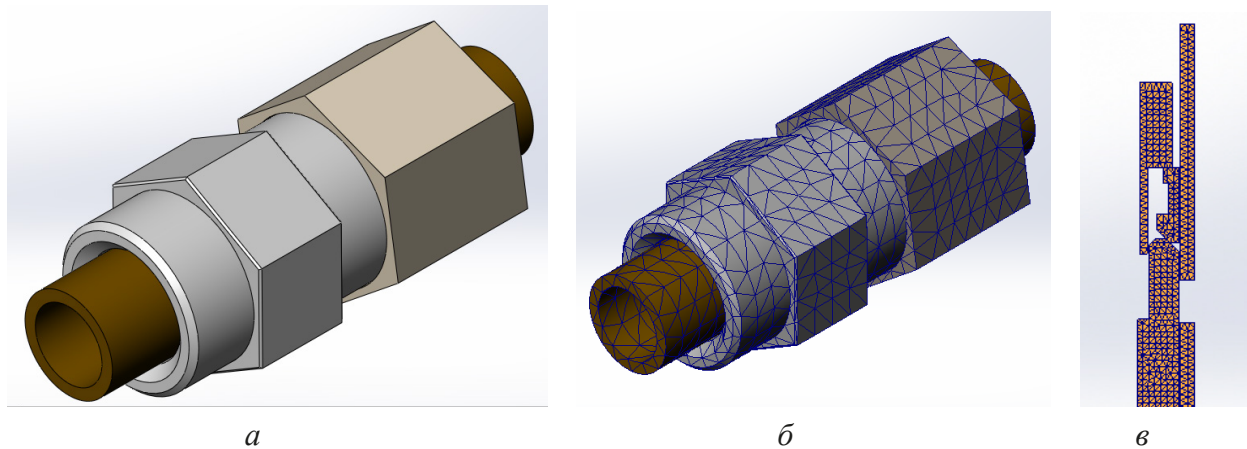


Рис. 7. Математическая модель муфты 4379-01

Материал уплотнительного кольца — резина 7-7130, которая изготавливается на основе каучука СКВ-18. В качестве альтернативного материала уплотнения безрезьбового соединения рассматривается «Констафтор 200», представляющий собой композиционный материал на основе фторопласта Ф4 и углерод-керамического наполнителя. Физико-механические характеристики данных материалов приведены в табл. 4 [20–23].

ТАБЛИЦА 4. Физико-механические характеристики материалов кольца 4374.00.06

Материал	Параметр			
	r	α , 1/С	σ_b , МПа	δ , %
Резина 7-7130	1,2	$24 \cdot 10^{-5}$	12	180
«Констафтор 200»	2,1–2,2	$8 \cdot 10^{-5}$	i	i

То есть по уровню температурных деформаций кольцо из резины в три раза нагружается сильнее, чем из «Констафтора 200» (по значению α).

На рис. 8 показана муфта 4379-01 с действующими нагрузками и расчетными эквивалентными деформациями, реализующимися в уплотнительном кольце в составе сборки при температуре минус 60 °С. С целью упрощения производимого расчета по программе SolidWorks Simulation рассмотрено напряженно-деформированное состояние только в уплотняющем кольце, поскольку напряжения в остальных деталях сборки не являются лимитирующими.

Видно, что деформации кольца в составе муфты 4379-01 имеют неравномерный характер. Полученные в результате расчетов максимальные значения перемещений u_{\max} и эквивалентных напряжений по Мизесу $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ для температур +60 °С, +20 °С и –60 °С приведены в табл. 5.

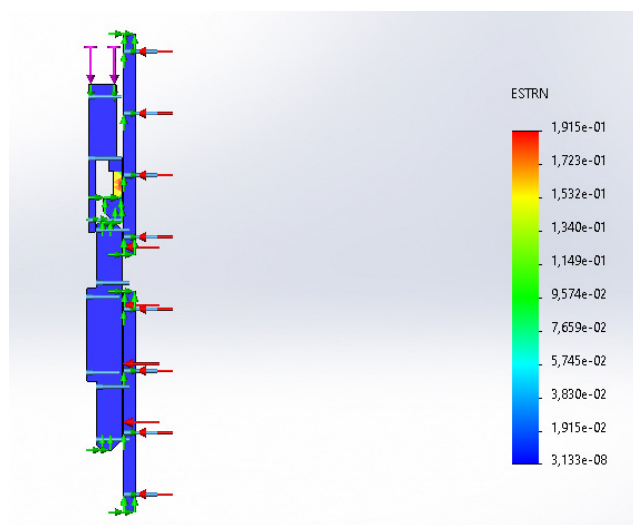


Рис. 8. Эквивалентные деформации кольца в составе муфты

ТАБЛИЦА 5. Максимальные перемещения и эквивалентные напряжения по Мизесу в уплотнительном кольце при разных температурах

Материал	Параметр	Температура, °С		
		Плюс 60	Плюс 20	Минус 60
Резина 7-7130	u_{\max} , мм	0,18	0,30	0,60
	$\sigma_{\text{эkv}}$, МПа	0,52	0,25	0,94
«Констафтор 200»	u_{\max} , мм	0,0012	0,0013	0,0022
	$\sigma_{\text{эkv}}$, МПа	0,67	0,69	1,19

По полученным данным видно, что для двух материалов существенное различие фиксируется по величинам перемещений, а по уровню эквивалентных напряжений они близки. Для иллюстрации на рис. 9 приведено распределение перемещений в уплотнительном кольце в составе муфты 4379-01 для температуры минус 60 °С. Отметим, что на рисунке не показана цветовая шкала. В данном случае важно изменение цвета от синего к красному, соответствующее изменению величины перемещения от минимального значения к максимальному.

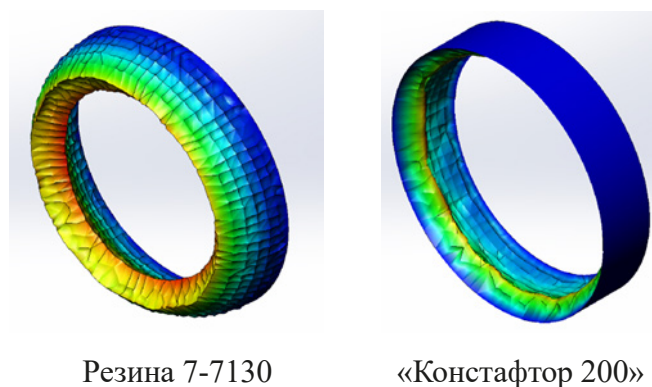


Рис. 9. Максимальные перемещения в уплотнительном кольце

По результатам расчета видно, что при одинаковом силовом и температурном воздействии величины максимальных перемещений в уплотнительном кольце из резины существенно выше аналогичного показателя для варианта исполнения кольца из «Констафтора 200». Это означает, что вероятность разрушения резинового кольца выше, чем у «Констафтора 200», то есть герметизирующая способность материала «Констафтор 200» выше, чем у резины.

По величинам максимальных напряжений можно отметить, что зоны их локализации меняются в зависимости от условий нагружения. Но для обоих вариантов исполнения уплотнительного кольца характерен существенный разброс значения напряжений от практически нулевого значения до максимального.

Выводы

1. Определено регрессионное соотношение, учитывающее влияние температуры эксплуатации на несущую способность магистрального воздухопровода. Данная зависимость имеет следующий вид:

$$K_T = 0,4479e^{-0,0089T} + 0,6516e^{-3,293 \cdot 10^{-5} T}.$$

Показано, что для принятых размеров магистрального и подводящих воздухопроводов требования прочности и надежности выполняются. При этом имеется определенный запас, позволяющий уменьшить толщину воздухопроводов. При производстве труб на заводе-изготовителе желательно на заключительных этапах проводить химическую обработку внутренней полости трубы и нанесения антикоррозионного покрытия на внутреннюю и наружную поверхности.

2. Проведен анализ частот колебаний магистрального воздухопровода при различном числе точек его крепления к раме. Получено соотношение, связывающее частоту первой формы колебания с расстоянием между точками крепления, которое имеет следующий вид:

$$f_1 = 215,04 \exp(-0,95\Delta l).$$

Показано, что таких точек должно быть не менее 5.

3. Проведено расчетное исследование максимальных значений перемещений и напряжений, реализуемых в уплотнительном кольце 4370.00.06 в безрезьбовом соединении участков воздухопровода с помощью муфты 4379-01. Показано, что более предпочтительным вариантом материала уплотнительного кольца является «Констафтор 200».

Список источников

1. Куликов В. Ф. Расчетная схема надежности тормозной системы грузового вагона / В. Ф. Куликов // Транспорт Российской Федерации. — 2023. — № 5-6(108-109). — С. 38–41.

2. Сапетов М. В. Типовой конспект для проведения технической учебы работников эксплуатационных вагонных депо. № 832 — 2018 ПКБ ЦВ. Часть № 6. Автотормозное оборудование грузовых вагонов / М. В. Сапетов. — М.: ПКБ ЦВ ОАО «РЖД», 2019. — 172 с.
3. ГОСТ 8733—74. Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные и теплодеформированные. Технические требования. Введен в действие 01.01.76. — М.: Стандартиформ, 2007. — 5 с.
4. Зубченко А. С. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др. 2-е изд., доп. и испр. — М.: Машиностроение, 2003. — 784 с.
5. Писаренко Г. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести / Г. С. Писаренко, Н. С. Можаровский. — Киев: Наук. думка, 1981. — 496 с.
6. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. — М.: Машиностроение, 1968. — 400 с.
7. Саранча С. Ю. Комплексная оценка качества конструкционных сталей / С. Ю. Саранча, Д. А. Зайцев // Качество в обработке материалов. — 2015. — № 2(4). — С. 54–58.
8. Vai D. Разработка на фирме «SSAB North America» сталей с высокими характеристиками для конструкции мостов / D. Vai, T. Nelson, R. Bondar et al. // Новости черной металлургии за рубежом. — 2010. — № 6. — С. 67–70.
9. Петрова Л. Г. Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов / Л. Г. Петрова, Г. Ю. Тимофеева, П. Е. Демин и др.; под общ. ред. Г. Ю. Тимофеевой. — М.: МАДИ, 2016. — 148 с.
10. ЦВ-ЦЛ-945. Инструкция по ремонту тормозного оборудования вагонов. — М., 2003. — 138 с.
11. ИТС 36—2017. Обработка поверхностей металлов и пластмасс с использованием электролитических и химических процессов. — М.: Бюро НТД, 2017. — 238 с.
12. Стали и сплавы. Марочник / Под ред. В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева. — М.: Интермет Инжиниринг, 2001. — 608 с.
13. Львовский П. Г. Справочное руководство механика металлургического завода / П. Г. Львовский; ред. М. И. Петрик. 4-е изд., испр. и доп. — Свердловск: Металлургиздат, 1961. — 1105 с.
14. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). — М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. — 319 с.
15. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Т. 1 / Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. — М.: Машиностроение, 1988. — 831 с.
16. Лукашенко В. И. Вероятностные методы строительной механики и теория надежности строительных конструкций / В. И. Лукашенко. — Казань: Казанский гос. архитект.-строит. ун-т, 2016. — 244 с.
17. Еремьянц В. Э. Аналитическая динамика и теория колебаний / В. Э. Еремьянц, Я. И. Рудаев, Г. В. Тютюкин. Ч. 2. — Бишкек: КРСУ, 2014. — 247 с.
18. Васильев И. Исследование характеристик колебаний железнодорожных грузовых вагонов с целью определения технических требований к конструкции автономных пьезоэлектрических генераторов тока / И. Васильев, С. Генералов, О. Краснобаев и др. // Наноиндустрия. — 2016. — № 3(65). — С. 72–77.
19. ОСТ В95 1823—76. Моменты затяжки резьбовых соединений. Введен в действие 02.09.76. — 20 с.
20. Большой справочник резинщика. Ч. 1. Каучуки и ингредиенты / Под ред. С. В. Резниченко, Ю. Л. Морозова. — М.: Техинформ, 2012. — 744 с.

21. Кондаков Л. А. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Л. А. Кондаков, А. И. Голубев, В. Б. Овандер и др.; под общ. ред. А. И. Голубева, Л. А. Кондакова. — М.: Машиностроение, 1986. — 464 с.

22. Зерщиков К. Ю. Перспективные полимерные материалы для уплотнений в арматуростроении / К. Ю. Зерщиков, Ю. В. Семенов // Трубопроводная арматура и оборудование. — 2014. — № 6(75). — С. 86–89.

23. Производство уплотнений из полимерных и композиционных материалов. Каталог изделий 2017 года / ООО «Константа-2», 2017. — 24 с.

Дата поступления: 11.12.2024

Решение о публикации: 13.02.2025

Контактная информация:

КУЛИКОВ Владимир Феоодосьевич — аспирант; kulikovvf@mail.ru

Improving the Reliability of the Pneumatic Elements in a Freight Car Braking System

V. F. Kulikov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kulikov V. F. Improving the Reliability of the Pneumatic Elements in a Freight Car Braking System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 131–148. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-131-148

Summary

Purpose: To perform a design justification of improving the braking system reliability (BS) of a freight car including the main air pipe, its mounting points, non-threaded connections, and the air distributor. Particular attention is paid to analyzing failures caused by loss of tightness of the air pipe non-threaded connections and brake equipment holes' clogging. **Methods:** Calculation of the air pipe strength at internal pressure considering temperature effects and the corrosion resistance of steels; frequency analysis of the air pipe vibrations in *SolidWorks Simulation* to determine the optimal number of mounting points; modelling the stress-strain state of sealing rings made of rubber and *Constafor 200* composite material at various temperatures. **Results:** The strength margin of the main air pipeline to internal pressure ($n = 67$) has been found to exceed significantly the required minimum ($n = 5$). This allows reducing the structure mass by decreasing the pipe thickness without compromising reliability. A regression relationship between the natural vibration frequency of the air pipeline and the distance between the mounting points has been developed: $f_1 = 215.04 \cdot \exp(-0.95 \cdot \Delta l)$. To avoid resonance, it is recommended to have at least 5 mounting points at a pipe length of 12 m. It has been shown that replacing rubber seals with *Constafor 200* reduces maximum deformation by 300 times (from 0.6 to 0.0022 mm) and improves the tightness of the joints at extreme temperatures (-60°C). **Practical significance:** Optimization methods such as reducing the pipe thickness, increasing the number of mounting points, and introducing an innovative sealing material have been proposed. The chemical treatment of the pipe inner surface has been recommended to prevent clogging of the brake equipment. The implementation of these methods will enhance the reliability of the freight car braking systems, reduce operating costs, and lower the risk of emergency situations.

Keywords: Braking system, freight car, design justification, air distributor, elements' reliability.

References

1. Kulikov V. F. Raschetnaya skhema nadezhnosti tormoznoy sistemy gruzovogo vagona [Calculation scheme of reliability of the braking system of a freight car]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2023, Iss. 5-6(108-109), pp. 38–41. (In Russian)
2. Sapetov M. V. *Tipovoy konspekt dlya provedeniya tekhnicheskoy ucheby rabotnikov ekspluatatsionnykh vagonnykh depo. № 832 — 2018 PKB TsV. Chast' № 6. Avtotormoznoe oborudovanie gruzovykh vagonov* [Standard summary for conducting technical training of employees of operational wagon depots. № 832 — 2018 PKB CV. Part No. 6. Automatic braking equipment of freight cars]. Moscow: PKB TsV OAO “RZhD” Publ., 2019, 172 p. (In Russian)
3. *GOST 8733—74. Truby stal'nye besshovnyye kholodnodeformirovannyye i teplodeformirovannyye. Tekhnicheskie trebovaniya. Vveden v deystvie 01.01.76* [GOST 8733—74. Seamless cold-formed and heat-deformed steel pipes. Technical requirements. Put into effect on 01.01.76]. Moscow: Standartinform Publ., 2007, 5 p. (In Russian)
4. Zubchenko A. S., Koloskov M. M., Kashirskiy Yu. V. et al. *Marochnik staley i splavov. 2-e izd., dop. i ispr.* [Brand Book of Steels and. 2nd ed., suppl. and corrected.]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003, 784 p. (In Russian)
5. Pisarenko G. S., Mozharovskiy N. S. *Uravneniya i kraevye zadachi teorii plastichnosti i polzuchesti* [Equations and Boundary Value Problems of the Theory of Plasticity and Creep]. Kiev: Nauk. dumka Publ., 1981, 496 p. (In Russian)
6. Malinin N. N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied Theory of Plasticity and Creep]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968, 400 p. (In Russian)
7. Sarancha S. Yu., Zaytsev D. A. Kompleksnaya otsenka kachestva konstruktsionnykh staley [Comprehensive Assessment of the Quality of Structural Steels]. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in Materials Processing]. 2015, Iss. 2(4), pp. 54–58. (In Russian)
8. Bai D., Nelson T., Bondar R. et al. Razrabotka na firme “SSAB North America” staley s vysokimi kharakteristikami dlya konstruktsii mostov [Development of high-performance steels for bridge construction at SSAB North America]. *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom* [News of ferrous metallurgy abroad]. 2010, Iss. 6, pp. 67–70. (In Russian)
9. Petrova L. G., Timofeeva G. Yu., Demin P. E. et al. *Osnovy elektrokhimicheskoy korrozii metallov i splavov* [Fundamentals of electrochemical corrosion of metals and alloys]. Moscow: MADI Publ., 2016, 148 p. (In Russian)
10. *TsV-TsL-945. Instruktsiya po remontu tormoznogo oborudovaniya vagonov* [CV-CL-945. Instructions for repairing braking equipment of cars]. Moscow, 2003, 138 p. (In Russian)
11. *ITS 36—2017. Obrabotka poverkhnostey metallov i plastmass s ispol'zovaniem elektroliticheskikh i khimicheskikh protsessov* [ITS 36—2017. Surface treatment of metals and plastics using electrolytic and chemical processes]. Moscow: Byuro NTD Publ., 2017, 238 s. (In Russian)
12. *Stali i splavy. Marochnik. Pod red. V. G. Sorokina, M. A. Gervas'eva* [Steels and alloys. Brand book. Ed. by V. G. Sorokin, M. A. Gervasyev]. Moscow: Internet Inzhiniring Publ., 2001, 608 p. (In Russian)

13. L'vovskiy P. G. *Spravochnoe rukovodstvo mekhanika metallurgicheskogo zavoda; red. M. I. Petrik. 4-e izd., ispr. i dop.* [Reference manual for a metallurgical plant mechanic; ed. by M. I. Petrik. 4th ed., corrected. and additional]. Sverdlovsk: Metallurgizdat Publ., 1961, 1105 p. (In Russian)
14. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Standards for the calculation and design of cars for 1520 mm gauge MPS railways (non-self-propelled)]. Moscow: GosNIIV-VNIIZhT Publ., 1996, 319 p. (In Russian)
15. *Prochnost', ustoychivost', kolebaniya. Spravochnik v trekh tomakh. T. 1. Pod red. I. A. Birgera i Ya. G. Panovko* [Strength, stability, vibrations. Handbook in three volumes. Vol. 1. Ed. by I. A. Birger and Ya. G. Panovko]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988, 831 p. (In Russian)
16. Lukashenko V. I. *Veroyatnostnye metody stroitel'noy mekhaniki i teoriya nadezhnosti stroitel'nykh konstruksiy* [Probabilistic methods of structural mechanics and reliability theory of building structures]. Kazan': Kazanskiy gos. arkhitekt.-stroit. un-t Publ., 2016, 244 p. (In Russian)
17. Erem'yants V. E., Rudaev Ya. I., Tyutyukin G. V. *Analiticheskaya dinamika i teoriya kolebaniy. Ch. 2* [Analytical dynamics and theory of vibrations. Part 2]. Bishkek: KRSU Publ., 2014, 247 p. (In Russian)
18. Vasil'ev I., Generalov S., Krasnobaev O. et al. Issledovanie kharakteristik kolebaniy zheleznodorozhnykh gruzovykh vagonov s tsel'yu opredeleniya tekhnicheskikh trebovaniy k konstruksii avtonomnykh p'ezoelektricheskikh generatorov toka [Study of vibration characteristics of railway freight cars in order to determine technical requirements for the design of autonomous piezoelectric current generators]. *Nanoindustriya* [Nanoindustry]. 2016, Iss. 3(65), pp. 72–77. (In Russian)
19. *OST V95 1823—76. Momenty zatyazhki rez'bovykh soedineniy. Vveden v deystvie 02.09.76* [OST B95 1823—76. Tightening torques for threaded connections. Effective from 02.09.76]. 20 p. (In Russian)
20. *Bol'shoy spravochnik rezinshchika. Ch. 1. Kauchuki i ingredienty. Pod red. S. V. Reznichenko, Yu. L. Morozova* [The Big Handbook of a Rubber Manufacturer. Part 1. Rubbers and Ingredients. Ed. by S. V. Reznichenko, Yu. L. Morozov]. Moscow: Tekhinform Publ., 2012, 744 p. (In Russian)
21. Kondakov L. A., Golubev A. I., Ovander V. B. et al. *Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik; pod obshch. red. A. I. Golubeva, L. A. Kondakova* [Seals and sealing equipment: Handbook; under the general editorship of A. I. Golubev, L. A. Kondakov]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986, 464 p. (In Russian)
22. Zershchikov K. Yu., Semenov Yu. V. Perspektivnye polimernye materialy dlya uplotneniy v armaturostroenii [Promising polymeric materials for seals in valve engineering]. *Truboprovodnaya armatura i oborudovanie* [Pipeline valves and equipment]. 2014, Iss. 6(75), pp. 86–89. (In Russian)
23. *Proizvodstvo uplotneniy iz polimernykh i kompozitsionnykh materialov. Katalog izdeliy 2017 goda* [Production of seals from polymer and composite materials. Product catalog 2017]. OOO "Konstanta-2", 2017, 24 p. (In Russian)

Received: December 11, 2024

Accepted: February 13, 2025

Author's information:

Vladimir F. KULIKOV — Postgraduate Student; kulikovvf@mail.ru

УДК 621.316

Анализ эффективности использования накопителей энергии на дизельных электропоездах на участке с малым пассажиропотоком Зеленогорск — Выборг

В. А. Шаряков, С. А. Теличенко, К. В. Марков

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шаряков В. А., Теличенко С. А., Марков К. В. Анализ эффективности использования накопителей энергии на дизельных электропоездах на участке с малым пассажиропотоком Зеленогорск — Выборг // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 149–157. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-149-157

Аннотация

Цель: Произвести анализ возможности интеграции накопителя энергии в дизельные поезда, определение технических характеристик и оценка его энергоэффективности, а также выявление направления для дальнейших исследований в этой области для повышения энергетической эффективности железнодорожного транспорта, снижение эксплуатационных расходов и минимизация воздействия на окружающую среду. **Методы:** Исследованы особенности участка Зеленогорск — Выборг, включая уклоны, кривые и ограничения скорости, для оценки потенциала рекуперации энергии при торможении и простоях подвижного состава. Построена математическая модель на базе Simulink с использованием основных уравнений энергетического баланса в дизельном приводе на локомотивах. Модель учитывает такие факторы, как мощность тяговых двигателей, характеристики передачи, массу поезда и профиль пути. **Результаты:** Установлена емкость накопителя энергии, достаточного для аккумуляции энергии, рекуперированной при торможении и простоях. Интеграция накопителей энергии позволяет оптимизировать работу дизельного генератора, снизить пиковые нагрузки и улучшить характеристики разгона, особенно на сложных участках маршрута. **Практическая значимость:** Работа позволяет дать теоретическое обоснование для использования накопителей энергии на дизельном подвижном составе. Предложенная система повышает энергоэффективность дизельных поездов за счет рекуперации и повторного использования энергии. Повышение энергоэффективности и снижение износа дизельного двигателя приводят к сокращению эксплуатационных и ремонтных расходов. Система обеспечивает более плавный разгон и торможение, улучшая комфорт пассажиров, особенно на маршрутах с переменным рельефом. Подобные технологии уже успешно применяются на электропоездах и гибридных транспортных средствах, что подтверждает их эффективность в снижении расхода энергии и улучшении экологических характеристик.

Ключевые слова: Накопитель энергии, рельсовый автобус, аккумулятор, дизель-поезд, энергоэффективность, моделирование электрооборудования.

Современные транспортные системы находятся в постоянном поиске решений, позволяющих повысить их эффективность, снизить эксплуатационные расходы и минимизировать экологическое воздействие. В частности, дизельные поезда, которые остаются важной частью железнодорожного транспорта в регионах с недостаточным развитием электрификации, сталкиваются с вызовами,

связанными с высоким уровнем выбросов углекислого газа и значительными затратами на топливо [1].

Внедрение накопителей энергии в дизельные поезда открывает дополнительные возможности, такие как обеспечение плавности работы двигателя, снижение пиковых нагрузок и увеличение срока службы компонентов силовой установки. Однако реализация таких решений требует комплексного подхода, включающего разработку подходящей архитектуры системы, оптимизацию алгоритмов управления и оценку экономической эффективности [2, 3].

На неэлектрифицированном участке Зеленогорск — Выборг движение осуществляется рельсовыми автобусами, работающими на дизельном топливе. Эти составы хорошо приспособлены для маршрутов с небольшим пассажиропотоком, обеспечивая стабильное движение при отсутствии контактной сети. Рельсовые автобусы также удобны на участках с переменным рельефом, характерным для данного маршрута. Они могут маневрировать на кривых с небольшим радиусом и справляться с уклонами, однако ограничены по скорости и требуют регулярного технического обслуживания для поддержания эффективности и безопасности.

Данный участок может обслуживаться поездами типа РА-3. Это дизель-поезд, разработанный для использования на неэлектрифицированных железнодорожных линиях, способный развивать скорость до 120 км/ч. Состав может включать от одного до трех вагонов, в зависимости от пассажиропотока и потребностей маршрута.

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики РА-3

Параметр	Величина
Конструкционная скорость	120 км/ч
Мощность двигателя силовой установки при 1800 об/мин	360 кВт (482 л. с.)
Масса вагона (тара), т	51 т (Г) и 50,5 т (И)
Тип передачи	Гидравлическая Voith
Населенность вагона расчетная, чел.	121 (И) / 110 (Г)
Запас топлива, л	700
Удельный расход топлива на номинальной мощности, г/кВтч	210 + 5 %
Максимальный крутящий момент на выходе двигателя силовой установки при 1300 об/мин, Н · м	2200
Максимальный крутящий момент на выходе гидропередачи силовой установки, Н · м	6000
Мощность (макс.) бортового генератора при 3000 мин ⁻¹	3000
Среднее ускорение (для двухвагонного РА-3) при расчетной населенности на прямом горизонтальном участке пути в диапазоне скоростей от 0 до 60 км/ч, м/с ²	0,37

ОАО «РЖД» в нормативной документации прописывает максимальное непогащенное ускорение для пассажирских поездов в 0,7 м/с², по условиям максимально возможного центробежного ускорения, при котором люди чувствуют себя

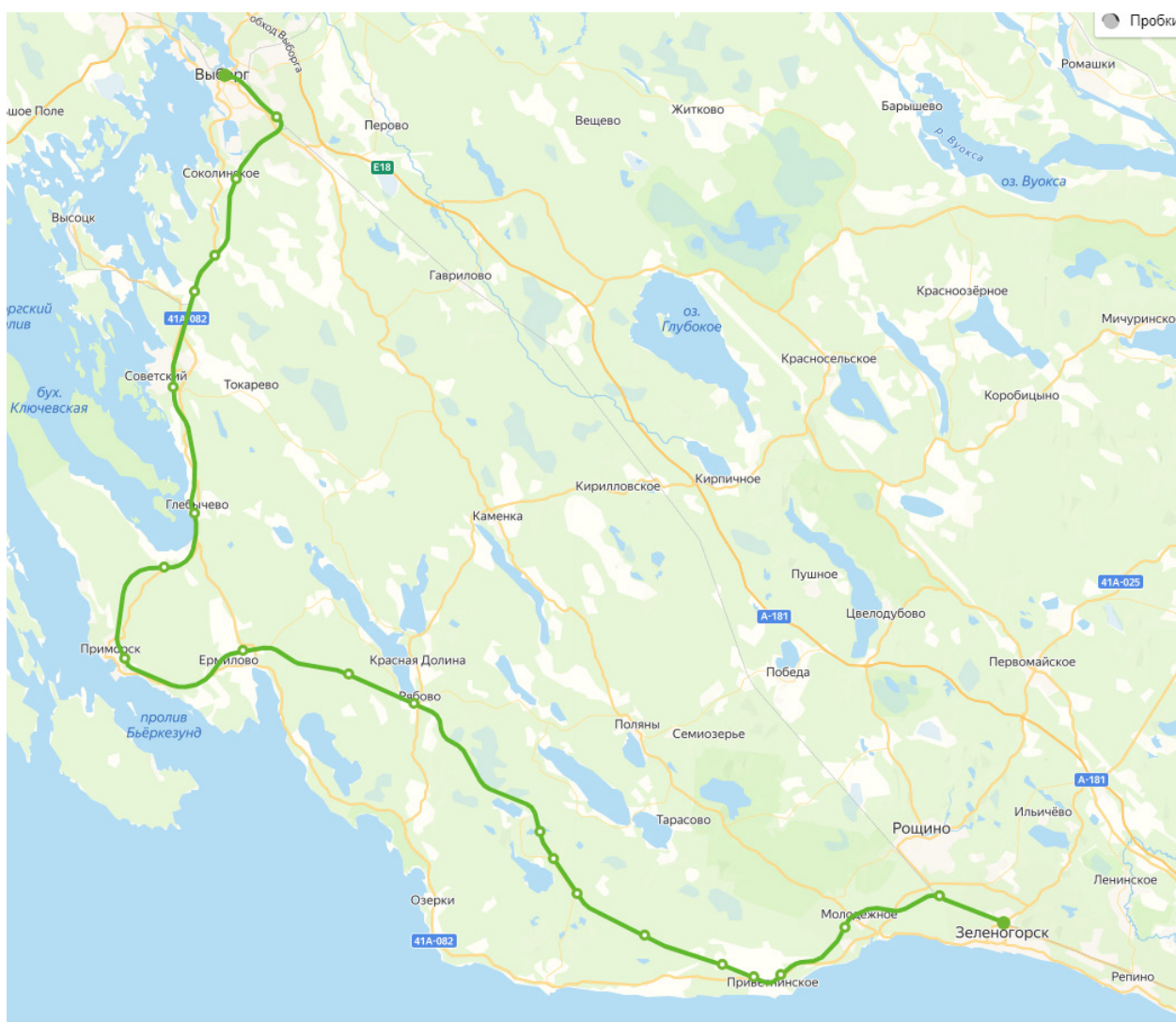


Рис. 1. Карта неэлектрифицированного участка пути Зеленогорск — Выборг

комфортно. При классической эксплуатации для двухвагонного состава при расчетной заполненности пассажирами на прямом горизонтальном участке пути в диапазоне скоростей от 0 до 60 км/ч среднее ускорение составляет $0,37 \text{ м/с}^2$. Данный факт показывает недостатки дизельной установки, применение которой ограничивает диапазон ускорений при эксплуатации рельсовых автобусов.

Эффективность применения электрической передачи в сравнении с гидравлической уже давно не новость. Электрическая передача энергии позволяет добиться большего КПД, производить устойчивое динамическое торможение в широком диапазоне нагрузок и скоростей [4, 5].

Применение асинхронного тягового привода в паре с накопителем для передачи энергии от дизельной установки на колесную пару позволяет повысить энергоэффективность тягового привода и обеспечить накопление энергии во время краткосрочных стоянок (без остановки дизельного агрегата) и рекуперативного торможения [6].

ТАБЛИЦА 2. Данные профиля пути на неэлектрифицированном участке Зеленогорск — Выборг

Участок	Протяженность, м	Средний приведенный уклон, ‰	Средний приведенный уклон с учетом кривых, ‰	Средние скорости движения на участке, км/ч
Зеленогорск — пл. Ушково	4800	1,85	1,85	48
пл. Ушково — о. п. Молодежная	7000	-0,84	-0,57	47
о. п. Молодежная — Приветненское	5700	-3,49	-3,46	49
Приветненское — о. п. 70 км	2600	4,70	5,22	22
о. п. 70 км — о. п. 72 км	1780	3,58	3,58	27
о. п. 72 км — о. п. Местерьярви	5620	6,41	6,41	37
о. п. Местерьярви — о. п. Япиля	5500	0,46	0,46	47
о. п. Япиля — о. п. Зеркальный	3000	-2,59	-2,59	36
о. п. Зеркальный — о. п. Тарасовское	2000	4,37	4,37	30
о. п. Тарасовское — Куолемаярви	14 000	-3,33	-3,29	60
Куолемаярви — о. п. 106 км	4000	0,15	0,15	30
о. п. 106 км — Ермилово	7000	-3,50	-3,47	38
Ермилово — Приморск	9500	0,65	0,69	34
Приморск — о. п. Бор	8200	1,62	1,66	41
о. п. Бор — Прибылово	4800	-4,19	-4,17	32
Прибылово — Советский	9000	1,58	1,58	36
Советский — Попово	6500	-0,92	-0,92	56
Попово — о. п. Матросово	3000	-2,57	-2,57	30
о. п. Матросово — о. п. Соколинское	5500	-2,03	-2,02	47
о. п. Соколинское — Лазоревка	5300	-0,90	-0,84	35
Лазоревка — Выборг пасс.	4700	0,06	0,06	28

Маршрут поезда на участке Зеленогорск — Выборг включает в себя разнообразный рельеф с частыми переменными уклонами и кривыми, что типично для данной местности. Большинство кривых радиусом 600–1200 м, но встречаются также более резкие повороты. Уклоны в основном составляют до 10 ‰, но иногда могут достигать 12 ‰, особенно на участках Ермилово — Приморск — Советское. Этот профиль был разработан с учетом местных особенностей, чтобы поддерживать стабильную скорость и минимизировать нагрузку на состав и рельсы.

Для рассмотрения возможности применения на данном участке накопителя энергии была разработана математическая модель поезда [7, 8]. Модель позволяет учитывать некоторые особенности подвижного состава, такие как мощность тяговых двигателей, особенности тяговой передачи, массогабаритные параметры, а также позволяет учесть особенности характера движения на маршруте следования путем задачи профиля пути и ограничений по скоростям движения [9, 10].

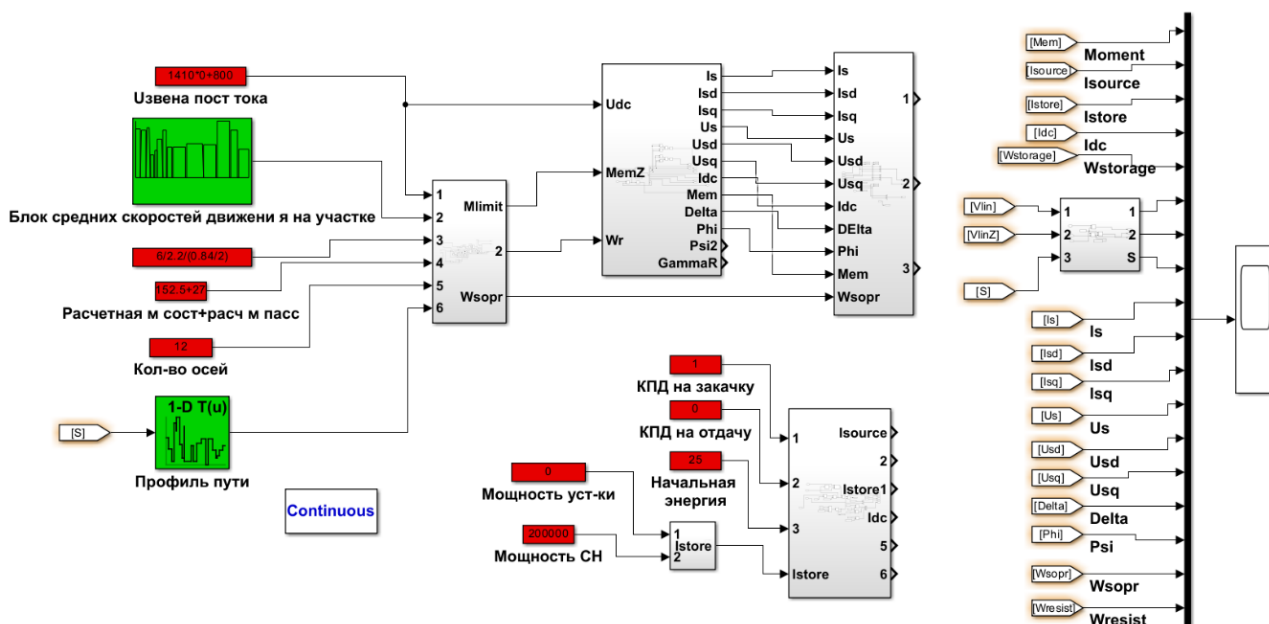


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели Matlab Simulink

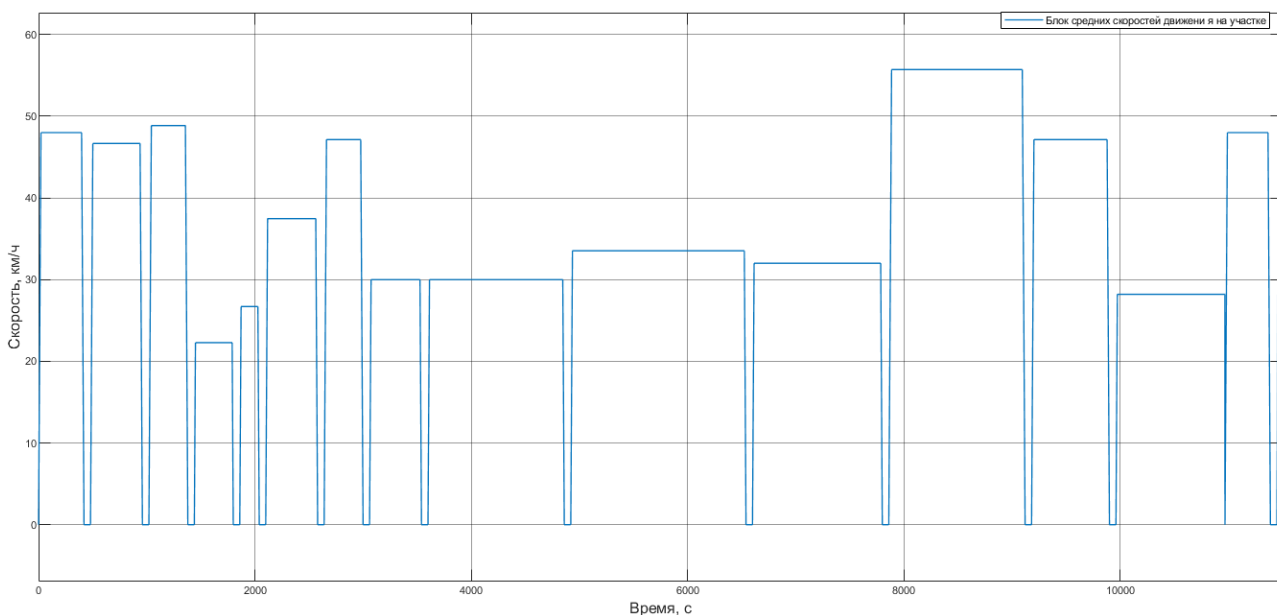


Рис. 3. Заданные ограничения скорости движения на участке Зеленогорск — Выборг

Полученные в модели данные после обработки позволяют определить зависимости:

$$W_{\text{МГН}} = \int I_{dc} U_{dc} dt.$$

За время прохождения маршрута, которое составило 11 000 с, был пройден путь в 120 км, а достигнутое значение потребляемой энергии составило 49 МДж, что соответствует 4,5 кВт потребляемой мощности.

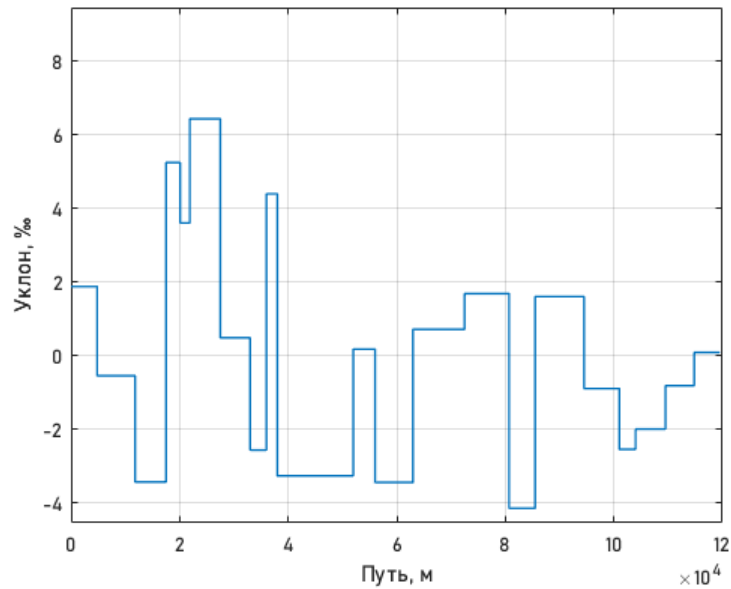


Рис. 4. Задаваемый усредненный профиль пути на участке Зеленогорск — Выборг

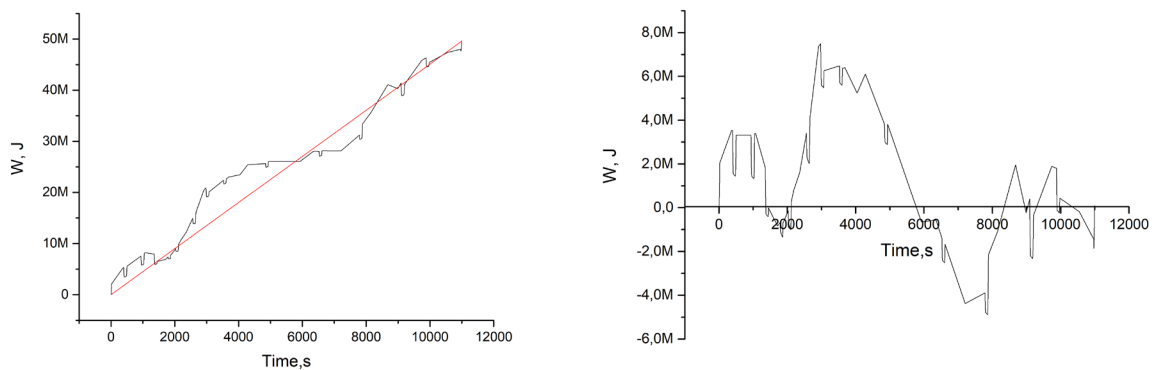


Рис. 5. Зависимость затрачиваемой энергии от времени движения

Установлено, что на данном участке для аккумуляции энергии, рекуперированной при торможении и при простое дизеля, необходимо иметь батарею с запасом энергии около 5 МДж в расчете на одну ось. Накопленная аккумуляторной батареей энергия позволит восполнять ее недостаток для питания тягового двигателя на сложных участках пути, улучшая режим работы дизельного генератора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колпахчян П. Г. Особенности проектирования контактно-аккумуляторного маневрового электровоза / П. Г. Колпахчян, А. М. Евстафьев, В. В. Никитин и др. // Электротехника. — 2021. — № 10. — С. 15–20.
2. Обухов М. Ю. Применение гибридного мотор-вагонного подвижного состава с накопителями энергии в пригородном сообщении / М. Ю. Обухов, И. П. Викулов // Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава ско-

ростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: материалы VIII Международного симпозиума «Элтранс-2015», Санкт-Петербург, 07–09 октября 2015 года. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. — С. 336–343.

3. Зарифьян А. А. Мировой опыт в гибридном локомотивостроении / А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе, Н. В. Романченко и др. // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2016. — № 3(36). — С. 54–59.

4. Зарифьян А. А. Обзор конструкций тягового подвижного состава, оснащенных гибридным тяговым приводом / А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, про-изводство». Т. 1. Технические науки. — Ростов-на-Дону: РГУПС, 2017. — С. 136–139.

5. Талахадзе Т. З. Применение гибридных технологий на электроподвижном составе / Т. З. Талахадзе, Н. В. Романченко, А. А. Зарифьян и др. // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 4(49). — С. 111–114.

6. Андриющенко А. А. Асинхронный тяговый привод локомотивов / А. А. Андриющенко, Ю. В. Бабков и др. — М.: УМЦ ЖДТ, 2013. — 413 с.

7. Якушев А. Я. Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя / А. Я. Якушев, Т. М. Назирхонов, И. П. Викулов и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — № 4. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredele-nie-osnovnyh-parametrov-asinhronnogo-tyagovogo-elektrodvigatelya>.

8. Ballois Le S. An experimental setup to study a hybrid drive train for a shunting locomotive / S. Le Ballois, T. Talakhadze, L. Vido et al. // 11th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EV-ER2016), April 6–8, 2016, Monte-Carlo (Monaco). Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. — DOI: 10.1109/EVER.2016.7476355.

9. Kolpakhchyan P. G. The determination of the asynchronous traction motor characteristics of locomotive / P. G. Kolpakhchyan, A. R. Shaikhiev, A. E. Kochin et al. // Advances in Electrical and Electronic Engineering. — 2017. — Vol. 15. — Iss. 2. — Pp. 130–135.

10. Kolpakhchyan P. Systems approach to the analysis of electromechanical processes in the asynchronous traction drive of an electric locomotive / P. Kolpakhchyan, A. Zarifian, A. Andruschenko // Studies in Systems, Decision and Control. — 2017. — Vol. 87. — Pp. 67–134. — DOI: 10.1007/978-3-319-51502-1_3.

Дата поступления: 05.01.2025

Решение о публикации: 16.02.2025

Контактная информация:

ШАРЯКОВ Владимир Анатольевич — канд. техн. наук, доц.; v_a_shar@mail.ru

МАРКОВ Кирилл Викторович — ст. преподаватель; markov@pgups.ru

ТЕЛИЧЕНКО Станислав Алексеевич — ст. преподаватель; telichenko@pgups.ru

Analyzing the Energy Storage System Efficiency Onboard Diesel-Electric Trains on the Zelenogorsk — Vyborg Railway with Low Passenger Traffic

V. A. Sharyakov, K. V. Markov, S. A. Telichenko

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Sharyakov V. A., Telichenko S. A., Markov K. V. Analyzing the Energy Storage System Efficiency Onboard Diesel-Electric Trains on the Zelenogorsk — Vyborg Railway with Low Passenger Traffic. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 149–157. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-149-157

Summary

Purpose: To analyze the feasibility of integrating the energy storage system into diesel trains, to determine its technical parameters, and to evaluate its energy efficiency. Additionally, to identify further research areas in this field aimed at improving the energy efficiency of railway transport, reducing operational costs, and minimizing environmental impact. **Methods:** The specific features of the Zelenogorsk-Vyborg line including gradients, curves and speed limits were investigated to assess the potential for energy recovery during train braking and idling. A *Simulink*-based mathematical model was built using the basic equations of the energy balance in the locomotive diesel drive. The model includes such factors as traction engine power, transmission characteristics, train weight and track profile. **Results:** The study has determined the capacity of the energy storage system required for energy recovery during braking and idling periods. The integration of the energy storage system will optimize the diesel generator operation, reduce peak loads, and improve acceleration performance, particularly, on difficult route sections. **Practical significance:** The study provides a theoretical foundation for applying the energy storage system in diesel rolling stock. The proposed system enhances the energy efficiency of diesel trains by recovering and reusing energy. Improved energy efficiency and reduced wear of the diesel engine lead to lower operational and maintenance costs. The system ensures smoother acceleration and braking enhancing passenger comfort, especially on routes with variable terrain. Similar technologies have already been successfully implemented in electric trains and hybrid vehicles confirming their effectiveness in reducing energy consumption and improving environmental performance.

Keywords: Energy storage, road-rail bus, battery, diesel train, energy efficiency, electrical equipment modelling.

References

1. Kolpakhch'yan P. G., Evstaf'ev A. M., Nikitin V. V. et al. Osobennosti proektirovaniya kontaktno-akkumulyatornogo manevrovogo elektrovoza [Design Features of a Contact-Battery Shunting Electric Locomotive]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2021, Iss. 10, pp. 15–20. (In Russian)
2. Obukhov M. Yu., Vikulov I. P. Primenenie gibridnogo motor-vagonnogo podvizhnogo sostava s nakopitelnyami energii v prigorodnom soobshchenii [Use of Hybrid Motor-Car Rolling Stock with Energy Storage Units in Suburban Traffic]. *Elektrifikatsiya, razvitie elektroenergeticheskoy infrastruktury i elektricheskogo podvizhnogo sostava skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta: materialy VIII Mezhdunarodnogo simpoziuma "Eltrans-2015", Sankt-Peterburg, 07–09 oktyabrya 2015 goda* [Electrification, Development of Electric Power Infrastructure and Electric Rolling Stock of High-Speed and High-Speed Rail Transport: Proceedings

of the VIII International Symposium “Eltrans-2015”, St. Petersburg, October 7–9, 2015]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2017, pp. 336–343. (In Russian)

3. Zarif’yan A. A., Talakhadze T. Z., Romanchenko N. V. et al. Mirovoy opyt v gibridnom lokomotivostroenii [World experience in hybrid locomotive building]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University]. 2016, Iss. 3(36), pp. 54–59. (In Russian)

4. Zarif’yan A. A., Talakhadze T. Z. Obzor konstruktsiy tyagovogo podvizhnogo sostava, osnashchennykh gibridnym tyagovym privodom [Review of traction rolling stock designs equipped with a hybrid traction drive]. *Sbornik nauchnykh trudov “Transport: nauka, obrazovanie, pro-izvodstvo”. T. 1. Tekhnicheskie nauki* [Collection of scientific papers “Transport: science, education, production”. Vol. 1. Technical sciences]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2017, pp. 136–139. (In Russian)

5. Talakhadze T. Z., Romanchenko N. V., Zarif’yan A. A. et al. Primenenie gibridnykh tekhnologiy na elektropodvizhnom sostave [Application of hybrid technologies on electric rolling stock]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State University of Railway Engineering]. 2019, Iss. 4(49), pp. 111–114. (In Russian)

6. Andryushchenko A. A., Babkov Yu. V. et al. *Asinkhronnyy tyagovyy privod lokomotivov* [Asynchronous traction drive of locomotives]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2013, 413 p. (In Russian)

7. Yakushev A. Ya., Nazirkhonov T. M., Vikulov I. P. et al. Opredelenie osnovnykh parametrov asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya [Definition of the main parameters of an asynchronous traction electric motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2019, Iss. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-osnovnyh-parametrov-asinhronnogo-tyagovogo-elektrodvigatelya>. (In Russian)

8. Ballois Le S., Talakhadze T., Vido L. et al. An experimental setup to study a hybrid drive train for a shunting locomotive. 11th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EV-ER2016), April 6–8, 2016, Monte-Carlo (Monaco). Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. DOI: 10.1109/EVER.2016.7476355.

9. Kolpakhchyan P. G., Shaikhiev A. R., Kochin A. E. et al. The determination of the asynchronous traction motor characteristics of locomotive. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2017, vol. 15, Iss. 2, pp. 130–135.

10. Kolpakhchyan P., Zarifian A., Andruschenko A. Systems approach to the analysis of electromechanical processes in the asynchronous traction drive of an electric locomotive. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2017, vol. 87, pp. 67–134. DOI: 10.1007/978-3-319-51502-1_3.

Received: January 05, 2025

Accepted: February 16, 2025

Author’s information:

Vladimir A. SHARYAKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; v_a_shar@mail.ru

Kirill V. MARKOV — Senior Lecturer; markov@pgups.ru

Stanislav A. TELICHENKO — Senior Lecturer; telichenko@pgups.ru

УДК 656.2.073.235

Организация смешанного движения по инфраструктуре ВСМ с интеграцией ускоренных контейнерных поездов

Н. А. Кекиш¹, Д. О. Мамлев²

¹Белорусский государственный университет транспорта, Республика Беларусь, 246653, Гомель, ул. Кирова, 34

²Нижегородский институт путей сообщения — филиал Приволжского государственного университета путей сообщения, Российская Федерация, 603011, Нижний Новгород, пл. Комсомольская, 3

Для цитирования: Кекиш Н. А., Мамлев Д. О. Организация смешанного движения по инфраструктуре ВСМ с интеграцией ускоренных контейнерных поездов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 158–171. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-158-171

Аннотация

Цель: Повышение экономической эффективности эксплуатации высокоскоростных магистралей (ВСМ). Инфраструктура ВСМ может быть использована не только для пассажирского сообщения, но и для ускоренной перевозки грузов. Потенциал использования ВСМ для смешанного пассажирского и грузового движения в настоящее время недостаточно изучен. В статье предлагается вариант организации смешанного движения высокоскоростных и скоростных пассажирских поездов с интеграцией в график ускоренных контейнерных поездов. **Методы:** Разработка интегрированного графика движения пассажирских и ускоренных контейнерных поездов с заданными параметрами скорости и приоритета каждой категории поездов на выделенной ВСМ с точками перехода на общую сеть железных дорог, анализ технических проблем при его реализации. **Результаты:** На примере прокладки графика движения на демонстрационном участке было установлено, что при планируемых для данного направления ВСМ размерах пассажирского движения резерв пропускной способности является достаточным для интеграции нескольких пар ускоренных контейнерных поездов, при этом возможна прокладка соответствующих ниток для их безостановочного пропуска. Таким образом, доказана принципиальная возможность реализации модели смешанного движения на ВСМ с высокими показателями качества как пассажирского, так и грузового движения. В то же время выделены основные проблемы технического характера, которые требуют решения для реализации предложенной модели смешанного движения, среди которых необходимость модификации тягового и нетягового подвижного состава и средств крепления под условия высокоскоростного движения. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы для разработки моделей организации смешанного движения на планируемых ВСМ с целью повышения экономической эффективности их эксплуатации за счет предоставления услуги скоростной перевозки высокотарифных контейнеризируемых грузов.

Ключевые слова: ВСМ, скорость, контейнерные поезда, пассажирские поезда, подвижной состав, график движения, пропускная способность.

Введение

Строительство высокоскоростных магистралей (ВСМ) на железных дорогах колеи 1520 мм на сегодняшний день является одной из наиболее обсуждаемых тем как в СМИ, так и в профессиональном научном сообществе. Пример успешной

технической реализации таких проектов в странах Западной Европы и Юго-Восточной Азии стимулировал включение создания ВСМ и развитие системы высокоскоростного пассажирского сообщения в стратегии развития железных дорог как Российской Федерации, так и сопредельных государств [1, 2]. Была проведена большая подготовительная работа в виде разработки нормативной документации, технических требований и специальных технических условий к проектированию, строительству и эксплуатации ВСМ на выбранных направлениях [3]. Следует отметить, что большую роль в разработке и актуализации нормативной базы по всем аспектам организации высокоскоростного движения сыграл уникальный опыт научной школы ПГУПС, накопленный за годы исследований в данной области. В 2024 году проект ВСМ вступил в активную фазу строительства. С объявлением не только потенциальных направлений ВСМ на Петербургском международном экономическом форуме (ПМЭФ-2024), но и предлагаемой очередности их строительства [4], а также изданием распоряжения Правительства Российской Федерации об основных условиях концессионного соглашения о строительстве высокоскоростной железнодорожной магистрали (ВСМ) Москва — Санкт-Петербург [5] перспектива реализации проекта ВСМ представляется достаточно близкой.

В связи с этим в очередной раз встает вопрос о наиболее эффективном использовании инфраструктуры ВСМ. В проектах ВСМ в Российской Федерации рассматривался вариант организации смешанного движения высокоскоростных, скоростных и специализированных грузовых поездов [3]. Такая модель является инструментом повышения эффективности использования дорогостоящей путевой инфраструктуры ВСМ, поскольку хотя бы приблизиться к рентабельности линии за счет исчерпания пропускной способности только пассажирскими поездами нереально. В данном исследовании предлагается рассмотреть вариант использования инфраструктуры ВСМ для движения ускоренных контейнерных поездов.

Исследование

Контейнеризация в грузовых перевозках является таким же значимым трендом, как и высокоскоростное движение в пассажирских. Современные стратегии развития транспортного комплекса [6–8] в обязательном порядке предусматривают повышение объема и качества контейнерных перевозок, их техническое обеспечение. Наиболее эффективным способом продвижения контейнеропотоков на железных дорогах на сегодняшний день является организация прямых ускоренных контейнерных поездов. Формирование и продвижение ускоренных контейнерных поездов с точки зрения организации вагонопотоков идет по модели отправительского маршрута, когда ускорение продвижения достигается в первую очередь за счет исключения переработки вагонопотока в пути следования. Ускорение продвижения по участкам (увеличение участковых скоростей) достигается путем

предоставления приоритета таким поездам в графике движения. Увеличение ходовой скорости движения как резерв ускорения продвижения контейнеропотоков, как правило, рассматривается крайне редко. Например, в исследовании [9] была на основе опытных испытаний обоснована техническая возможность перевозки контейнеров на фитинговых платформах с ходовыми скоростями до 95 км/ч.

В то же время рост объема контейнерных перевозок, а также технической и как итог маршрутной скорости формируют издержки в части снижения эффективности использования наличной пропускной способности железных дорог сети СНГ для грузовых поездов. Коммерческие требования, предъявляемые к категории контейнерных поездов и обуславливающие их приоритетность, а также отличающийся от единицы коэффициент съема создают предпосылки для недополучения владельцем инфраструктуры дополнительной прибыли по следующим причинам: отклонение грузового поездопотока на альтернативные маршруты с увеличением эксплуатационных издержек, допущение удлинения сроков доставки грузов II и III категорий, рост эксплуатационных издержек для парка тягового подвижного состава по причине непроизводительного простоя при пропуске поездов приоритетных категорий.

Также целесообразно отметить проблему сложности продвижения грузового поездопотока (в том числе контейнерного) через опорные железнодорожные узлы и городские агломерации. Увеличивающиеся по мере приближения к городским агломерациям размеры движения пригородных поездов также накладывают существенные ограничения по периодам и объемам пропуска транзитного и местного грузового поездопотока.

Обозначенная проблематика создает существенные барьеры для развития набирающей популярность такой транспортной услуги, как «Грузовой экспресс». Как один из трендов XXI века обозначается спрос на повышение скорости выполнения различных операций, в том числе и по доставке грузов. Текущее и, весьма вероятно, будущие десятилетия являются периодом, когда расстояние в большей степени измеряется не километрами, а временными затратами на его преодоление.

Классические подходы к сокращению времени доставки груза подразделяются по методологии на сокращающие время выполнения грузовых и коммерческих операций и сокращающие фактическое время нахождения груза в движении.

В настоящей статье раскрываются результаты исследования возможности значительного сокращения сроков доставки груза в контейнерах за счет повышения технической скорости передвижения данной категории грузов по сети железных дорог на качественно новом уровне. В данном контексте предполагается, что потенциально существует высокая перспективность возможности перевода контейнерного грузового железнодорожного потока с сети классических железных дорог общего пользования на сеть высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Инфраструктура ВСМ может стать технической основой для реализации предлагаемой модели смешанного движения грузовых и пассажирских поездов следующих типов:

- высокоскоростные пассажирские поезда с эксплуатационной скоростью до 360 км/ч (в последней версии проекта ВСМ предлагаются максимальные скорости до 400 км/ч [4]);
- региональные пассажирские экспрессы со скоростями движения 160, 200 и 250 км/ч;
- ускоренные контейнерные поезда со скоростями до 200 км/ч.

Выбор ускоренных контейнерных поездов в качестве специализированных грузовых поездов модели смешанного движения по инфраструктуре ВСМ обосновывается следующими причинами.

Контейнерные поезда, как правило, относятся к категории легковесных, поэтому из всех грузовых поездов (за исключением порожних) наиболее приближены по весовым характеристикам к пассажирским поездам, в силу чего будут оказывать наименьшее негативное воздействие на дорогостоящую путевую инфраструктуру ВСМ.

Использование в ускоренных контейнерных поездах герметичных контейнеров закрытого типа при соответствующем качестве технического и коммерческого осмотра как при приеме к перевозке, так и в пути следования позволит избежать выдувания и просыпания груза, загрязнения земляного полотна ВСМ.

В контейнерных поездах перевозятся, как правило, высокотарифные грузы, ускорение продвижения которых дает ощутимый экономический эффект за счет ускорения денежного оборота, «замороженного» в таких грузах, что является важным преимуществом не только на уровне транспорта и грузовладельца, но и в макроэкономическом аспекте.

Применение в контейнерных перевозках единого стандартного типа подвижного состава (фитинговых платформ) позволит упростить его адаптацию под высокоскоростное движение. При этом за счет использования специализированных контейнеров сохраняется широкая номенклатура перевозимых грузов.

Возможность использовать пассажирские локомотивы для легковесных контейнерных поездов создает предпосылки для организации единой эффективной системы оборота локомотивов и работы локомотивных бригад. Для заявленной выше модели смешанного движения предполагается создание такой единой системы оборота локомотивов для ускоренных контейнерных поездов и региональных экспрессов со скоростями до 200 км/ч.

Очевидно, что движение контейнерных поездов на ВСМ должно быть организовано по расписанию, что даст новый уровень качества и прогнозируемости доставки для сервиса контейнерных перевозок.

Планируемый каркас ВСМ (рис. 1) совпадает с направлениями основных международных транспортных коридоров «Западная Европа — Западный Китай» и «Север — Юг» [10]. ВСМ, таким образом, представляет собой востребованный инфраструктурный резерв для приоритетного пропуска контейнеропотока на особо загруженных направлениях, особенно в условиях директивного выделения пропускной способности под стратегические грузы по решению правительства (уголь и т. п.). Если учесть, что контейнерные перевозки, по статистике как Белорусской железной дороги [11], так и по данным ОАО «РЖД» [12], демонстрируют достаточно значительный устойчивый рост, то наличие дополнительного резерва пропускной способности, к тому же обеспечивающего более высокое качество доставки, является стратегически необходимым. Дополнительно стабильный рост контейнеропотока обеспечивает возможность сохранения достаточно эффективной эксплуатации ВСМ в условиях колебаний пассажиропотока или ошибок прогноза его объема, что на протяжении многих лет являлось одним из главных обоснований нецелесообразности строительства ВСМ на определенных направлениях и причиной откладывания на десятилетия старта реализации проекта.

ИСТОЧНИК: ПРЕЗЕНТАЦИЯ СТРАТЕГИИ ПРАВИТЕЛЬСТВА ПО РАЗВИТИЮ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДО 2030 ГОДА.



Рис. 1. Перспективная сеть высокоскоростных магистралей

При этом необходимо отметить основные факторы потенциального успеха концепции пропуска контейнерного поездопотока по высокоскоростным железнодорожным линиям:

- использование каркаса ВСМ для регулярного сообщения контейнерных поездов позволяет наладить конкурентоспособную сеть быстрой доставки высокомаржинальных категорий грузов между крупными точками переработки (логистические хабы, перевалочные пункты, интермодальные перегрузочные пункты);
- повышение операционной эффективности высокоскоростной железнодорожной магистрали за счет увеличения доходности на каждую единицу вложенных средств в строительство ВСМ;
- высвобождение пропускных и провозных способностей на сети классических железнодорожных линий для организации перевозки массовых категорий грузов, что усиливает данный эффект, возникающий от перехода на ВСМ части пассажирского движения;
- обеспечение эффекта стягивания пространства в сфере грузовых перевозок;
- формирование конкурентного транспортного продукта в сфере грузовых перевозок.

Демонстрационный участок

В качестве демонстрационного участка авторами статьи определена перспективная ВСМ-4 «Союз» на направлении Москва — Минск (рис. 2). Согласно обозначенной в рамках ПМЭФ концепции каркаса ВСМ, данная высокоскоростная железнодорожная магистраль позволяет выстроить новые транспортные коридоры на таких направлениях, как: Москва — Минск, Азия — Беларусь, Минск — порты Финского залива (Балтийского моря), Приволжский федеральный округ РФ — Беларусь. Основными логистическими точками на данных направлениях могут выступать ТЛЦ в г. Электроугли (Московская область) в зоне прохождения ВСМ-2 «Москва — Казань», ТЛЦ «Белый Раст» (Московская область) в зоне прохождения ВСМ-1 «Москва — Санкт-Петербург» и ТЛЦ «Колядичи» (Минская область) на незначительном удалении от ВСМ-4 «Москва — Минск».

При этом развитие железнодорожной инфраструктуры Центрального транспортного узла (г. Москва) позволит в перспективе без значительных временных потерь производить поездобмен между указанными высокоскоростными магистралями в зависимости от станции формирования и назначения.

В рамках предложенной концепции демонстрационного участка предлагается классическая выделенная скоростная железнодорожная магистраль с проектными скоростями до 300 км/ч. Общая протяженность магистрали составляет 706 км (от терминала ВСМ на станции Москва-Рижская до станции Минск-Центральный). За исключением конечных точек на линии предусмотрено 6 отдельных пунктов (ст. Одинцово (первая линия Московских центральных диаметров (МЦД-1)), ст. Можайск-ВСМ, ст. Вязьма-ВСМ, ст. Смоленск-ВСМ, ст. Орша-ВСМ, ст. Борисов-ВСМ). Среднее время в пути высокоскоростного пассажирского поезда составляет 3 часа 20 минут.

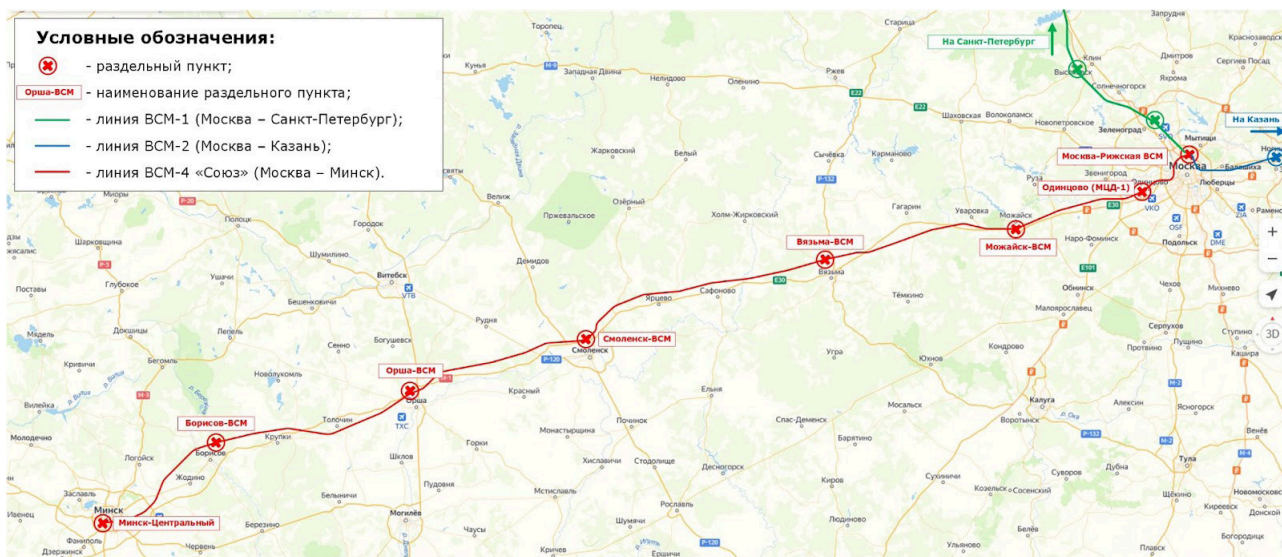


Рис. 2. Схема демонстрационного участка ВСМ-4 «Москва — Минск»

Для возможности выполнения бесшовного поездобмена (как высокоскоростного пассажирского, так и контейнерного скоростного грузового подвижного состава) предлагается интеграция высокоскоростной линии с классической сетью железных дорог. В случае с развитием железнодорожных контейнерных скоростных перевозок это позволит с минимальными эксплуатационными потерями направлять скоростные грузовые контейнерные поезда по назначению к станциям общей сети железных дорог, где расположены целевые ТЛЦ, а также через линии МЦД и Московского центрального кольца (МЦК) направлять данные категории поездов на другие ВСМ.

В частности, данная интеграция по станции Минск-Центральный позволит следовать без смены направления до станции Колядичи. Съезд в районе существующей станции Кубинка позволит следовать скоростным контейнерным грузовым поездам через Большую Московскую окружную дорогу до станции Белый Раст, а следование в одном створе на участке МЦД Одинцово — Рижская через группы съездов обеспечит выход данной категории поездов на направления г. Санкт-Петербурга с примерным временем следования до г. Минска 9 часов, до г. Нижнего Новгорода — 8 часов и до г. Казани — 10 часов.

Разработанный перспективный (демонстрационный) график движения поездов на ВСМ-4 предусматривает следующие размеры движения (рис. 3):

- 9 пар в сутки высокоскоростных пассажирских поездов сообщением Минск — Москва со скоростью следования до 300 км/ч;
- 2 пары межрегиональных высокоскоростных пассажирских поездов сообщением Минск — Москва со скоростью следования 250 км/ч;
- по 4 пары в сутки региональных высокоскоростных пассажирских поездов сообщением Москва — Смоленск и Смоленск — Минск со скоростью следования до 250 км/ч;

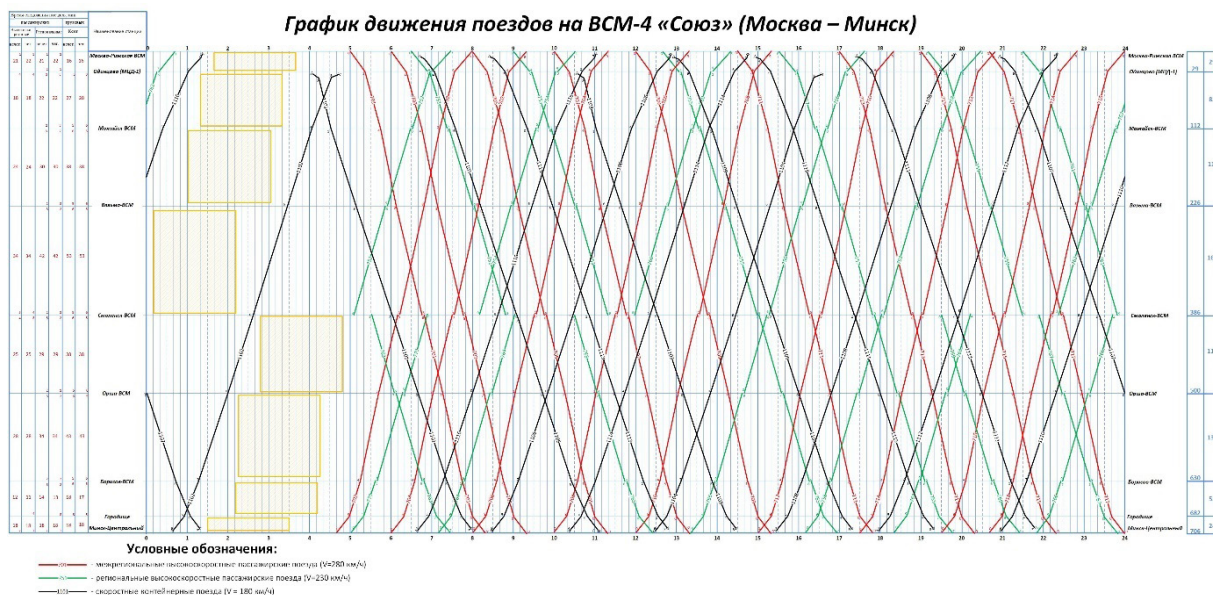


Рис. 3. Перспективный график при организации смешанного движения с интеграцией ускоренных контейнерных поездов для демонстрационного участка ВСМ-4 «Москва — Минск»

– 8 пар скоростных контейнерных грузовых поездов с точками съезда с ВСМ в районе железнодорожной станции Кубинка и на МЦК и МЦД с максимальной скоростью следования до 200 км/ч.

При этом, несмотря на значительную разность скоростей, предложенный график позволяет пропускать скоростные контейнерные грузовые поезда по участку без остановки на всем пути следования для пропуска поездов более приоритетных категорий. Пропускная способность предложенной концепции линии ВСМ-4 при необходимости позволяет предусмотреть больший объем ниток графика для рассматриваемых контейнерных поездов.

Среднее время в пути по данной линии для контейнерного поезда составляет 3 часа 40 минут, что позволяет выполнять разворотные рейсы локомотивным бригадам и тяговым единицам в течение рабочей смены. Вопрос технических аспектов применяемого тягового и нетягового подвижного состава освещен далее. Данная концепция предполагает применение составов из специализированных платформ без переформирования (по типу кольцевого маршрута) для выполнения скоростных контейнерных железнодорожных перевозок. Номинальная длина поезда составляет 17 вагонов, или 425 метров, в целях соблюдения лимита тяговых возможностей локомотива, а также полезной длины приемоотправочных путей (в соответствии с определенными проектными решениями ВСМ-2 «Москва — Казань»). В свою очередь, в качестве тяговой единицы предполагается применение серий двухсистемных электровозов (задействованных в пассажирском движении), приписанных к локомотивным депо Московской железной дороги. Данная

мера определена в целях упрощения технологии технического обслуживания и общей увязки в графике оборота тягового подвижного состава.

Следует отметить основные проблемы технического характера, возникающие при организации движения ускоренных контейнерных поездов по инфраструктуре ВСМ.

Первой и наиболее очевидной проблемой является необходимость доработки нетягового подвижного состава. На сегодняшний день предел конструкционной скорости для фитинговых платформ (вагона-платформы модели 13-6954) — 160 км/ч. Для реализации предложенной концепции скоростных контейнерных поездов предел конструкционной скорости должен быть повышен как минимум до 200 км/ч. В техническом аспекте повышение конструкционной скорости необходимо не только для обеспечения нужной технической и участковой скорости в графике движения, но и для прохождения подвижного состава в кривых (на ВСМ больше подуклонка рельса в кривой для гашения центробежных сил). Также требует решения проблема аэродинамики состава из контейнерных платформ с разрывами над автосцепкой. Позитивным фактором для проведения соответствующих расчетов является стандартизация габаритных параметров контейнеров и схем их размещения на вагоне (для вагонов других типов потребовалось бы учитывать большое количество возможных размеров и сочетаний типов подвижного состава). С учетом особенностей обращения для ВСМ должен быть разработан единый тип (модель) «скоростной» фитинговой платформы, относительно которой и будут выполняться все расчеты и испытания.

Второй проблемой является необходимость адаптации тягового подвижного состава. По аналогии с электровозом Siemens Europrinter может быть выполнена адаптация пассажирских электровозов под скоростные грузовые перевозки (с пассажирскими поездами он развивает скорость 230 км/ч, с грузовыми — 160 км/ч). Из существующих моделей наиболее перспективными представляются модификации локомотива ЭП-20:

– ЭП-20 (модификация под 200 км/ч), максимальная масса брутто состава — 950 т, возможно формирование состава из 17 вагонов с контейнерами средней массой до 20 т, средняя длина состава — 425 метров;

– ЭП-20 (модификация под 160 км/ч), максимальная масса брутто состава — 1100 т, возможно формирование состава из 26 вагонов с контейнерами средней массой до 20 т, средняя длина состава — 650 метров.

Составы большей длины формировать нецелесообразно из-за увеличенного расхода топливно-энергетических ресурсов, из-за необходимости обеспечения полной загрузки состава при движении по расписанию, а также из-за ограничений полезной длины приемоотправочных путей на ВСМ при постановке под обгон.

Еще одну проблему представляет собой необходимость разработки специальных технических условий (возможно, и специальных технических средств)

крепления контейнеров к фитинговым платформам для ВСМ. Очевидно, что существующая нормативная база в виде ТУ [13]), предполагающая движение со скоростями до 100 км/ч, не может быть использована для условий ВСМ. Расчет устойчивости от опрокидывания и других параметров, связанных с креплением, должен быть выполнен как для состояния движения, так и для стационарного состояния с учетом аэродинамики высокоскоростных поездов, проходящих по соседним путям.

Заключение

Предлагаемое решение является вариантом повышения экономической эффективности использования ВСМ в случае их строительства. Интеграция в графике движения высокоскоростных пассажирских поездов и ускоренных контейнерных поездов позволит предоставить грузовладельцам сервис совершенно нового класса и удовлетворить существующий спрос на быструю доставку высокотарифных контейнеризируемых грузов в условиях дефицита пропускной способности на востребованных направлениях. Данный сервис при его реализации с заявленными параметрами качества доставки и грамотной тарифной политикой способен уверенно конкурировать с перевозкой как автомобильным, так и воздушным транспортом.

Для реализации данного проекта требуется решение ряда проблем технического характера, связанных с необходимостью модернизации подвижного состава и средств крепления под новые условия эксплуатации. Однако многолетний положительный опыт эксплуатации ВСМ для пассажирского движения за рубежом и современный уровень моделирования и технического проектирования позволяют надеяться, что при постановке конкретных задач в этой области соответствующие решения будут найдены в достаточно короткие сроки.

Список источников

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года // Министерство транспорта РФ. — URL: <https://mintrans.gov.ru/file/395064> (дата обращения: 23.06.2024).
2. Стратегия инновационного развития транспортного комплекса Республики Беларусь до 2030 года // Белорусская железная дорога. — URL: https://www.rw.by/corporate/press_center/reportings_interview_article/2015/03/strategija_innovacionnogo_razv/ (дата обращения: 23.06.2024).
3. Шкурников С. В. Общие требования к проектированию высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Казань / С. В. Шкурников, Н. С. Бушуев, В. А. Голубцов // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2015. — № 2(57). — С. 26–29.

4. На ПМЭФ представили проекты будущих высокоскоростных магистралей // РИА Новости. — URL: <https://ria.ru/20240605/pmef-1950580879.html> (дата обращения: 23.06.2024).
5. Распоряжение от 5 июня 2024 года №1397-р // Правительство Российской Федерации. — URL: http://static.government.ru/media/files/yDTh61Qf1Az2lwitzE6P7L3_tI3BT9XFI.pdf. (дата обращения: 23.06.2024).
6. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года, утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 № 466-р // ОАО «РЖД». URL: <https://ar2021.rzd.ru/ru/strategic-report/development-programme> (дата обращения: 23.06.2024).
7. Концепция развития транспортно-логистического потенциала Республики Казахстан до 2030 года // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан. — URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2200001116> (дата обращения: 23.06.2024).
8. Концепция развития логистической системы Республики Беларусь на период до 2030 года // Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь. — URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21701024> (дата обращения: 23.06.2024).
9. Аршинцев Д. Н. Способы повышения эффективности контейнерных перевозок и обеспечение безопасности движения контейнерных поездов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Д. Н. Аршинцев. — М.: ВНИИЖТ, 2010. — 24 с.
10. Анализ существующих международных транспортных коридоров, проходящих через территории государств-членов. Аналитический доклад // Департамент транспорта и инфраструктуры ЕЭК. — URL: <https://tinyurl.com/48sfyd62> (дата обращения: 23.06.2024).
11. Белорусская железная дорога в 2023 году перевезла более 1 млн контейнеров // Белорусская железная дорога. — URL: https://www.rw.by/corporate/press_center/news_of_cargo_carriers/2024/01/beloruskaya-zheleznaya-doroga-v-2023-goduperevezla-bolee-1-mln-konteynerov/ (дата обращения: 23.06.2024).
12. Перевозки контейнеров в 2023 году выросли на 14,1 % и превысили 7,4 млн ДФЭ // ОАО «РЖД». — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=213798> (дата обращения: 23.06.2024).
13. Технические условия размещения и крепления грузов (Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) (с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 июля 2024 года)) // Организация сотрудничества железных дорог. — URL: <https://osjd.org/ru/8978/page/106077?id=2845> (дата обращения: 23.06.2024).

Дата поступления: 10.11.2024

Решение о публикации: 14.02.2025

Контактная информация:

КЕКИШ Наталия Анатольевна — канд. техн. наук, доц.; natalia.kekish@gmail.com

МАМЛЕВ Дмитрий Олегович — ст. преподаватель; Marek_15@mail.ru

Mixed Traffic on HSR Infrastructure with Integrated Express Container Trains

N. A. Kekish¹, D. O. Mamlev²

¹Belarusian State University of Transport, 34, Kirova Str., Gomel, 246653, The Republic of Belarus

²Nizhny Novgorod Institute of Railway Engineering, branch of Volga State University of Railway Engineering, 3, Komsomolskaya Square, Nizhny Novgorod, 603011, Russian Federation

For citation: Kekish N. A., Mamlev D. O. Mixed Traffic on HSR Infrastructure with Integrated Express Container Trains. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 158–171. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-158-171

Summary

Purpose: To increase the economic efficiency of high-speed railways (HSR). HSR infrastructure can be used not only for passenger traffic but also for high-speed freight transportation. The potential for using HSR for both passenger and freight traffic has not been sufficiently studied. This paper proposes the integration of high-speed and express passenger trains in the schedule of express container trains. **Methods:** Development of an integrated schedule of passenger and express container trains with specified speeds and priority parameters for each category of trains on a dedicated HSR with transition points to the general railway network; analysis of technical problems of its implementation. **Results:** The newly designed train schedule on the test section has illustrated that the passenger traffic capacity of the given high-speed railway line allows integrating several pairs of express container trains. In addition, it is possible to lay appropriate tracks for their non-stop passage. Thus, the fundamental possibility of implementing a mixed traffic model on a high-speed railway with high quality indicators for both passenger and freight traffic has been proven. Simultaneously, the main technical problems that require solutions for implementing the proposed mixed traffic model have been identified including the need to modify traction and non-traction rolling stock as well as improve fastenings for high-speed traffic. **Practical significance:** The obtained results can be used to develop models for organizing mixed traffic on the designed high-speed railways in order to increase the economic efficiency of their operation by providing high-speed transportation services for high-tariff containerized cargo.

Keywords: HSR, speed, container trains, passenger trains, rolling stock, traffic schedule, capacity.

References

1. *Strategiya razvitiya zhelezodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii do 2030 goda. Ministerstvo transporta RF* [Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030. Ministry of Transport of the Russian Federation]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/file/395064> (accessed: June 23, 2024). (In Russian)
2. *Strategiya innovacionnogo razvitiya transportnogo kompleksa Respubliki Belarus' do 2030 goda. Belorusskaya zheleznaya doroga* [Strategy for the Innovative Development of the Transport Complex of the Republic of Belarus until 2030. Belarusian Railways]. Available at: https://www.rw.by/corporate/press_center/reportings_interview_article/2015/03/strategija_innovacionnogo_razv/ (accessed: June 23, 2024). (In Russian)
3. Shkurnikov S. V., Bushuev N. S., Golubcov V. A. Obshchie trebovaniya k proektirovaniyu vysokoskorostnoj zhelezodorozhnoj magistrali Moskva — Kazan' [General Requirements for the Design of the Moscow-Kazan High-Speed Railway]. *Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke,*

praktike, ekonomike [Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, Economics]. 2015, Iss. 2(57), pp. 26–29. (In Russian)

4. *Na PMEF predstavili proekty budushchih vysokoskorostnyh magistralей*. RIA Novosti [Projects for future high-speed highways presented at SPIEF. RIA Novosti]. Available at: <https://ria.ru/20240605/pmef-1950580879.html> (accessed: June 23, 2024). (In Russian)

5. *Rasporyazhenie ot 5 iyunya 2024 goda №1397-r. Pravitel'stvo Rossijskoj Federacii* [Order of 5 June 2024 № 1397-r. Government of the Russian Federation]. Available at: http://static.government.ru/media/files/yDTh61Qf1Az2lwitzE6P7L3_tI3BT9XFI.pdf (accessed: June 23, 2024). (In Russian)

6. *Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO "RZHD" do 2025 goda, utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 19.03.2019 № 466-r. OAO "RZHD"* [Long-term development program of JSC Russian Railways until 2025, approved. by order of the Government of the Russian Federation dated 19.03.2019 № 466-r. JSC Russian Railways]. Available at: <https://ar2021.rzd.ru/ru/strategic-report/development-programme> (accessed: June 23, 2024). (In Russian)

7. *Koncepciya razvitiya transportno-logisticheskogo potentsiala Respubliki Kazahstan do 2030 goda* [Concept for the development of the transport and logistics potential of the Republic of Kazakhstan until 2030]. *Informacionno-pravovaya sistema normativnyh pravovyh aktov Respubliki Kazahstan* [Information and legal system of regulatory legal acts of the Republic of Kazakhstan]. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2200001116> (accessed: June 23, 2024). (In Russian)

8. *Koncepciya razvitiya logisticheskoy sistemy Respubliki Belarus' na period do 2030 goda* [Concept for the development of the logistics system of the Republic of Belarus for the period up to 2030]. *Nacional'nyj pravovoj internet-portal Respubliki Belarus'* [National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus]. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21701024> (accessed: June 23, 2024). (In Russian)

9. Arshincev D. N. *Sposoby povysheniya effektivnosti kontejnernih perevozok i obespechenie bezopasnosti dvizheniya kontejnernih poezdov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.07* [Methods of increasing the efficiency of container transportation and ensuring the safety of container trains: author's abstract. diss. ... candidate of technical sciences: 05.22.07]. Moscow: VNIIZHT Publ., 2010, 24 p. (In Russian)

10. *Analiz sushchestvuyushchih mezhdunarodnyh transportnyh koridorov, prohodyashchih cherez territorii gosudarstv — chlenov. Analiticheskij doklad* [Analysis of existing international transport corridors passing through the territories of member states. Analytical report]. *Departament transporta i infrastruktury EEK* [Department of Transport and Infrastructure of the EEC]. Available at: <https://tinyurl.com/48sfyd62> (date of access: 23.06.2024). (In Russian)

11. *Belorusskaya zheleznaya doroga v 2023 godu perevezla bolee 1 mln konteynerov* [Belarusian Railways transported over 1 million containers in 2023]. *Belorusskaya zheleznaya doroga* [Belarusian Railways]. Available at: https://www.rw.by/corporate/press_center/news_of_cargo_carriers/2024/01/belorusskaya-zheleznaya-doroga-v-2023-godu-perevezla-bolee-1-mln-konteynerov/ (accessed: June 23, 2024). (In Russian)

12. Perevozki kontejnerov v 2023 godu vyrosli na 14,1 % i prevysili 7,4 mln DFE [Container transportation in 2023 increased by 14.1 % and exceeded 7.4 million TEU]. *OAO "RZHD"* [JSC Russian Railways]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=213798> (accessed: June 23, 2024). (In Russian)

13. Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya gruzov (Prilozhenie 3 k Soglasheniyu o mezhdunarodnom zheleznodorozhnom gruzovom soobshchenii (SMGS) (s izmeneniyami i dopolneniyami po sostoyaniyu na 1 iyulya 2024 goda)) [Technical conditions for the placement and securing of cargo (Appendix 3 to the Agreement on International Rail Freight Traffic (SMGS) (with amendments and additions as of July 1, 2024))]. *Organizaciya sotrudnichestva zheleznih dorog* [Organization for Cooperation between Railways]. Available at: <https://osjd.org/ru/8978/page/106077?id=2845> (accessed: June 23, 2024). (In Russian)

Received: November 10, 2024

Accepted: February 14, 2025

Author's information:

Nataliya A. KEKISH — PhD in Engineering, Associate Professor; natalia.kekish@gmail.com

Dmitry O. MAMLEV — Senior Lecturer; Marek_15@mail.ru

УДК 62-65

Обеспечение электромагнитной совместимости устройств компенсации реактивной мощности в каналах поездной радиосвязи диапазона гектометровых волн

А. В. Агунов¹, А. А. Карабанов³, И. Ю. Абдулхаков^{2,3}, К. М. Саргсян^{2,3}

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Российская Федерация, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф

³ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», Российская Федерация, 196641, Санкт-Петербург, п. Металлострой, промзона «Металлострой», дорога на Металлострой, 3, корп. 2

Для цитирования: Агунов А. В., Карабанов А. А., Абдулхаков И. Ю., Саргсян К. М. Обеспечение электромагнитной совместимости устройств компенсации реактивной мощности в каналах поездной радиосвязи диапазона гектометровых волн // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 172–182. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-172-182

Аннотация

Цель: Провести анализ причин ухудшения качества или полного отсутствия поездной радиосвязи (ПРС) диапазона гектометровых волн (ГМВ) на участках железных дорог с подключенными к линии переменного тока 25 кВ полупроводниковыми устройствами компенсации реактивной мощности, модуляция выходных параметров которых осуществляется импульсно с изменением временных параметров импульсов. **Методы:** Анализ производился на основе схемы замещения выходного фильтра устройства компенсации, где распределенные элементы, в том числе паразитные, заменены сосредоточенными, что позволяет прогнозировать изменение характера реакции элемента в частотной области и, следовательно, изменение передаточной характеристики фильтра. В том числе рассмотрено изменение характеристик фильтра при подключении к участку линии, представленной в виде однородно-искусственной линии. Основные паразитные параметры фильтра были определены приближенно: на основе инженерных методик по геометрическим размерам самих элементов и их подключения. Аналитически на основании требований нормативных стандартов был определен коэффициент передачи фильтра для частоты гектометрового диапазона. В программном пакете LtSpice был разработан комплекс компьютерных моделей, на основе которого исследовались частотные характеристики фильтра и их изменение в зависимости от величины паразитных параметров элементов, а также его соответствие предъявляемым требованиям. В том числе проведен аналитический расчет характеристик фильтра методом комплексных амплитуд с учетом потерь перемагничивания применимого материала высокочастотного дросселя фильтра. **Результаты:** На основе проведенных расчетов подобрана оптимальная конфигурация фильтра начиная с частоты в 100 кГц, обеспечивающего подавление помехи на уровне не менее 45 дБ (178 раз). Рассмотрена передаточная характеристика фильтра как для синфазной, так и для дифференциальной составляющих помехи. Параметры фильтра подбирались в том числе таким образом, чтобы не возникало добротных побочных резонансов, способных привести к самовозбуждению устройства компенсации, при котором оно начнет генерировать собственные гармоники. **Практическая значимость:** Разработано решение по обеспечению и по возможной доработке устройств компенсации реактивной мощности с плавным регулированием на основе полупроводниковых преобразователей для обеспечения их электромагнитной совместимости в области радиочастотного диапазона.

Ключевые слова: Электромагнитная совместимость, поездная радиосвязь диапазона гектометровых волн, электромагнитные помехи на линиях РЖД, доработка фильтра устройств компенсации реактивной мощности с плавным регулированием, частотный анализ.

Введение

Для увеличения пропускной способности и стабилизации напряжения, а также для компенсации реактивной мощности [1, 2] ОАО «РЖД» реализует программу по оснащению устройствами компенсации реактивной мощности с плавным регулированием (УКРМП), выполненными на базе IGBT, которые устанавливаются в местах размещения постов секционирования системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ [3].

В настоящее время уже реализовано более 150 подобных проектов по сети дорог ОАО «РЖД», однако в процессе эксплуатации был выявлен ряд замечаний, одно из них — это влияние на работу ПРС при прохождении локомотива вблизи поста секционирования с УКРМП.

В основе УКРМП находится преобразователь, выполненный на базе силовых IGBT, при этом сам преобразователь представляет из себя многоуровневый инвертор напряжения, состоящий из последовательно соединенных силовых модулей, как показано на рис. 1. В составе УКРМП использовано 63 последовательно соединенных силовых модуля. При этом самостоятельного питания в звене постоянного тока каждого модуля нет (на конденсаторе C1), а напряжение формируется за счет сдвига вектора выходного напряжения УКРМП таким образом, чтобы оно потребляло активную мощность, за счет которой формируется необходимое напряжение в звене постоянного тока модуля, а также компенсируются собственные потери мощности УКРМП.

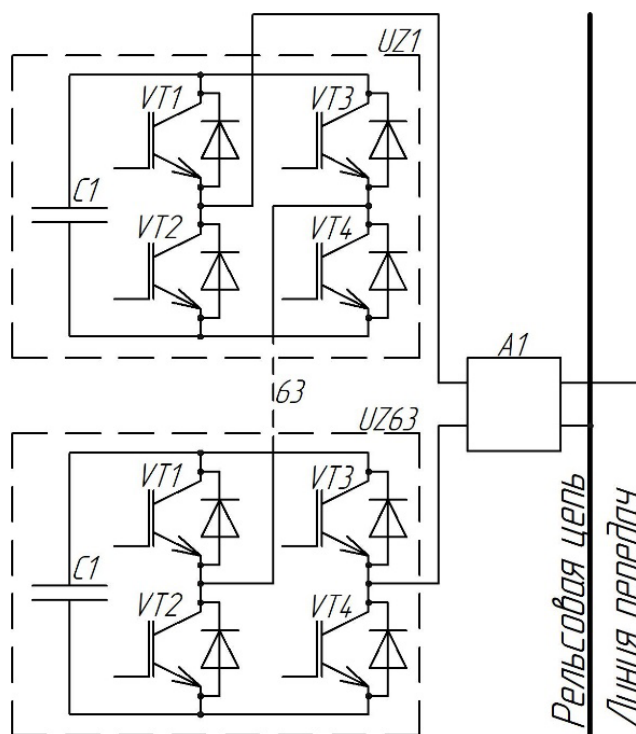


Рис. 1. Функциональная схема УКРМП

Последовательное соединение силовых модулей позволяет не только обеспечить высокий класс устройства по напряжению, но и снизить пульсации выходного напряжения. Пульсации снижаются благодаря одновременно эквивалентной широтно-импульсной модуляции (в зависимости от стратегии управления) [4] выходного напряжения только одним силовым модулем, в соответствии с участком модулируемого выходного напряжения (тока).

Определение требуемого коэффициента передачи фильтра

Помехи, влияющие на ПРС диапазона ГМВ, могут быть вызваны двумя факторами: высшими гармониками ШИМ преобразования выходного напряжения; осцилляцией во время коммутации транзисторных ячеек каждой инверторной ячейки. Таким образом, вводя допущение, что обе составляющих помех коррелируют и находятся в фазе, можно определить максимально необходимый уровень подавления фильтра (при требуемом 56 дБ/мкВ) [5, 6] для высших гармоник выходного напряжения УКРМП из соотношения:

$$H = 20 \lg \left(U_{\text{СМ}} \left(D + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{k} \sin(k\pi D) \right) \right) + U_{\text{осцилляции}} \frac{\tau \omega_{\text{СМ}}}{2\pi \cdot 2} \right) + 56 - 120 = -49 \text{ дБ},$$

где $U_{\text{СМ}}$ — напряжение постоянного звена силового модуля (500 В);

D — коэффициент заполнения выходных импульсов (максимум амплитуды гармоник при 0,5);

k — номер ближайшей к 2,13 МГц нечетной гармоники;

$U_{\text{осцилляции}}$ — амплитуда перенапряжения на транзисторе при коммутации [7] (принято равным 300 В);

τ — постоянная времени осцилляции на транзисторе при коммутации (принята равной 1,5 мкс);

$\omega_{\text{СМ}}$ — циклическая частота работы силового модуля, равная 3142 рад/с.

Параметры фильтра и сети при проведении частотного анализа в области высоких частот

При разработке фильтра необходимо также учитывать паразитные параметры элементов и возможные изменения АЧХ фильтра вследствие его взаимодействия с паразитными параметрами линии. На рис. 2, а приведена функциональная схема выходного фильтра УКРМП. На рис. 2, б изображена расчетная схема фильтра с паразитными параметрами с учетом параметров подключенной к фильтру линии передач длиной 2 км (длина, превышающая десять длин волн сигнала гектометрового диапазона), представленной в виде однородной искусственной линии с

волновым сопротивлением 500 Ом и активным сопротивлением, обеспечивающим затухание волны к концу линии и, следовательно, отсутствие отраженной волны напряжения от разомкнутого конца линии [8–10]. Количество ячеек одно-родно-искусственной линии принимается равным 40. Важно рассмотреть в том числе взаимодействие фильтра с линией, так как предполагается, что распространение помехи в эфир осуществляется именно через нее, как единственного объекта, обладающего геометрическими размерами, превышающими четверть длины волны гектометрового частотного диапазона.

Фильтр состоит из следующих сосредоточенных элементов: $Ld1$ и $Ld2$ — дроссель на сердечниках с высокими потерями перемagnичивания, индуктивность которых равна 6 мкГн; $Cy1$, $Ry1$ и $Cy2$, $Ry2$ — демпфирующие цепи, ограничивающие добротность паразитных резонансов для дифференциальной и синфазной составляющих помехи, емкость и сопротивление которых равно 0,1 мкФ и 20 Ом соответственно; $C1$, $R1$ — демпфирующая цепь, определяющая добротность взаимодействия паразитных индуктивностей с емкостью $C1$ (емкость равна 1,1 мкФ, а сопротивление 30 Ом); $C1$ — фильтрующая выходная емкость 0,022 мкФ, которая увеличивает подавление фильтра на высоких частотах и компенсирует паразитную индуктивность цепи $C1$, $R1$. Учтены также паразитные параметры элементов: $LP1$ — паразитная индуктивность группы ленточных резисторов, равная 30 мкГн; $Cp1$, $Cp2$ — проходная емкость реакторов, которая расчетно, при округлении до сотен, равняется 200 пФ. На исполнение цепей $Cy1$, $Ry1$ и $Cy2$, $Ry2$ и $Cx1$ в рассматриваемом частотном диапазоне, как будет показано далее, накладывается ограничение по величине паразитной индуктивности ($Lyp1$, $Lyp2$ и $Lpx1$ соответственно).

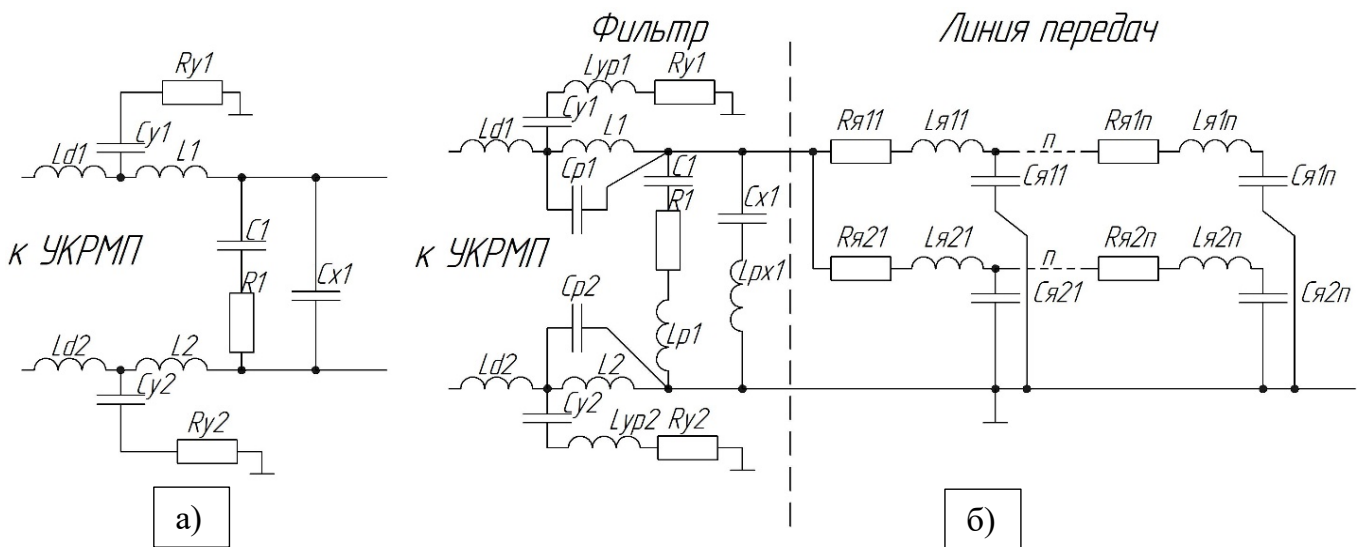


Рис. 2. Схема замещения фильтра:
 а — холостой ход; б — с учетом характеристик подключенной линии

Частотный анализ выходного фильтра УКРМП в области высоких частот

Для исследования фильтра необходимо построить его АЧХ (рис. 3) при различных условиях:

Hu_{diff}, XX — передаточная характеристика фильтра для дифференциальной составляющей помехи и холостом ходе выходных зажимов фильтра. Наблюдается наличие двух ярко выраженных локальных минимумов, вызванных наличием резонансных процессов: на частоте 122 кГц из-за резонанса реакторов $L1$ и $L2$ с их паразитными проходными емкостями $Cp1$ и $Cp2$, после которой реакция реактора становится емкостной; на частоте 1,5 МГц из-за наличия паразитной индуктивности Lpx в цепи выходной емкости $Cx1$;

$Hu_{diff}, \rho = 500$ — передаточная характеристика фильтра для дифференциальной составляющей помехи и нагрузке на 500 Ом волнового сопротивления линии сети. Можем наблюдать пренебрежимо малое отклонение от передаточной характеристики для случая холостого хода выхода фильтра;

$Hu_{diff}, XX, Lpx = 0$ — передаточная характеристика фильтра для дифференциальной составляющей помехи и холостом ходе выходных зажимов фильтра с нулевой паразитной индуктивностью цепи емкости $Cx1$. Наблюдается исключение второго локального минимума передаточной характеристики, при этом сохраняется падающий характер АЧХ во всем частотном диапазоне после $f1$. Сравнение данной характеристики с первой демонстрирует необходимость наложения требований к конструированию цепи выходной емкости $Cx1$ с целью выдержки параметров по паразитной индуктивности. При этом данную цепь исключать нельзя, иначе возникает подъем АЧХ до уровня положительных значений передаточной характеристики из-за резонанса, вызванного взаимодействием паразитных индуктивностей резисторов выходной демпфирующей цепи фильтра $C1, R1, Lp1$ и проходных емкостей реакторов $L1$ и $L2$;

$Hu_{sin}, \rho = 500$ — передаточная характеристика фильтра для синфазной составляющей помехи и нагрузке на 500 Ом волнового сопротивления сети. Из-за иного пути протекания помехи АЧХ фильтра поднимается на 6 дБ (в 2 раза) относительно передаточной характеристики для дифференциальной составляющей помехи без возникновения иных паразитных резонансов;

$Hu_{diff}, XX, Ld + \tan(\delta)$ — передаточная характеристика фильтра для дифференциальной составляющей помехи с учетом потерь перемагничивания дросселей $Ld1$ и $Ld2$. Падение проницаемости на 3 дБ для выбранного материала дросселя (порошковое железо, характеристика –52) наблюдается на частоте 8 МГц, из-за чего допускаем определение мнимой составляющей магнитной проницаемости материала дросселя через тангенс фиксированного угла магнитных потерь, при этом угол определяем равным 40° . Данная передаточная характеристика получена аналитически — методом

комплексных амплитуд, и, в отличие от прошлых рассматриваемых характеристик, ощутимое отличие наблюдается лишь после частоты в 3 МГц, что отмечено штрихпунктирной линией на рис. 3. Учет активных потерь перемагничивания сердечника дросселя в два раза снижает рост передаточной характеристики после частоты f_2 , что, естественно, благоприятно сказывается на характеристиках фильтра. На частоте 10 МГц активная составляющая проницаемости сравнивается с реактивной, и результирующая проницаемость стремится к нулю, следовательно, это небезосновательно позволяет предположить об отсутствии с ростом частот паразитных резонансов, связанных с дросселями $Ld1$ и $Ld2$ фильтра.

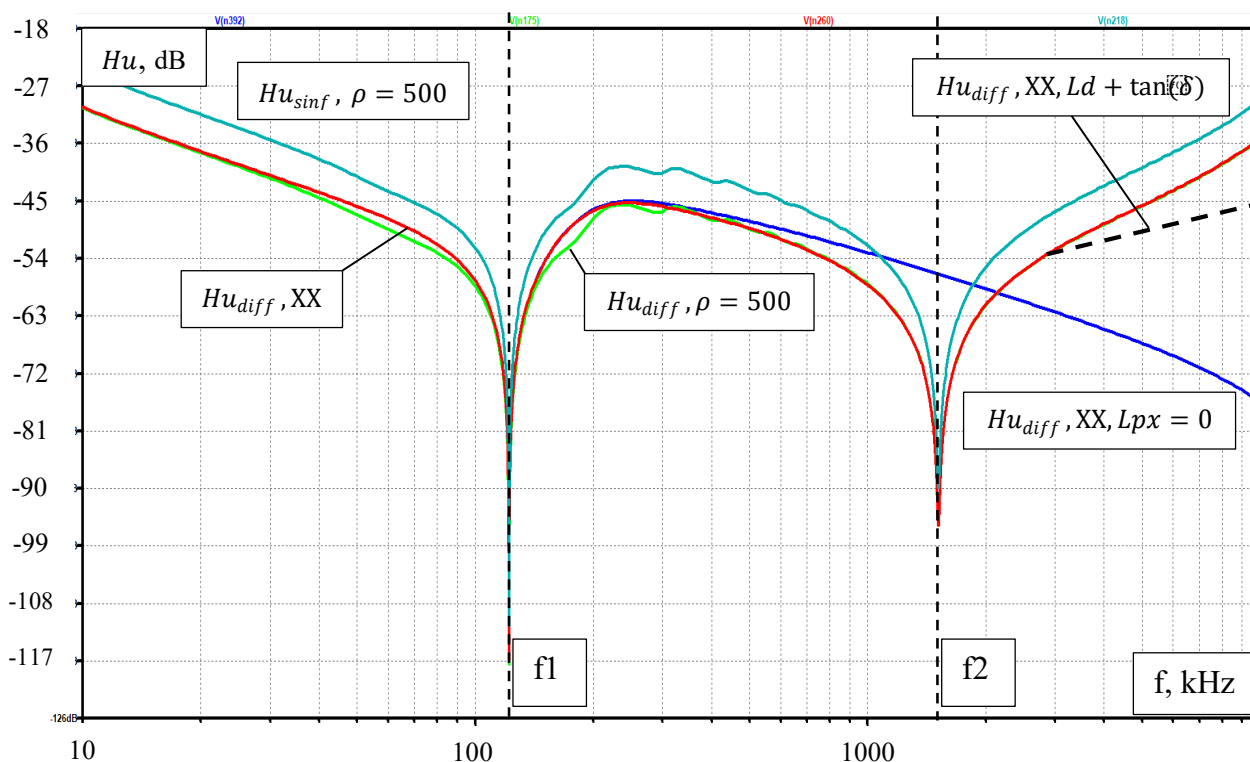


Рис. 3. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики фильтра

Практические рекомендации по параметрам цепей фильтра

Таким образом, по результатам частотного анализа авторы дают следующие рекомендации: исключение емкостных элементов из фильтра недопустимо, так как коэффициент передачи фильтра становится близким к 1 (начиная с частоты в 122 кГц) из-за изменения характера реакторов с индуктивного на емкостной (он практически становится емкостью); необходимо учитывать паразитные параметры ветвей, из-за которых передаточная характеристика фильтра в том числе может стать положительной, при этом сильно зависимой от волнового сопротивления линии (то есть помехи могут только усилиться).

Наибольшее влияние на рост АЧХ фильтра в частотном диапазоне выше 1 МГц оказывают цепь конденсатора C_x и его паразитная индуктивность. Для удержания АЧХ на заданном уровне необходимо разделить емкость C_x на несколько независимых цепей таким образом, чтобы паразитная индуктивность каждой цепи с ее емкостью удовлетворяла условию:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{px_{\text{звена}}}C_{x_{\text{звена}}}}} > 1,5 \text{ MHz.}$$

По результатам проведенных расчетов были выработаны также рекомендации по параметрам демпфирующих цепей на землю в связке с L_{d1} и L_{d2} , которые должны удовлетворять следующим условиям:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\left(2\pi \cdot 2,15 \cdot 10^6 \cdot L_{d1,d2}\right)^2 + R_{Ld1}^2} \gg \sqrt{R_{y1}^2 + \left(2\pi \cdot 2,15 \cdot 10^6 \cdot L_{yp1,yp2}\right)^2} \\ \frac{1}{R_{y1,y2}} \sqrt{\frac{L_{d1,d2} + L_{yp1,yp2}}{C_{y1,y2}}} < 0,5 \\ \frac{1}{R_{y1,y2}} \sqrt{\frac{L_{yp1,yp2}}{C_{y1,y2}}} < 3,5 \end{array} \right. , \quad (1)$$

где R_{Ld1} — активное сопротивление дросселя, обусловленное потерями перемагничивания сердечника.

Первое условие (1) говорит о том, что сопротивление дросселя на частоте помехи должно быть много больше сопротивления демпфирующей цепи на землю. Второе условие (1) говорит о том, что добротность резонанса, вызванного взаимодействием дросселя и демпфирующей цепи на землю, должна быть меньше 0,5. Третье условие (1) говорит о том, что добротность паразитного параллельного контура, образующегося паразитными индуктивностями демпфирующих цепей на землю и проходных емкостей реакторов, должна быть меньше 3,5.

Размещение элементов фильтра в рамках существующих решений

С помощью современных инструментов трехмерного моделирования в том числе определены места оптимального размещения оборудования фильтра. План размещения фильтра представлен на рис. 4.

При этом, что немаловажно, разработка за счет малых габаритов вписывается в возможные доработки фильтров, состоящих только из реакторов, чтобы обеспечить должный уровень подавления помех, которые влияют на работу ПРС.

Таким образом, по итогам выполненных работ завершен расчет характеристик выходного фильтра УКРМП. Была разработана модель, которая с учетом

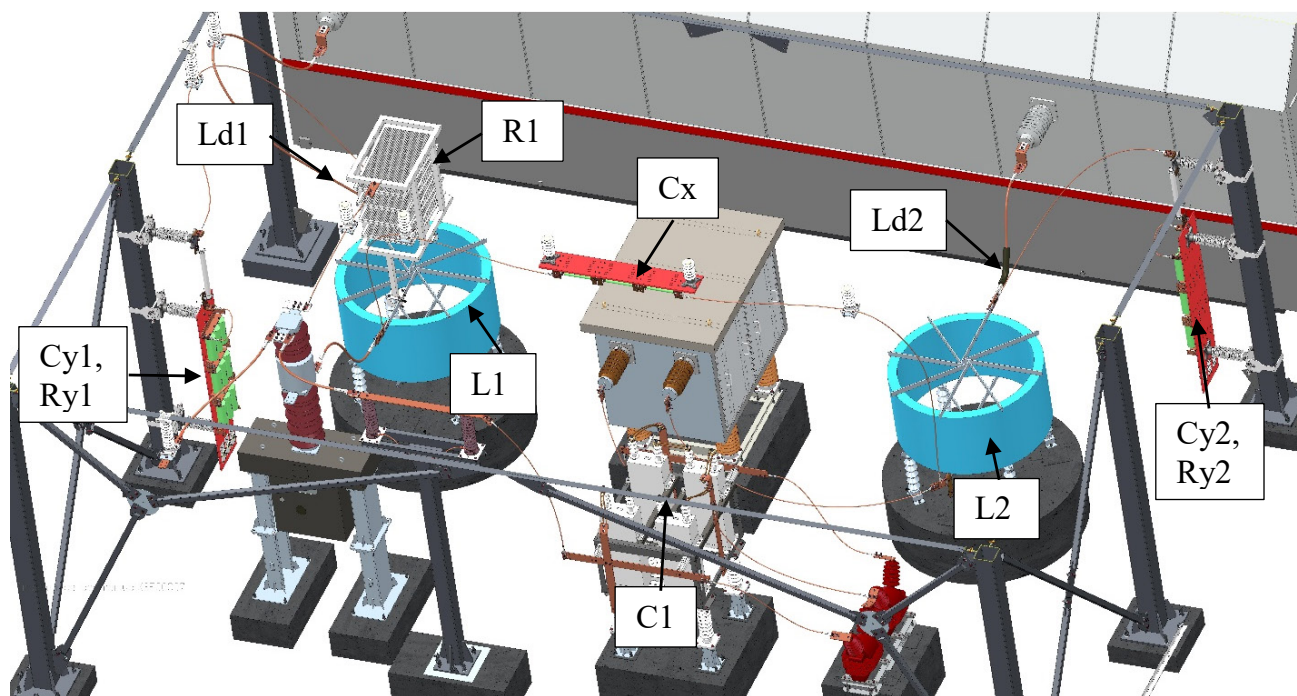


Рис. 4. Размещение элементов фильтра

паразитных параметров позволила подобрать элементы и их номиналы таким образом, чтобы фильтр удовлетворял заданным требованиям. На основании расчетов даны рекомендации по номиналам элементов фильтра с учетом паразитных параметров цепей. На основании проведенных схемотехнических расчетов была разработана компьютерная 3D-модель дополнительного оборудования (фильтра) для размещения на УКРМП.

Заключение

В работе рассчитан необходимый коэффициент передачи фильтра, обеспечивающий не превышение максимально допустимого уровня электромагнитных помех в направляющей линии поездной радиосвязи, создаваемых при работе УКРМП.

С учетом паразитных параметров элементов разработан комплекс компьютерных моделей и подобрана оптимальная конфигурация цепей фильтра.

Даны практические рекомендации по ограничениям паразитных параметров цепей фильтра.

Разработано конструктивное решение по размещению и доработке фильтра, в том числе для существующих объектов. Доработка позволяет обеспечить электромагнитную совместимость УКРМП в диапазоне гектометровых волн поездной радиосвязи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Герман Л. А. Анализ электромагнитных процессов в тяговой сети при включении комбинированной фильтрокомпенсирующей установки на посту секционирования / Л. А. Герман, В. П. Гончаренко, А. А. Карабанов и др. // *Электричество*. — 2022. — № 6. — С. 20–30.
2. Берзан В. П. Компенсация реактивной мощности тяговой сети электрифицированного железнодорожного транспорта / В. П. Берзан, В. И. Пацок, В. К. Римский и др. // *Проблемы региональной энергетики*. — 2010. — № 2(13). — С. 19–34.
3. Герман Л. А. Улучшение режима работы тяговой сети переменного тока с односторонним питанием / Л. А. Герман, А. А. Карабанов // *Железнодорожный транспорт*. — 2022. — № 2. — С. 50–53.
4. Николаев А. В. Разработка принципов управления статическим компенсатором (СТАТКОМ) и исследование его работы на подстанциях переменного и постоянного тока: специальность 05.14.02: автореф. канд. тех. наук / А. В. Николаев. — СПб., 2005. — 19 с.
5. ГОСТ 33436.3-1—2015. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-1. Железнодорожный подвижной состав. Требования и методы испытания. — М.: Стандартинформ, 2016.
6. Горевой И. М. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения с поездной радиосвязью: автореф. дисс. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / И. М. Горевой. — М., 2011. — 24 с.
7. Piotr M. Design of high voltage busbar: tradeoff between electrical field and stray / M. Piotr, S. Jean-Luc, Ch. Piotr. — 2003. — 6 p.
8. Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Часть вторая. Теория переменных токов / П. Л. Калантаров, Л. Р. Нейман. — Ленинград, 1948. — С. 412.
9. Шаманов В. И. Параметры рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости / В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. ИГУПС. — 2015. — № 4. — С. 196–203.
10. Короткевич М. А. Определение емкостей двухцепных воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ / М. А. Короткевич, А. Ю. Охременко. — БНГУ, 2003. — С. 6.

Дата поступления: 12.12.2024

Решение о публикации: 28.02.2025

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, проф.; alexagunov@mail.ru

КАРАБАНОВ Артем Александрович — директор проектно-конструкторского управления; karabanov.art@yandex.ru

АБДУЛХАКОВ Ильяс Юсыфович. — канд. техн. наук, доц. кафедры², начальник группы проектно-конструкторского управления³; abdulkhakov.iljas@yandex.ru

САРГСЯН Карен Мисакович — магистрант², инженер-схемотехник проектно-конструкторского управления³; wolynx@mail.ru

Ensuring Electromagnetic Compatibility of Reactive-Power Compensation Devices in Train Hectometre-Wave Radio Channels

A. V. Agunov¹, A. A. Karabanov³, I. Yu. Abdulkhakov^{2,3}, K. M. Sargsyan^{2,3}

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5, litera F, Professor Popov Str., Saint Petersburg, 197022, Russian Federation

³NII EFA-ENERGO, LLC, Doroga na Metallostroy, 3, bld 2, promzona "Metallostroy", Metallostroy, Saint-Petersburg, 196641, Russian Federation

For citation: Agunov A. V., Karabanov A. A., Abdulkhakov I. Yu., Sargsyan K. M. Ensuring Electromagnetic Compatibility of Reactive-Power Compensation Devices in Train Hectometre-Wave Radio Channels. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 172–182. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-172-182

Summary

Purpose: To analyze the cause of quality deterioration or total lack of train hectometre-wave (HMW) radio communication (TRC) on 25 kV AC railway sections using reactive-power compensation semiconductor devices having pulse-modulated output parameters with changing pulse time parameters. **Methods:** The analysis was carried out based on the replacement circuit of the compensation device output filter where distributed elements including parasitic ones were replaced by concentrated ones, which made it possible to predict a change in the nature of the element's reaction in the frequency domain and, consequently a change in the filter transfer characteristics. In particular, the filter characteristics changes were studied when it was connected to a railway section represented as a homogeneous artificial line. The filter's main parasitic parameters were approximately determined according to the engineering techniques based on the geometric dimensions of the elements as such and their connections. In compliance with the requirements of regulatory standards, the filter transmission coefficient for the hectometer range frequency has been determined analytically. A set of computer models was developed in the *LTSpice* package that helped to study the filter frequency characteristics and their change depending on the magnitude of the elements' parasitic parameters, as well as the filter compliance with the requirements. In particular, an analytical calculation of the filter characteristics by the method of complex amplitudes was carried out taking into account the alternating magnetization loss of the high-frequency filter choke material applied. **Results:** Based on the calculations carried out, the optimal filter configuration has been selected starting from a frequency of 100 kHz providing interference suppression at a level not lower than 45 dB (178 times). The filter transfer characteristics have been considered for both common-mode and differential components of the interference. The filter parameters have been selected, among other things, in such a way that there would be no good side resonances that could lead to self-excitation of the compensation device that would generate its own harmonics. **Practical significance:** A solution has been found to provide and possibly refine reactive-power compensation devices with smooth control based on semiconductor converters to ensure their electromagnetic compatibility in the radio frequency band.

Keywords: Electromagnetic compatibility, train hectometre radio communication, electromagnetic interference on Russian Railways lines, refinement of the reactive-power compensation device filter with smooth control, frequency analysis.

References

1. German L. A., Goncharenko V. P., Karabanov A. A. et al. Analiz elektromagnitnykh protsessov v tyagovoy seti pri vklyuchenii kombinirovannoy fil'trokompensiruyushchey ustanovki na postu sektionirovaniya [Analysis of electromagnetic processes in the traction network when switching on a combined filter-compensating unit at a sectioning post]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2022, Iss. 6, pp. 20–30. (In Russian)

2. Berzan V. P., Patsyuk V. I., Rimskiy V. K. et al. Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti tyagovoy seti elektrifitsirovannogo zheleznodorozhnogo transporta [Reactive power compensation of the traction network of electrified rail transport]. *Problemy regional'noy energetiki* [Problems of regional energy]. 2010, Iss. 2(13), pp. 19–34. (In Russian)
3. German L. A., Karabanov A. A. Uluchshenie rezhima raboty tyagovoy seti peremennogo toka s odnostoronnim pitaniem [Improving the operating mode of an AC traction network with one-way power supply]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2022, Iss. 2, pp. 50–53. (In Russian)
4. Nikolaev A. V. *Razrabotka printsipov upravleniya staticheskim kompensatorom (STATKOM) i issledovanie ego raboty na podstantsiyakh peremennogo i postoyannogo toka: spetsial'nost' 05.14.02: avtoref. kand. tekhn. nauk* [Development of control principles for a static compensator (STATCOM) and a study of its operation at AC and DC substations: specialty 05.14.02: author's abstract. candidate of technical sciences]. St. Petersburg, 2005, 19 p. (In Russian)
5. *GOST 33436.3-1—2015. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Sistemy i oborudovanie zheleznodorozhnogo transporta. Chast' 3-1. Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Trebovaniya i metody ispytaniya* [GOST 33436.3-1—2015. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Systems and equipment of railway transport. Part 3-1. Railway rolling stock. Requirements and test methods]. Moscow: Standartinform Publ., 2016. (In Russian)
6. Gorevoy I. M. *Elektromagnitnaya sovmestimost' sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s poezdnoy radiosvyaz'yu: avtoref. disc. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03* [Electromagnetic compatibility of traction power supply system with train radio communication: author's abstract. diss. ... candidate of technical sciences: 05.09.03]. Moscow, 2011, 24 p. (In Russian)
7. Piotr M., Jean-Luc S., Piotr Ch. Design of high voltage busbar: tradeoff between electrical field and stray. 2003, 6 p.
8. Kalantarov P. L., Neyman L. R. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Chast' vtoraya. Teoriya peremennykh tokov* [Theoretical foundations of electrical engineering. Part two. Theory of alternating currents]. Leningrad, 1948, p. 412. (In Russian)
9. Shamanov V. I., Trofimov Yu. A. Parametry rel'sovykh liniy v zadachakh elektromagnitnoy sovmestimosti [Parameters of rail lines in electromagnetic compatibility problems]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. IGUPS* [Modern technologies. System analysis. Modeling. IGUPS]. 2015, Iss. 4, pp. 196–203. (In Russian)
10. Korotkevich M. A., Okhremenko A. Yu. *Opreделение емкостей двуконтурных воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ* [Determination of capacities of double-circuit overhead power transmission lines with a voltage of 35 kV]. BNGU, 2003, p. 6. (In Russian)

Received: December 12, 2024

Accepted: February 28, 2025

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Artem A. KARABANOV — Director, Design and Engineering Department; karabanov.art@yandex.ru

Il' yas Yu. ABDULKHAKOV — PhD in Engineering, Associate Professor², Head of Group, Design and Engineering Department³; abdulhakov.iljas@yandex.ru

Karen M. SARGSYAN — Master's Degree Student², Engineer of the Design and Engineering Department³; wolynx@mail.ru

УДК 621.331:621.311

Развитие технологии борьбы с гололедом на контактной сети железных дорог

Ли Июань, И. П. Викулов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ли Июань, Викулов И. П. Развитие технологии борьбы с гололедом на контактной сети железных дорог // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 183–200. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-183-200

Аннотация

Цель: Проанализировать современные технологии борьбы с обледенением контактной сети железных дорог, сосредоточив внимание на развитии и применении методов плавки гололеда, с особым акцентом на опыт Китая. Выявить ключевые достижения стран — лидеров в данной области, проследить эволюцию технологий, провести сравнительный анализ применяемых практик в России, Китае и других странах, а также определить их преимущества и недостатки. **Методы:** Исследование основывается на анализе актуальной научной литературы и применении комплексного подхода к изучению технологий борьбы с обледенением контактной сети железных дорог. Сравнительный анализ широко используемых методов борьбы с обледенением в различных странах с целью выявления их преимуществ и недостатков, а также оценки перспектив дальнейшего развития технологий. Изучение интеллектуальных систем управления плавкой гололеда с использованием статических генераторов реактивной мощности (SVG) в сочетании с устройствами переключения емкостей и реакторов (TSC/TSR), которые позволяют не только адаптировать параметры системы тягового электроснабжения, но и осуществлять плавку гололеда с учетом изменений погодных условий в реальном времени. **Результаты:** Установлено, что ключевые методы борьбы с обледенением контактной сети, такие как токовый нагрев, использование статических генераторов реактивной мощности (SVG) и интеграция интеллектуальных систем управления, способствуют повышению надежности и энергоэффективности систем. Показано, что внедрение современных инновационных решений позволяет оптимизировать процесс борьбы с обледенением, снижать эксплуатационные затраты и адаптировать технологии к сложным климатическим условиям. **Практическая значимость:** Данная статья служит основой для понимания существующих противообледенительных систем железнодорожных контактных сетей. Основное внимание уделено анализу опыта ведущих стран, который может быть использован как справочный материал для совершенствования существующих и разработки новых технологий борьбы с обледенением проводов контактной подвески. Инновационные подходы, описанные в статье, могут быть интегрированы в существующие системы, чтобы повысить их надежность, снизить эксплуатационные затраты и улучшить экологическую устойчивость. На основе представленных данных и графических материалов оцениваются реальные перспективы внедрения современных решений для защиты железнодорожных контактных сетей.

Ключевые слова: Железная дорога, контактная сеть, контактный провод, обледенение, методы борьбы с обледенением.

Введение

Контактная сеть является важной частью электрифицированных железных дорог и представляет собой особый тип линии электропередачи, установленной над железной дорогой. Токосъемник локомотива контактирует с ней, получая

электричество для электровозов. Контактная сеть распределена вдоль железнодорожных путей и продолжает увеличиваться с развитием электрификации железных дорог. Являясь ключевой частью системы тягового электроснабжения, контактная сеть находится на открытом воздухе и подвержена воздействию природно-климатических факторов. В условиях холода и влажности часто происходит обледенение элементов контактной сети, что серьезно влияет на безопасность движения поездов. Обычно на электрифицированных железных дорогах, особенно постоянного тока, за счет нагрева контактных проводов тяговым током обледенение менее вероятно, но в Китае, где высокоскоростные железные дороги электрифицированы переменным током и охватывают множество климатических зон, а также геологических условий, обледенение возможно, особенно когда на значительное время отсутствует движение поездов, а температура колеблется около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при высокой влажности воздуха [1]. Обледенение контактной сети (рис. 1) — это распространенное явление для электрифицированных железных дорог, часто возникающее в начале зимы и весны, представляющее собой угрозу на значительном протяжении контактной сети и одновременно может затрагивать несколько участков железных дорог, что характеризуется большой опасностью и сложностью в устранении последствий. Зимний период в Китае обусловлен холодными воздушными потоками, вызывающими значительное понижение температур и повышение осадков, что способствует обледенению проводов. Если происходит обледенение, оно может распространиться на большую территорию, сильно повлияв на железнодорожные перевозки, даже приводя к их остановке.



Рис. 1. Обледенение контактной сети на ж. д. линиях Китая (Гуйян) [2]

За последние 10 лет экстремальные погодные условия, такие как заморозки и ледяные дожди, действительно нанесли ущерб железнодорожным системам и инфраструктуре в нескольких странах, включая Россию, Китай, США, Японию и Южную Корею [3–6]. В табл. 1 показано влияние экстремальных погодных условий на железные дороги.

ТАБЛИЦА 1. Влияние экстремальных погодных условий на железные дороги

Дата	Страна	Погодные условия	Влияние на железные дороги
Январь 2017 г.	Япония (север Хонсю)	Сильные морозы и снегопады	Обледенение контактных сетей, задержки высокоскоростных поездов Синкансэн
Январь 2019 г.	США	Экстремально холодный воздух	Обледенение рельсов, обледенение проводов, перебои в транспортном сообщении между Чикаго и Нью-Йорком
Январь 2021 г.	Южная Корея	Снегопады и морозы	Обледенение контактных сетей, задержки поездов на ключевых маршрутах
Январь 2021 г.	Китай (Чэнду)	Обледенение контактной сети	Дефекты в работе контактной сети, дуговые разряды, задержки движения поездов
Февраль 2024 г.	Китай (Хубэй)	Ледяной дождь	Обледенение контактной сети, задержки движения поездов
Апрель 2024 г.	Россия	Обледенение контактной сети	Поезда на Финляндском направлении отменены, часть движется с задержками

Поддержание контактной сети свободной от льда является залогом ее безопасной и надежной эксплуатации, способствует снижению затрат на обслуживание как контактной сети, так и устройств токосъема и электрооборудования высокоскоростных поездов.

В настоящее время на электрифицированных железных дорогах для борьбы с обледенением контактной сети применяются следующие методы: механическое воздействие, применение антифризов и противогололедных реагентов, а также термическое плавление льда с помощью больших токов.

Во Франции механический метод борьбы с обледенением, заключающийся в установке специальных устройств на переднем конце пантографа, используется на железнодорожных линиях с рабочей скоростью менее 200 км/ч. Для высокоскоростных железных дорог со скоростью движения свыше 200 км/ч предпочтение отдается термическим системам плавления льда с использованием больших токов. В Германии антиобледенительные составы и противогололедные реагенты наносятся на проводники контактной сети, что эффективно применяется на городском железнодорожном транспорте. Однако на железных дорогах общего пользования чаще используются механические методы борьбы с обледенением [7]. В Японии проводятся экспериментальные исследования технологий термического плавления льда с применением электрического тока. Это обусловлено сложностью изготовления и обслуживания проводов контактной сети, а также рисками перегрева.

В частности, избыточное выделение тепла в проводах контактной подвески может привести к необратимым изменениям их прочностных характеристик.

На обычных линиях железных дорог Китая для борьбы с обледенением контактных проводов обычно используется ручное удаление льда или пантограф с контактным скользящим контактом, изготовленным на основе медно-графитовых материалов. Однако сегодня, с ростом скорости движения и количества высокоскоростных поездов, ручное удаление льда является неэффективным решением и главным способом борьбы с обледенением становится термическое плавление льда. Основным принципом плавления льда заключается в использовании активного сопротивления контактной сети для нагрева. Суть метода состоит в том, что ток определенной величины в течение заданного времени проходит через существующую первичную цепь тягового электроснабжения. Данный метод аналогичен принципу работы систем противообледенения проводов для линий электропередач систем энергоснабжения.

В настоящее время устройства для предотвращения обледенения и плавления льда, которые разрабатываются как в Китае, так и за рубежом, функционируют в автономном режиме, то есть их работа возможна только в отсутствие движения поездов [8]. Однако для современных высокоскоростных железных дорог с увеличивающейся плотностью движения и скоростями свыше 200 км/ч время работы таких устройств слишком короткое и его может быть недостаточно для эффективного удаления льда с контактной сети. Это требует разработки устройств для онлайн-систем противообледенения или плавления льда, работающих в режиме реального времени, которые могут использоваться на высокоскоростных железных дорогах, обеспечивая непрерывную защиту от льда. Дополнительными требованиями к таким системам выступают энергоэффективная работа самих устройств, автоматический контроль за вырабатываемой ими энергией и удаленное диагностирование состояния контактной сети.

Механизм образования гололеда

Механизм образования гололеда на контактной сети железных дорог связан с физическими и атмосферными процессами, происходящими при низких температурах и высокой влажности. Рассмотрим основные аспекты этого явления [9–11]:

1. Условия для образования гололеда

Гололед образуется при совокупности следующих факторов: температура воздуха обычно находится в диапазоне от 0 °С до –5 °С. В этом диапазоне переохлажденные капли воды замерзают при контакте с холодной поверхностью проводов. Высокая влажность увеличивает вероятность образования льда за счет конденсации влаги или осадения переохлажденных капель на проводах. Осадки в виде мокрого снега, переохлажденного дождя или изморози оседают на поверхности проводов и начинают замерзать, образуя ледяной слой. Скорость ветра усиливает

теплообмен между проводами и окружающей средой, снижая их температуру и ускоряя процесс замерзания.

2. Процессы формирования гололеда

Гололед образуется в результате следующих физических процессов.

Осаждение влаги происходит, когда переохлажденные капли воды сталкиваются с поверхностью провода и мгновенно замерзают, образуя ледяной слой. Конденсация водяного пара на холодной поверхности также инициирует процесс образования льда. Теплообмен заключается в том, что провод теряет тепло через теплопроводность, конвекцию и излучение. Если тепловой энергии оказывается недостаточно, поверхность провода охлаждается до температуры, благоприятной для замерзания влаги. Рост льда продолжается за счет налипания новых капель воды или снежных кристаллов, которые замерзают, увеличивая толщину ледяного слоя.

3. Влияние внешних факторов

Образование гололеда на контактной сети зависит от ряда внешних факторов.

Тип контактной сети влияет на вероятность обледенения. На линиях постоянного тока эта вероятность ниже из-за нагрева проводов током нагрузки. На линиях переменного тока обледенение происходит чаще. Материал провода играет значительную роль. Проводники с высокой теплопроводностью, такие как медные, меньше подвержены обледенению по сравнению со стальными. Конструкция контактной сети также влияет на вероятность обледенения. Провода, расположенные в открытой местности, больше подвержены образованию льда, чем те, которые защищены тоннелями или навесами.

4. Контактный тип обледенения

Обледенение можно классифицировать по плотности на дождевую наледь, изморозь, смешанную наледь и снег.

Дождевая наледь образуется, когда переохлажденная вода или вода при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже сталкивается с поверхностью объекта, формируя прозрачный и твердый слой льда. Плотность наледи составляет $0,6\text{--}0,9\text{ г/см}^3$. Эта наледь прочно прикрепляется к поверхности и трудно удаляется. В феврале 2024 года в китайской провинции Хубэй произошел сильный ледяной дождь (рис. 2), который привел к отказу систем токосъема электроподвижного состава высокоскоростных железных дорог и вызвал остановку или задержку движения ряда поездов.

Изморозь подразделяется на кристаллическую и зернистую. Кристаллическая изморозь формируется при конденсации пара и образует рыхлую структуру, которая легко разрушается под воздействием вибрации. Зернистая изморозь образуется, когда переохлажденный пар сталкивается с охлажденной поверхностью, создавая лед с плотностью $0,1\text{--}0,3\text{ г/см}^3$.

Смешанная наледь представляет собой результат попеременного замерзания дождевой наледи и изморози, отличается мягкой структурой и плотностью от $0,2$ до $0,6\text{ г/см}^3$ [13].



Рис. 2. Обледенение контактной сети [12]

Снег на равнинах отличается низкой плотностью и слабой адгезией. Однако в горных регионах снег, проходя через многократные процессы замерзания и таяния, может превратиться в смесь льда и воды, увеличивая свою плотность и массу.

Существующие методы борьбы с обледенением контактной сети

В настоящее время существует большое число методов борьбы с обледенением контактной сети, каждый из которых имеет свои особенности и ограничения. Далее подробно рассмотрены механические, химические и термодинамические методы, а также оценены их преимущества и недостатки.

1. Основные способы механического удаления льда

Ручная очистка льда

Описание: рабочие вручную удаляют лед с проводов с использованием специальных инструментов, таких как скребки, молотки или тросы (рис. 3, а).

Использование вибрационных пантографов

Описание: пантографы с вибрационным механизмом установлены на локомотивы или специальные обслуживающие машины. При контакте с проводами вибрация разрушает лед (рис. 3, б) [15].

Скребки и чистящие устройства

Описание: на провода устанавливаются скребки, которые разрушают и удаляют лед при их движении вдоль контактной сети (рис. 3, в) [16].

Использование очистительных поездов

Специальные поезда с оборудованием для удаления льда. На них могут быть установлены скребки, щетки или системы обдува (рис. 3, г) [17].

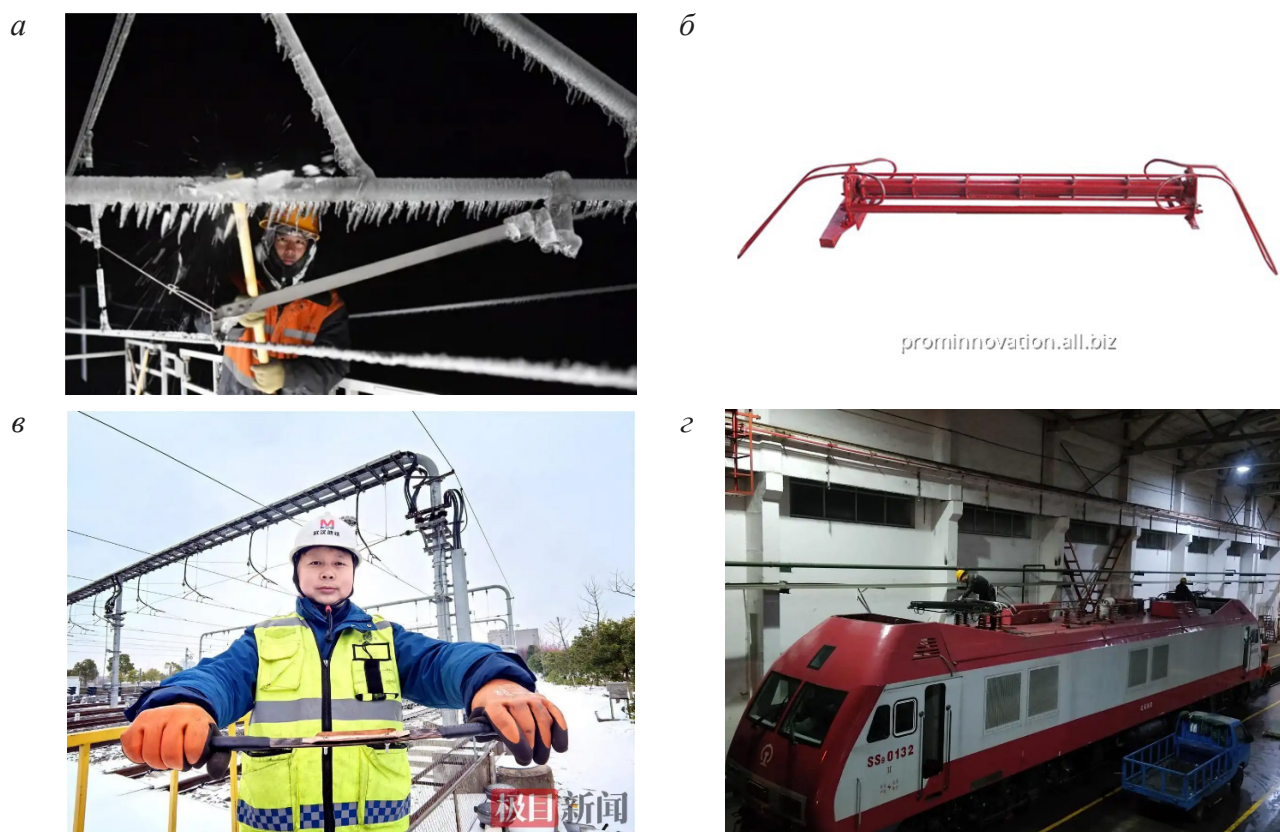


Рис. 3. Основные способы механического удаления льда:

- а* — ручная очистка проводов контактной сети от льда [14];
б — вибропантограф для механической очистки гололеда с контактного провода [15];
в — скребок для удаления льда [16]; *г* — очистительный поезд [17]

В табл. 2 показаны преимущества и недостатки механических методов борьбы с обледенением.

ТАБЛИЦА 2. Преимущества и недостатки механических методов борьбы с обледенением

Преимущества	Недостатки
Простота реализации. Большинство методов, таких как ручное удаление льда или использование скребковых устройств, не требуют сложного оборудования	Высокие трудозатраты. Ручное удаление льда требует значительных усилий и задействования рабочей силы, особенно на обширных участках
Оперативность. Механические методы позволяют быстро реагировать на уже образовавшееся обледенение	Риск повреждения. Использование скребковых устройств или вибрационных механизмов может повредить провода или другие элементы контактной сети
Универсальность. Эти методы применимы в различных климатических условиях и для разных типов контактной сети	Ограниченная эффективность. При толстом или плотном слое наледи механические методы становятся менее результативными
Возможность автоматизации. Современные роботизированные устройства и вибрационные механизмы делают процесс удаления льда более технологичным	Зависимость от погодных условий. Сильный ветер, снегопад или другие неблагоприятные факторы могут осложнять реализацию механических методов

Механические методы остаются важным инструментом борьбы с обледенением благодаря своей универсальности и оперативности. Однако их эффективность можно повысить за счет интеграции с другими подходами, такими как термические или химические методы. Это позволит минимизировать их недостатки и улучшить надежность работы контактной сети.

2. Химические методы

Химические методы борьбы с обледенением включают использование химических составов, которые предотвращают образование льда на контактной сети или способствуют его удалению. Основными средствами являются антифризы и противогололедные реагенты.

Антифризы представляют собой химические составы, предотвращающие образование льда на проводах контактной сети за счет снижения температуры замерзания воды. Основными типами антифризов являются водные растворы этиленгликоля, пропиленгликоля и солей (например, хлорида кальция). Их использование позволяет создавать защитный слой на поверхности проводов, который препятствует образованию льда. Однако такие вещества требуют регулярного нанесения и могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Применение антифризов целесообразно в качестве профилактической меры в условиях умеренного климата.

Противогололедные реагенты предназначены для удаления уже образовавшегося льда с контактной сети. Вещества, такие как хлориды натрия или кальция, нарушают структуру льда, облегчая его механическое удаление. Органические соединения (ацетаты, формиаты) используются для минимизации коррозионного воздействия на элементы инфраструктуры. Противогололедные реагенты эффективны при экстремально низких температурах, но их применение требует учета экологических и эксплуатационных факторов, особенно вблизи водоемов.

На ж. д. линиях России с 2019 г. применяется устройство для нанесения защитного покрытия на контактный провод («Колибри»), представленное на рис. 4 [18].

В Германии для борьбы с обледенением контактной сети на городских железнодорожных линиях используются противогололедные реагенты с добавлением ингибиторов коррозии. Эти составы обеспечивают эффективное удаление льда с проводов, предотвращая повреждение металлических элементов инфраструктуры. Ингибиторы коррозии минимизируют воздействие химических веществ на контактную сеть, что особенно важно для продления срока службы оборудования и поддержания надежности работы в условиях регулярного воздействия реагентов. Такой подход демонстрирует баланс между эффективностью удаления льда и сохранением эксплуатационных характеристик контактной сети.

Преимущество рассматриваемых химических методов борьбы с обледенением контактного провода заключается в предотвращении образования гололеда и отсутствии механических воздействий на контактный провод. Основными



Рис. 4. Устройство «Колибри» наносит антигололедное покрытие [18]

недостатками являются: экологическое воздействие на прилегающие к железной дороге территории, относительно высокие трудозатраты на обработку, высокая стоимость химических реагентов и необходимость наличия «окон» в графике движения поездов.

3. Тепловые методы

Тепловые методы основаны на нагреве контактной сети с целью предотвращения образования льда или удаления уже существующего обледенения. Основным принципом является повышение температуры проводов выше точки замерзания воды, что достигается различными способами.

Пропускание сильного электрического тока через провода является одним из наиболее эффективных методов. Этот способ позволяет быстро нагревать контактную сеть и удалять лед. Однако он сопровождается высокими энергозатратами и риском перегрева проводов, что требует тщательного контроля.

Плавка гололеда с использованием силового электрического тока (рис. 5): нагрев проводов достигается за счет искусственного повышения силы тока, что позволяет достичь температуры, достаточной для расплавления льда с нормативной толщиной стенки. Этот метод особенно эффективен при условии отключения потребителей от сети и замыкания проводов накоротко.

Посекционный подогрев контактных проводов: применяется метод нагрева небольших участков проводов до температуры около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы предотвратить образование наледи. Реализация метода включает использование мобильной установки, которая движется вдоль контактной сети, подключается к проводам через управляемый пантограф и пропускает электрический ток.

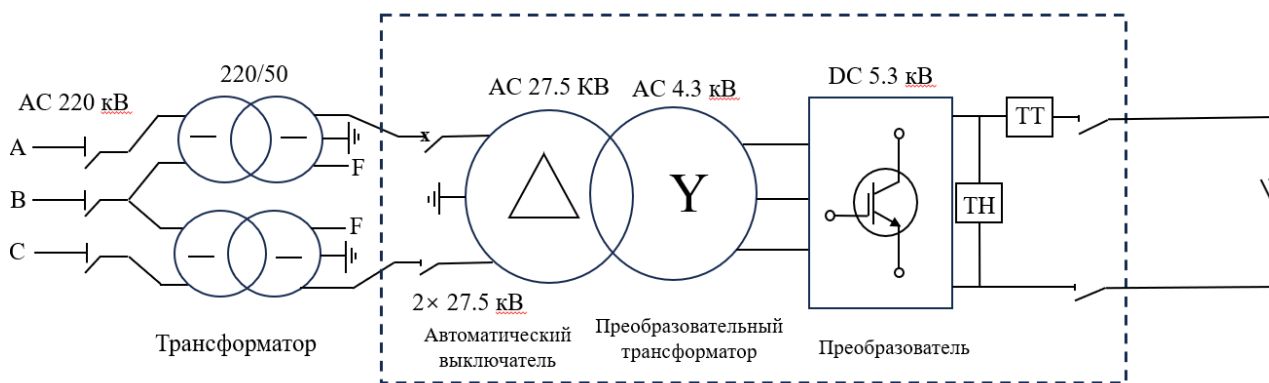


Рис. 5. Принципиальная схема технологии плавки гололеда постоянным током

Преимущества: быстрое удаление льда; возможность интеграции в существующую инфраструктуру контактной сети; универсальность применения на различных типах линий.

Недостатки: высокие энергозатраты; необходимость временного отключения потребителей; риск перегрева проводов и их повреждения.

Таким образом, каждый из методов имеет свои сильные и слабые стороны. Выбор конкретного подхода должен основываться на условиях эксплуатации, требуемом уровне эффективности и возможностях для технического обслуживания.

Интегрированная система плавки льда с использованием статического генератора реактивной мощности

Дальнейшее совершенствование методов борьбы с гололедом и обледенением контактной сети в условиях экстремальных климатических изменений требует применения высокоэффективных и энергоэффективных технологий.

Одним из современных подходов к решению данной проблемы является использование разрабатываемого в Китае метода на базе применения статического генератора реактивной мощности (SVG), который основан на способности SVG генерировать и регулировать реактивную мощность для поддержания температуры проводов выше точки замерзания воды. Интеграция SVG с устройствами переключения емкости (TSC) и реакторов (TSR) позволяет создать интеллектуальную систему, адаптирующуюся к изменениям погодных условий в режиме реального времени [19].

Статический генератор реактивной мощности (рис. 6) представляет собой устройство, способное управлять потоком реактивной мощности в реальном времени. Его применение в системах борьбы с обледенением контактной сети связано с высокой скоростью реакции, энергоэффективностью и возможностью точного контроля параметров нагрева (рис. 7).

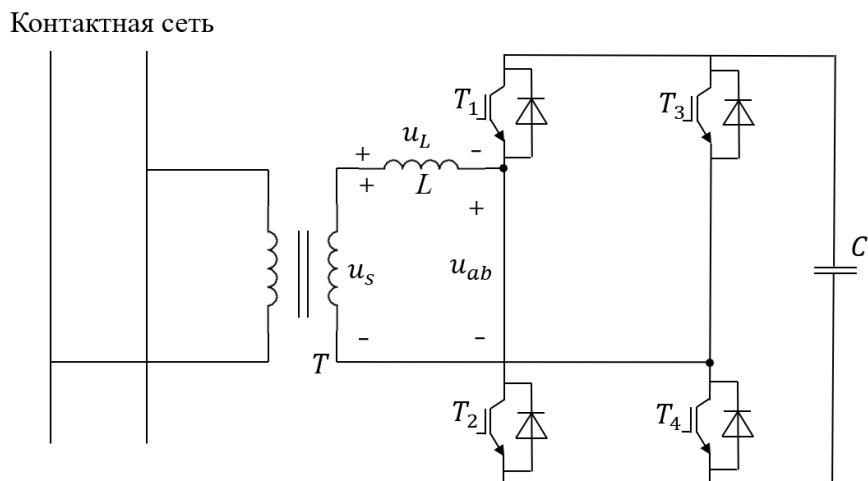


Рис. 6. Схемы статического генератора реактивной мощности SVG

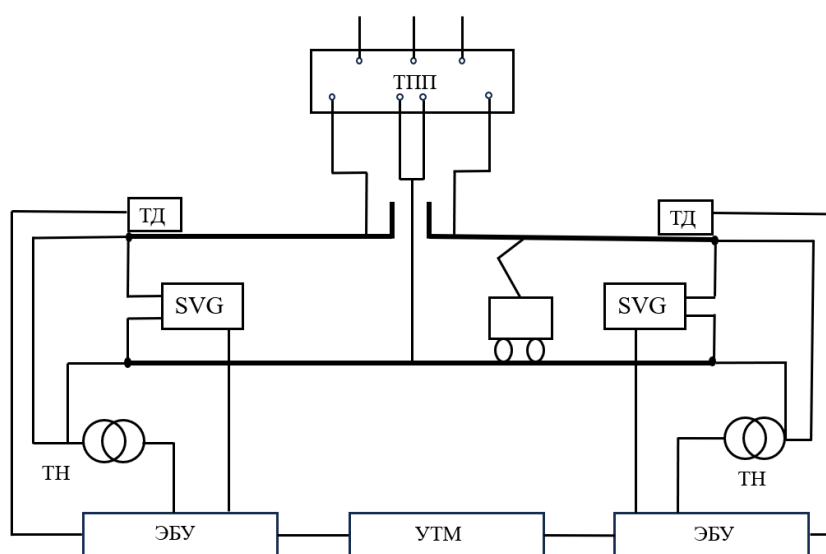


Рис. 7. Схема включения SVG генератора в тяговую сеть:

ТП — тяговая подстанция; ТН — трансформатор напряжения; ТД — термодатчик; ЭБУ — электронный блок управления; УТМ — устройство телемеханики; SVG — статический генератор реактивной мощности

Принцип работы SVG заключается в следующем. Во-первых, он генерирует реактивную мощность, которая может быть как емкостной, так и индуктивной, в зависимости от требуемой компенсации для обеспечения качества электрической энергии в электротяговой сети. Во-вторых, SVG активно регулирует напряжение в электрической сети, уменьшая колебания. Это достигается посредством компенсации изменений реактивной мощности. В-третьих, включение и выключение конденсаторных или индуктивных элементов в SVG позволяет эффективно компенсировать реактивную мощность в соответствии с текущими потребностями сети. Наконец, SVG минимизирует гармонические искажения и фильтрует их, улучшая качество электроэнергии в сети.

Основные этапы борьбы с обледенением с использованием SVG

1. Генерация реактивной мощности

SVG подключается к контактной сети и генерирует реактивную мощность, которая используется для нагрева проводов. Реактивный ток создает тепловой эффект, что приводит к увеличению температуры проводов. Это позволяет предотвратить образование льда или удалить уже существующую наледь.

2. Адаптивное управление мощностью

SVG способен быстро регулировать уровень требуемой реактивной мощности в зависимости от текущих погодных условий, таких как температура, влажность и скорость ветра. Благодаря этому подходу обеспечивается минимизация энергозатрат и предотвращение избыточного нагрева проводов, что повышает общую эффективность системы.

3. Система трехуровневого управления

Технология управления SVG основана на трех уровнях:

1) координационный уровень: на основе данных о состоянии сети и погодных условиях определяет необходимый объем мощности и распределяет нагрузку между SVG, переключателями емкости (TSC) и реакторами (TSR);

2) управляющий уровень: контролирует работу вспомогательных устройств, обеспечивая стабильность системы и корректную подачу мощности;

3) исполнительный уровень: регулирует электрические параметры (сила тока, напряжение) непосредственно в контактной сети, обеспечивая точный нагрев проводов;

4) мониторинг и диагностика.

SVG оснащен системой датчиков, которые в реальном времени отслеживают ключевые параметры контактной сети, такие как наличие льда и температура проводов. Эти данные поступают в управляющую систему, которая оперативно корректирует режимы нагрева в зависимости от текущих условий. Это позволяет повысить надежность работы и избежать ненужных энергозатрат.

Особенности технологии SVG [20]:

1. Высокая точность управления: SVG позволяет регулировать параметры нагрева с минимальными отклонениями, предотвращая перегрев проводов.

2. Интеграция с интеллектуальными системами: устройства могут работать совместно с метеорологическими системами, автоматически включая нагрев при неблагоприятных условиях.

3. Энергоэффективность: в плавке гололеда участвуют только нужные участки сети, что снижает общий уровень потребляемой энергии.

4. Скорость реакции: SVG способен мгновенно включать или выключать подачу мощности, что важно при внезапных изменениях погодных условий.

Однако существует несколько нерешенных проблем, мешающих внедрению такого метода на всей сети высокоскоростных ж. д. Китая. Среди основных проблем можно выделить следующие.

Высокая стоимость оборудования и его внедрения. Интеграция SVG требует значительных капитальных вложений, включая закупку самого оборудования, его установку и наладку. В условиях протяженной сети железных дорог Китая эти расходы становятся особенно ощутимыми, что затрудняет повсеместное внедрение технологии.

Сложность интеграции с существующей инфраструктурой: китайская железнодорожная сеть включает участки с различными технологиями реализации системы тягового энергоснабжения, и далеко не все из них готовы к внедрению SVG без серьезной модернизации. Например, неоднородные по сечению участки контактной сети не обеспечат эффективную работу SVG для плавки гололеда, что потребует дополнительных вложений в ее модернизацию.

Влияние на электрическую сеть: сеть высокоскоростных железных дорог предъявляет чрезвычайно высокие требования к надежности системы электроснабжения, использование SVG приводит к изменению характеристик СТЭ (системы тягового электроснабжения), что может негативно сказаться на других элементах системы электроснабжения. В частности, неравномерное распределение реактивной мощности может вызвать дополнительные потери энергии и снизить стабильность работы железнодорожной энергосистемы в целом.

Проблемы совместимости с другими системами борьбы с обледенением: на китайских железных дорогах уже применяются различные технологии борьбы с наледью, включая контактные и бесконтактные методы нагрева, химические реагенты и механические очистители. Внедрение SVG требует тщательной координации с этими системами, чтобы избежать дублирования функций и неоправданного роста затрат.

Недостаточная точность мониторинга и прогнозирования обледенения: высокоскоростные железнодорожные линии имеют большую протяженность и сложные природные условия, из-за чего существующие технологии мониторинга имеют невысокую точность прогнозирования местоположения и степени обледенения элементов контактной подвески.

Заключение

В статье рассмотрены современные технологии борьбы с обледенением контактной сети железных дорог, включая механические, химические и термические методы. Особое внимание уделено использованию статических генераторов реактивной мощности (SVG), которые обеспечивают адаптивное управление нагревом проводов, снижая энергозатраты и повышая стабильность работы сети.

Рассмотрены ключевые этапы функционирования системы на базе SVG, включая генерацию мощности, многоуровневое управление (координационный, управляющий и исполнительный уровни) и интеллектуальный мониторинг в реальном времени. Эта система не только предотвращает образование наледи, но и эффективно удаляет уже существующий лед, реагируя на изменения погодных условий.

Использование SVG уже зарекомендовало себя как перспективное направление, однако для его широкомасштабного внедрения требуется поэтапная реализация в наиболее проблемных регионах, что позволит оптимизировать затраты и избежать перегрузки энергосистемы.

Для дальнейшего повышения эффективности SVG для цели борьбы с гололедом на проводах контактной сети предлагается:

1. Оптимизировать распределение реактивной мощности с учетом реального состояния сети и нагрузки, что позволит минимизировать потери энергии.

2. Разработать гибридные системы, сочетающие SVG с контактными и бесконтактными методами нагрева, механическими очистителями и химическими реагентами. Такой подход позволит адаптировать систему под конкретные условия эксплуатации.

3. Использовать инновационные методы защиты контактной сети от обледенения, включая интеллектуальные системы прогнозирования, которые анализируют данные метеостанций и датчиков контактной сети, предсказывая зоны возможного обледенения.

4. Усовершенствовать сенсорные технологии, включая инфракрасные и лазерные датчики, позволяющие точно определять толщину наледи и активировать систему только при необходимости, снижая энергопотребление.

Для успешного внедрения технологии плавки гололеда с применением SVG требуется комплексное развитие систем мониторинга, адаптивного управления и оптимизации энергопотребления. Интеграция с интеллектуальными системами управления и алгоритмами прогнозирования позволит минимизировать затраты, повысить надежность железнодорожной инфраструктуры и обеспечить бесперебойное и безопасное движение поездов даже в сложных климатических условиях.

Использование SVG для борьбы с образованием гололеда в сочетании с переключателями емкости (TSC) и реакторами (TSR) позволит гибко адаптироваться к изменениям погодных условий и создать по-настоящему интеллектуальную систему борьбы с обледенением. Внедрение таких решений — это шаг к устойчивой и энергоэффективной железнодорожной инфраструктуре будущего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ван Г. Анализ и исследование проблем таяния льда и защиты от льда на контактной сети / Г. Ван // Журнал железнодорожного инжиниринга. — 2009. — № 1(8). — С. 93–95.
2. Baidu: новостной портал. — Гуйян, 2022. — URL: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1753438624293745000&wfr=spider&for=pc> (дата обращения: 20.01.2025).
3. Синьхуа: информационное агентство. — Пекин, 2017. — URL: http://www.xinhuanet.com/world/2017-01/12/c_129443503.htm (дата обращения: 23.09.2024).
4. CCTV: новостной портал. — Пекин, 2019. — URL: <https://news.cctv.com/2019/02/01/ARTIMchFFg3b0V7KO3cGxDk5190201.shtml/> (дата обращения: 24.09.2024).
5. CCTV: новостной портал. — Пекин, 2024. — URL: <https://news.cctv.com/2024/02/03/ARTIbzmEE2PcxKKpnp5073IC240203.shtml> (дата обращения: 24.09.2024).
6. СПб Дневник: новостной портал. — СПб., 2024. — URL: <https://spbnevnik.ru/news/2024-04-03/izza-obledeneniya-kontaktnoy-seti-na-finlyandskom-napravlenii-otmeneny-poezda> (дата обращения: 25.09.2024).
7. Грабош Т. Доклад о противообледенении контактного провода / Т. Грабош. — URL: https://igralub.com/wp-content/uploads/2022/03/741_hp-Fahrdrahtenteisung.pdf (дата обращения: 21.01.2025).
8. Богданова К. В. Методика и технические решения управляемого профилактического подогрева проводов контактной сети постоянного тока: дисс. ... канд. техн. наук. — Самара, 2024. — 162 с.
9. Трубицин М. А. Анализ способов обнаружения гололеда на проводах ЛЭП и их применение для контактной сети / М. А. Трубицин, О. Г. Лукашевич // ИВД. — 2016. — № 4(43). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sposobov-obnaruzheniya-gololeda-na-provodah-lep-i-ih-primenenie-dlya-kontaktnoy-seti> (дата обращения: 12.01.2025).
10. Savadjiev K. Modeling of icing and de-icing on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data / K. Savadjiev, M. Farzaneh // IEEE Transactions on power delivery. — 2004. — Vol. 19. — Iss. 2. — Pp. 715–721.
11. Чэнь Ч. Исследование методов онлайн-защиты контактной сети электрифицированных железных дорог от обледенения / Ч. Чэнь. — Сычуань: Сианьский транспортный университет, 2015.
12. The Paper: новостной портал. — Хубэй, 2024. — URL: https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_26296554 (дата обращения: 20.01.2025).
13. Hallett J. Experimental studies of the crystallization of supercooled water / J. Hallett // Journal of the Atmospheric Sciences. — 1964. — Vol. 21. — Iss. 6. — Pp. 671–682.
14. Sohu: новостной портал. — Пекин, 2024. — URL: https://www.sohu.com/a/756936412_120582872 (дата обращения: 20.01.2025).
15. Пневмобарабан для механической очистки гололеда с контактного провода // BizOrg. ua. — URL: <https://ua.bizorg.su/ustroystva-gololedoochistitelnye-r/p16132835-pnevmobaraban-dlya-mekhanicheskoy-ochistki-gololeda-s-kontaktного-provoda> (дата обращения: 01.02.2025).

16. Baidu: новостной портал. — Ухань, 2024. — URL: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791598187668354526&wfr=spider&for=pc> (дата обращения: 25.01.2025).
17. Baidu: новостной портал. — Ухань, 2024. — URL: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791516491744205247&wfr=spider&for=pc> (дата обращения: 28.01.2025).
18. RZD Center: информационный портал. — М., 2025. — URL: <https://rzd.center/colibri-u> (дата обращения: 31.01.2025).
19. Цзэн Л. Исследование гибридной модели компенсации неуравновешенной трехфазной нагрузки в распределительной сети низкого напряжения на основе SVC+SVG / Л. Цзэн. — Цзянси: Наньчанский университет, 2019.
20. Син Ц. Исследования по оптимизации технологии защиты от обледенения контактной сети электрифицированных железных дорог / Ц. Син. — Сычуань: Сианьский транспортный университет, 2021.

Дата поступления: 09.01.2025

Решение о публикации: 27.02.2025

Контактная информация:

ЛИ Ююань — аспирант; 1005458004@qq.com

ВИКУЛОВ Илья Павлович — канд. техн. наук, доц.; i_vikulov@mail.ru

Development of an Anti-Ice/Ice-Melting Technology for Railway Catenary Systems

Li Yiyuan, I. P. Vikulov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Li Yiyuan, Vikulov I. P. Development of an Anti-Ice/Ice-Melting Technology for Railway Catenary Systems. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 183–200. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-183-200

Summary

Purpose: To analyze modern technologies for combating icing of railway overhead contact network focusing on the development and application of ice melting methods with a special emphasis on China's practices. To identify key achievements of leading countries in this field, trace the evolution of technologies, conduct a comparative analysis of the practices applied in Russia, China and other countries, and identify their advantages and disadvantages. **Methods:** The study is based on the analysis of current scientific publications and an integrated approach to the study of technologies for combating icing of the railway contact network. The study of intelligent control systems, in particular the use of static reactive power generators (SVG) in combination with compensating devices that allow adapting the system parameters to weather changes in real time. A comparative analysis of widely used methods of combating icing in different countries in order to identify their advantages and disadvantages, as well as to assess the prospects for further development

of technologies. **Results:** Key methods of de-icing of the contact network such as phase heating, the use of static reactive power generators (SVG) and the integration of intelligent control systems are found to contribute to improved system reliability and energy efficiency. The study has shown that the introduction of modern innovative solutions allows optimizing the de-icing process, reducing operating costs and adapting technologies to difficult climatic conditions. **Practical significance:** This article serves as a basis for understanding the existing de-icing systems for railway contact networks. The focus is on analyzing the practices of leading countries in this field, which can be used as a reference for the development of de-icing technologies worldwide. The innovative approaches described in the paper can be integrated into existing systems to increase their reliability, reduce operating costs and improve environmental sustainability. On the basis of the presented data and graphical materials, the real prospects for the implementation of modern solutions for the protection of railway contact networks have been assessed.

Keywords: Railway, catenary, contact wire, icing, methods of combating icing.

References

1. Van G. Analiz i issledovanie problem tayaniya l'da i zashchity ot l'da na kontaktnoy seti [Analysis and research on ice melting and ice protection problems on the contact network]. *Zhurnal zheleznodorozhnogo inzhiniringa* [Journal of Railway Engineering]. 2009, Iss. 1(8), pp. 93–95. (In Russian)
2. *Baidu: novostnoy portal* [Baidu: news portal]. Guyyan, 2022. Available at: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1753438624293745000&wfr=spider&for=pc> (accessed: January 20, 2025).
3. *Sin'khua: informatsionnoe agentstvo* [Xinhua: news agency]. Pekin, 2017. Available at: http://www.xinhuanet.com/world/2017-01/12/c_129443503.htm (accessed: September 23, 2024).
4. *CCTV: novostnoy portal* [CCTV: news portal]. Pekin, 2019. Available at: <https://news.cctv.com/2019/02/01/ARTIMchFFg3b0B7KO3cGxDk5190201.shtml/> (accessed: September 24, 2024).
5. *CCTV: novostnoy portal* [CCTV: news portal]. Pekin, 2024. Available at: <https://news.cctv.com/2024/02/03/ARTIbzmEE2PcxKKpnp5073IC240203.shtml> (accessed: September 24, 2024).
6. *SPB Dnevnik: novostnoy portal* [SPB Dnevnik: news portal]. St. Petersburg, 2024. Available at: <https://spbdnevnik.ru/news/2024-04-03/izza-obledeneniya-kontaktnoy-seti-na-finlyandskom-napravlenii-otmeneny-poezda> (accessed: September 25, 2024).
7. Grabosh T. *Doklad o protivooledenanii kontaktного provoda* [Report on anti-icing of contact wire]. Available at: https://igralub.com/wp-content/uploads/2022/03/741_hp-Fahrdrahtenteisung.pdf (accessed: January 21, 2025).
8. Bogdanova K. V. *Metodika i tekhnicheskie resheniya upravlyаемого profilakticheskogo podogreva provodov kontaktnoy seti postoyannogo toka: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Methodology and technical solutions for controlled preventive heating of DC contact network wires: diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. Samara, 2024, 162 p. (In Russian)
9. Trubitsin M. A., Lukashevich O. G. *Analiz sposobov obnaruzheniya gololeda na provodakh LEP i ikh primeneniye dlya kontaktnoy seti* [Analysis of methods for detecting ice on power transmission line wires and their application for the contact network]. IVD, 2016, Iss. 4(43). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sposobov-obnaruzheniya-gololeda-na-provodah-lep-i-ih-primeneniye-dlya-kontaktnoy-seti> (accessed: January 12, 2025). (In Russian)

10. Savadjiev K., Farzaneh M. Modeling of icing and de-icing on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data. *IEEE Transactions on power delivery*, 2004, vol. 19, Iss. 2, pp. 715–721.
11. Chen' Ch. *Issledovanie metodov onlayn-zashchity kontaktной seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog ot obledeneniya* [Research on Online Anti-Icing Methods for the Catenary of Electrified Railways]. Sychuan': Sian'skiy transportnyy universitet Publ., 2015.
12. *The Paper: novostnoy portal* [The Paper: news portal]. Khubey, 2024. Available at: https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_26296554 (accessed: January 20, 2025).
13. Hallett J. Experimental studies of the crystallization of supercooled water. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1964, vol. 21, Iss. 6, pp. 671–682.
14. *Sohu: novostnoy portal* [Sohu: news portal]. Pekin, 2024. Available at: https://www.sohu.com/a/756936412_120582872 (accessed: January 20, 2025).
15. Pnevmoabaraban dlya mekhanicheskoy ochistki gololeda s kontaktного provoda. BizOrg.ua. Available at: <https://ua.bizorg.su/ustroystva-gololedoochistitelnye-r/p16132835-pnevmoabaraban-dlya-mekhanicheskoy-ochistki-gololeda-s-kontaktного-provoda> (accessed: February 01, 2025).
16. *Baidu: novostnoy portal* [Baidu: news portal]. Ukhan', 2024. Available at: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791598187668354526&wfr=spider&for=pc> (accessed: January 25, 2025).
17. *Baidu: novostnoy portal* [Baidu: news portal]. Ukhan', 2024. Available at: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791516491744205247&wfr=spider&for=pc> (accessed: January 28, 2025).
18. *RZD Center: informatsionnyy portal* [RZD Center: information portal]. Moscow, 2025. Available at: <https://rzd.center/colibri-u> (accessed: January 31, 2025). (In Russian)
19. Tszen L. *Issledovanie gibridnoy modeli kompensatsii neuravnoveshennoy trekhfaznoy nagruzki v raspredelitel'noy seti nizkogo napryazheniya na osnove SVC+SVG* [Research on Hybrid Compensation Model for Unbalanced Three-Phase Load in Low-Voltage Distribution Network Based on SVC+SVG]. Tszyansi: Nan'chanskiy universitet Publ., 2019.
20. Sin Ts. *Issledovaniya po optimizatsii tekhnologii zashchity ot obledeneniya kontaktной seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Research on Optimization of Anti-icing Technology for Overhead Contact Network of Electrified Railways]. Sychuan': Sian'skiy transportnyy universitet Publ., 2021.

Received: January 09, 2025

Accepted: February 27, 2025

Author's information:

Yiyuan LI — Postgraduate Student; 1005458004@qq.com

Ilya P. VIKULOV — PhD in Engineering, Associate Professor; i_vikulov@mail.ru

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 621.316.9

Технико-экономический анализ интеграции солнечных электростанций в энергосистему Тартуса (САР)

М. В. Шевлюгин, М. Р. Ради

Российский университет транспорта (РУТ), Российская Федерация, 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Шевлюгин М. В., Ради М. Р. Технико-экономический анализ интеграции солнечных электростанций в энергосистему Тартуса (САР) // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 201–210. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-201-210

Аннотация

Цель: Провести технико-экономический анализ интеграции солнечных электростанций в энергосистему города Тартуса для повышения ее устойчивости и эффективности. В условиях дефицита энергоресурсов и нестабильности энергоснабжения, вызванных военными действиями и разрушением энергетической инфраструктуры, внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности солнечной энергии, рассматривается как перспективное решение. **Методы:** Анализ данных о состоянии энергосистемы города, моделирование интеграции солнечной генерации в существующую сеть, а также расчеты экономической эффективности внедрения солнечных электростанций. Для оценки были использованы технические параметры солнечных панелей и экономические показатели затрат на установку и эксплуатацию. **Результаты:** Интеграция солнечных электростанций может значительно повысить надежность энергоснабжения в Тартусе, снизить затраты на топливо и снижение выбросов углекислого газа. Предлагаемые меры позволяют региону уменьшить зависимость от централизованных источников электроэнергии и повысить устойчивость энергетической системы. **Практическая значимость:** Конечные результаты данного исследования могут служить основой для разработки и внедрения программы модернизации энергетической инфраструктуры в Тартусе, а также в других городах Сирии. Особое внимание уделяется интеграции солнечных электростанций в систему распределенной генерации энергии. Такой подход не только эффективно адресует существующий энергетический кризис в регионе, но и способствует долгосрочному устойчивому развитию энергетического сектора. Внедрение солнечных технологий позволяет снизить зависимость от традиционных источников энергии, уменьшить выбросы парниковых газов и обеспечить более стабильное и надежное энергоснабжение для населения и промышленности. Кроме того, распределенная генерация способствует созданию местных рабочих мест, стимулирует экономический рост и повышает энергетическую безопасность регионов, способствуя тем самым общему благополучию и развитию общества.

Ключевые слова: Солнечная энергия, распределенная генерация, технико-экономический анализ, энергосистема Тартуса, возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Введение

В условиях кризиса энергоснабжения в Сирии солнечная энергетика становится важным направлением для стабилизации энергосистемы. В Тартусе, где солнечный потенциал достигает $1650 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год, проектируется солнечная фотоэлектрическая станция (СФЭС) мощностью 56 МВт (рис. 1). Проведенное моделирование в PVsyst показывает, что, несмотря на высокую выработку, данной мощности недостаточно для полного обеспечения города, особенно зимой. Целью работы является оценка потенциала солнечной энергетики для Тартуса и определение мер для улучшения ее эффективности в энергоснабжении города.

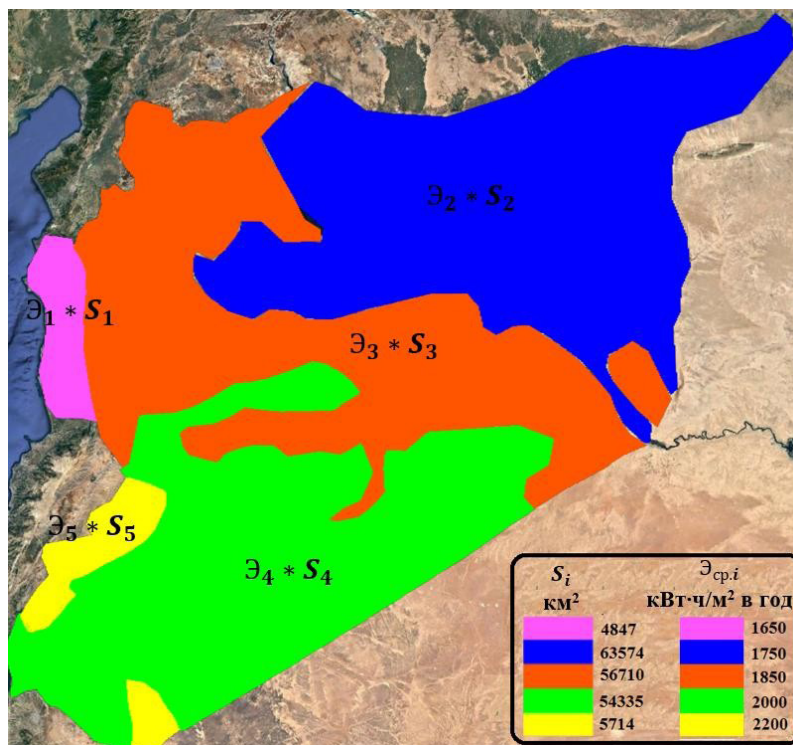


Рис. 1. Среднегодовое поступление солнечной энергии на горизонтальную поверхность в пределах сирийской территории, выраженное в $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$

Солнечная энергия в Сирии

На основании данных, представленных в солнечном атласе Сирии, изданном Центром научных исследований и разработок (SSRC) в 1994 году, можно сделать вывод о значительном потенциале использования солнечной энергии на территории Сирии. Согласно этим данным, среднее дневное поступление солнечной радиации на горизонтальную поверхность в Сирии составляет приблизительно 5 киловатт-часов на квадратный метр ($\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$). Если рассматривать этот показатель в годовом исчислении, он эквивалентен примерно $1800 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, что свидетельствует о высокой эффективности солнечного излучения в регионе.

Годовое количество солнечных часов в Сирии колеблется в диапазоне от 2820 до 3270 часов. Эти значения демонстрируют стабильность и обилие солнечного света, что является благоприятным фактором для развития солнечной энергетики. Однако распределение солнечной энергии по территории страны неравномерно и зависит от географических и климатических условий различных регионов.

В частности, средняя мощность солнечной энергии варьируется в зависимости от местоположения. В горных западных регионах Сирии среднесуточная мощность солнечной энергии составляет около $4,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$. Эти районы характеризуются более низкой средней температурой и возможными облачными покровами, что может несколько снижать эффективность солнечных панелей. В то же время в пустынных районах Бадии среднесуточная мощность солнечной энергии достигает примерно $5,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$. Такие условия, как высокая инсоляция и отсутствие значительных облачных покровов, способствуют более эффективному использованию солнечной энергии для различных целей, включая производство электроэнергии и обогрев.

Особое внимание следует уделить городу Тартусу, расположенному в Сирии, где зафиксирован особенно высокий средний потенциал солнечной энергии. В Тартусе среднегодовое поступление солнечной радиации достигает $1650 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, что является одним из наивысших показателей в стране. Кроме того, средний солнечный поток на горизонтальную поверхность в этом городе составляет приблизительно $4,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$. Эти показатели подчеркивают значительный потенциал региона для внедрения солнечных технологий и развития солнечной энергетики, что может способствовать экономическому росту и устойчивому развитию региона [1, 2].

Таким образом, анализ данных из солнечного атласа Сирии демонстрирует высокий потенциал солнечной энергии на территории страны, особенно в таких регионах, как пустынные области Бадии и город Тартус. Эти условия создают благоприятные предпосылки для развития солнечной энергетики, что может способствовать повышению энергетической независимости и устойчивому развитию Сирии в будущем. [3].

Выбираем солнечную панель типа SilaSolar 580Вт TOPCon 16BB (Bifacial) и фотоэлектрические инверторы 1500 кВт от русского производителя АО «Связь инжиниринг» [4].

Количество трехфазных инверторов $N_{\text{инв}}$ [5]:

$$N_{\text{инверторов}} = \frac{P_{\text{расчетная}}}{P_{\text{инвертора}}},$$

где $P_{\text{инв}}$ — номинальная мощность инвертора.

Максимальное количество модулей в одном ряду, обозначаемое как n_{max} , рассчитывается по следующей формуле:

$$n_{\max} = \frac{U_{\text{и max}}}{U_{\text{ФЭМ max}}},$$

где $U_{\text{и max}}$ — максимально допустимое входное напряжение постоянного тока для инвертора (В);

$U_{\text{ФЭМ max}}$ — максимальное напряжение фотогальванического модуля, соответствующее напряжению холостого хода при самой низкой рабочей температуре поверхности модуля (В).

Ток, проходящий через фотоэлектрический блок (ФЭБ), должен оставаться ниже максимального входного тока инвертора [5]. Количество допустимых параллельных рядов в ФЭБ, обозначаемое как $n_{\text{ряд}}$, определяется исходя из этого предельного тока и рассчитывается следующим образом:

$$n_{\text{ряд}} \leq \frac{I_{\text{и max}}}{I_{\text{ряд max}}} [\text{ряда}],$$

где $I_{\text{и max}}$ — максимальный входной ток инвертора (А);

$I_{\text{ряд max}}$ — наибольший допустимый ток в одном ряду (А).

Как правило, этот параметр соответствует току короткого замыкания модуля в условиях STC [5].

Солнечная фотоэлектрическая станция мощностью 47 МВт, расположенная в провинции Тартус, характеризуется следующими основными параметрами. В системе установлено 115 520 солнечных модулей, которые объединены последовательно по 20 штук в каждой цепи. Общее количество таких цепей составляет 152. Площадь, занятая фотоэлектрическими панелями, достигает 265 955 м², что соответствует 0,26 км².

Технико-экономический расчет

Рассматриваемая солнечная фотоэлектрическая станция (СФЭС) генерирует электроэнергию в объеме 99 804 МВт · ч/год.

Рассматриваемая СФЭС вырабатывает электроэнергию 99 804 МВт · ч/год.

Анализ экономической целесообразности проекта

При определении эффективности данного проекта учитываются ставка дисконтирования и эксплуатационный срок оборудования. В данном случае принято, что ставка дисконтирования составляет $r = 9\%$, а предполагаемый период эксплуатации фотоэлектрической установки равен $T = 30$ лет.

Капитальные затраты I_0 : объем инвестиций в рассматриваемую солнечную фотоэлектрическую систему определяется исходя из актуальных рыночных цен

2023 года [6], которые составляют 758 \$/кВт (эквивалент 68 220 руб/кВт). Учитывая установленную мощность 57,76 МВт, величина капитальных инвестиций (I_0) для данной СФЭС определяется следующим образом:

$$I_0 = 57\,760 \cdot 68\,220 = 3\,940\,387\,200 \text{ руб.} = 3940 \text{ млрд руб.}$$

В соответствии с отчетом IRENA (2023) [6] капитальные затраты на солнечные электростанции включают:

1. Стоимость солнечных модулей — основной компонент, который в последние годы значительно снизился в цене.
2. Баланс системы (BoS, Balance of System) — включает:
 - инверторы (преобразуют постоянный ток от панелей в переменный);
 - монтажные конструкции и крепежные системы;
 - кабельную инфраструктуру и электропроводку;
 - трансформаторы и системы подключения к сети.
3. Инженерно-строительные работы (EPC — Engineering, Procurement, Construction) — затраты на проектирование, поставку оборудования и строительство.
4. Разрешительная и административная деятельность — расходы на получение лицензий, сертификацию, проектную документацию.
5. Финансовые и страховые затраты — проценты по кредитам, страхование проекта.

Затраты на оплату труда в Сирии значительно ниже, чем в США и странах Европы, что позволяет снизить расходы на эксплуатацию и обслуживание на 25–50 %. В итоге эти затраты составляют 13,5 \$/кВт, что эквивалентно 1282,5 руб/кВт [7].

Исходя из этого, ежегодные расходы (C_t) выбранной СФЭС равны:

$$C_t = 1282,5 \cdot 57760 = 74\,077\,200 \text{ руб/год} = 74 \text{ млн руб/год.}$$

Чистый доход (R_t) включает доходы от уменьшения выбросов парниковых газов и выручку от реализации электроэнергии, генерируемой данной солнечной фотоэлектрической установкой (СФЭС). Согласно нормативному акту Министерства энергетики Сирийской Арабской Республики № 1763, инвесторы имеют право реализовывать произведенную электрическую энергию государственной компании PEDEEE по установленному тарифу 0,106 €/кВт · ч, что эквивалентно 0,119 \$/кВт · ч при валютном курсе 1 € = 1,12 \$ [7, 8]. На основании данного тарифа прогнозируемая солнечная фотоэлектрическая станция (СФЭС) с годовой генерацией 99 804 МВт · ч обеспечит суммарную годовую выручку в размере 1 128,28 млн руб.

Дополнительно, учитывая стоимость выбросов углекислого газа в 20 €/т CO₂ (или 22,4 \$/т CO₂ при пересчете по курсу 1 € = 1,12 \$) [9], расчетный доход от уменьшения эмиссии парниковых газов для предложенной СФЭС составит:

$$55\,119,78 \frac{\text{тСО}_2}{\text{год}} \cdot 22,4 \cdot 95 \frac{\text{руб.}}{\text{тСО}_2} =$$

$$= 117\,294\,891,84 \text{ руб / год} = 117,29 \text{ млн руб / год.}$$

Соответственно, совокупные годовые доходы (R_t) проектируемой для строительства в Сирии СФЭС составят:

$$R_t = 1128,28 + 117,29 = 1245,57 \text{ млн руб / год.}$$

В итоге у нас получается окупаемость СФЭС через 5 лет (рис. 2).

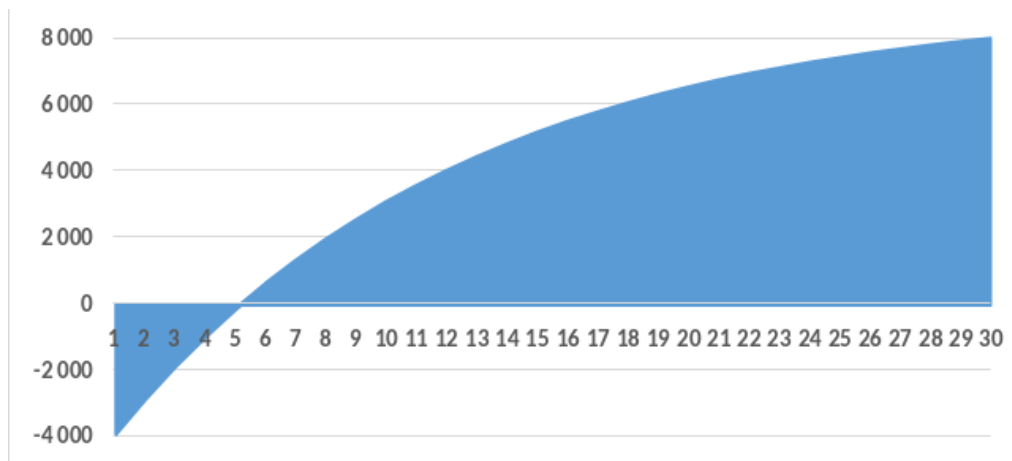


Рис. 2. Накопленный чистый дисконтированный денежный поток рассмотренной СФЭС

Моделирование СФЭС на примере города Тартуса

При моделировании СФЭС на программе PVsyst были выявлены следующие результаты (рис. 3, 4).

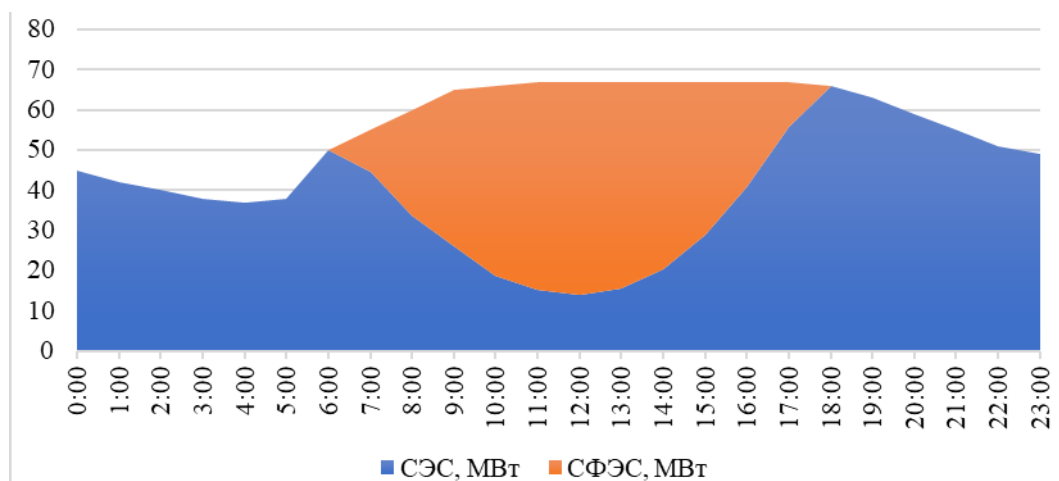


Рис. 3. Летний суточный график нагрузки при внедрении СФЭС

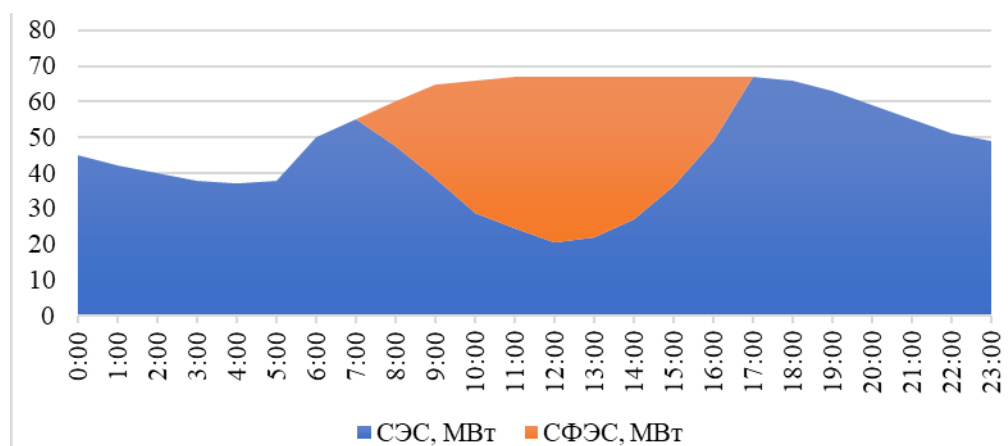


Рис. 4. Зимний суточный график нагрузки при внедрении СФЭС

Заключение

В ходе проведенного исследования была рассмотрена возможность интеграции солнечной энергетики в энергосистему города Тартуса. Полученные результаты свидетельствуют о высокой перспективности использования солнечной фотоэлектрической генерации в качестве одного из основных направлений модернизации энергоснабжения региона. Анализ показал, что внедрение солнечных электростанций позволит существенно повысить надежность энергосистемы, снизить зависимость от традиционных источников топлива, а также уменьшить объем выбросов углекислого газа.

Моделирование сценариев генерации солнечной энергии на основе программного комплекса PVsyst позволило установить, что даже при высокой выработке солнечной электроэнергии полное покрытие энергопотребления города в зимний период остается затруднительным. Это указывает на необходимость комплексного подхода к развитию энергосистемы, включающего сочетание солнечной генерации с другими источниками энергии, такими как газотурбинные установки.

Экономический анализ подтвердил финансовую целесообразность строительства солнечной электростанции. Расчеты показали, что при установленном тарифе на реализацию электроэнергии проектируемая СФЭС обеспечит значительный экономический эффект и окупится в течение 5 лет эксплуатации. Дополнительный доход может быть получен за счет механизма торговли квотами на выбросы CO_2 , что еще более укрепляет инвестиционную привлекательность проекта.

Таким образом, предложенный подход к развитию солнечной энергетики в Тартусе может стать основой для формирования стратегии устойчивого развития электроэнергетики в регионе. Полученные результаты могут быть использованы при разработке государственной программы поддержки возобновляемых источников энергии, а также при планировании новых объектов генерации с учетом климатических и экономических особенностей Сирии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фади А. Крупномасштабные проекты ВИЭ в Сирии — анализ институциональной и правовой структуры с учетом опыта Египта: магистерская диссертация / А. Фади. — Каир — Египет, Каирский университет и университет Касселя, февраль 2011. — 89 с.
2. Аль-Мохамад А. Возобновляемые источники энергии в Сирии / А. Аль-Мохамад // *Renewable Energy*. — 2001. — Т. 24. — С. 365–371.
3. Рамадан А. Обоснование параметров систем энергоснабжения на основе ВИЭ для условий Сирии: дис. канд. техн. наук: 05.14.08 / А. Рамадан. — СПб., 2020. — 183 с.
4. Удинцев Д. Н. Выбор числа и мощности генерирующего оборудования энергоцентров в автономных системах электроснабжения и в системах с распределенной генерацией / Д. Н. Удинцев, Г. В. Шведов, М. Е. Шонин // *Энергетик*. — 2020. — № 2.
5. Клевер М. Проектирование и моделирование сетевой фотоэлектрической системы в Южной Африке: технические, коммерческие и экономические аспекты: магистерская диссертация / М. Клевер. — Норвежский университет наук о жизни, 2018.
6. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии. Затраты на выработку электроэнергии на основе ВИЭ в 2023 году. — URL: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> (дата обращения: 12.04.2024).
7. Рамадан А. Техничко-экономическая оценка сетевой солнечной фотоэлектрической станции в Сирии / А. Рамадан, В. Элистратов // *Applied Solar Energy*. — 2019. — Т. 55. — Вып. 3. — С. 174–188.
8. Министерство электроэнергии Сирии. — URL: <http://www.moe.gov.sy> (дата обращения: 12.04.2024).
9. Платформа финансовых рынков. — URL: <https://www.investing.com/commodities/carbon-emissions> (дата обращения: 12.04.2024).

Дата поступления: 21.11.2024

Решение о публикации: 20.02.2025

Контактная информация:

ШЕВЛЮГИН Максим Валерьевич — канд. техн. наук, доц.; mx_sh@mail.ru

РАДИ Мангаль Рияд — аспирант; manhalradi67@gmail.com

A Techno-Economic Analysis of the Integration of Solar Power Plants into the Tartus Power System (Syrian Arab Republic)

M. V. Shevlyugin, M. R. Radi

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), 9, bld. 9, GSP-4, Obratsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Shevlyugin M. V., Radi M. R. A Techno-Economic Analysis of the Integration of Solar Power Plants into the Tartus Power System (Syrian Arab Republic). *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 201–210. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-201-210

Summary

Purpose: To conduct a techno-economic analysis of integrating solar power plants into the power system of the city of Tartus to enhance its sustainability and efficiency. In the context of energy scarcity and energy supply instability caused by warfare and destruction of energy infrastructure, the introduction of renewable energy sources (RES), in particular solar energy is seen as a promising solution. **Methods:** This study involves analyzing data on the current state of the city's power system, modelling the integration of the solar plants into the existing power grid, and assessing the economic feasibility of solar power plant implementation. The evaluation uses technical parameters of solar panels along with economic indicators related to installation and operational costs. **Results:** Integrating solar energy plants could significantly improve power reliability in Tartus, reduce fuel costs, and lower CO₂ emissions. The proposed solutions aim at reducing the region's dependency on centralized electricity supplies and enhancing grid stability. **Practical significance:** The research results can be used as a basis for the development and implementation of an energy infrastructure modernization programme in Tartus, as well as in other cities in Syria. Implementing solar power plants as part of a distributed power generation strategy presents an effective means of addressing the regional energy crisis and supporting sustainable energy development.

Keywords: Solar energy, distributed generation, techno-economic analysis, Tartus energy system, renewable energy sources (RES).

References

1. Fadi A. Krupnomasshtabnye proekty VIE v Sirii — analiz institutsional'noy i pravovoy struktury s uchetom opyta Egipta: masterskaya dissertatsiya [Large-scale renewable energy projects in Syria — an analysis of the institutional and legal framework based on the experience of Egypt: master's thesis]. *Kair — Egipet, Kairskiy universitet i universitet Kasselya, fevral' 2011*, 89 p. (In Russian)
2. Al'-Mokhamad A. *Vozobnovlyaemye istochniki energii v Sirii* [Renewable energy sources in Syria]. *Renewable Energy*, 2001, vol. 24, pp. 365–371. (In Russian)
3. Ramadan A. *Obosnovanie parametrov sistem energosnabzheniya na osnove VIE dlya usloviy Sirii: dis. kand. tekhn. nauk: 05.14.08* [Justification of the parameters of energy supply systems based on renewable energy sources for the conditions of Syria: dis. candidate of technical sciences: 05.14.08]. St. Petersburg, 2020, 183 p. (In Russian)

4. Udintsev D. N., Shvedov G. V., Shonin M. E. Vybora chisla i moshchnosti generiruyushchego oborudovaniya energotsentrov v avtonomnykh sistemakh elektrosnabzheniya i v sistemakh s raspredelennoy generatsiyey [Selection of the number and capacity of generating equipment of power centers in autonomous power supply systems and in systems with distributed generation]. *Energetik*, 2020, Iss. 2. (In Russian)

5. Klever M. *Proektirovanie i modelirovanie setevoy fotoelektricheskoy sistemy v Yuzhnoy Afrike: tekhnicheskie, kommercheskie i ekonomicheskie aspekty: masterskaya dissertatsiya* [Design and modeling of a grid-tied photovoltaic system in South Africa: technical, commercial and economic aspects: Master's thesis]. Norvezhskiy universitet nauk o zhizni Publ., 2018. (In Russian)

6. *Mezhdunarodnoe agentstvo po vozobnovlyаемым istochnikam energii. Zatraty na vyrabotku elektroenergii na osnove VIE v 2023 godu* [International Renewable Energy Agency. Renewable Energy Generation Costs in 2023]. Available at: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> (accessed: April 12, 2024). (In Russian)

7. Ramadan A., Elistratov V. *Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka setevoy solnechnoy fotoelektricheskoy stantsii v Sirii* [Feasibility Study of On-Grid Solar Photovoltaic Power Plant in Syria]. *Applied Solar Energy*, 2019, vol. 55, Iss. 3, pp. 174–188. (In Russian)

8. *Ministerstvo elektroenergii Sirii* [Ministry of Electricity of Syria]. Available at: <http://www.moe.gov.sy> (accessed: April 12, 2024). (In Russian)

9. *Platforma finansovykh rynkov* [Financial Markets Platform]. Available at: <https://www.investing.com/commodities/carbon-emissions> (accessed: April 12, 2024). (In Russian)

Received: November 21, 2024

Accepted: February 20, 2025

Author's information:

Maksim V. SHEVLYUGIN — PhD in Engineering, Associate Professor; mx_sh@mail.ru

Mingal R. RADI — Postgraduate Student; manhalradi67@gmail.com

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 65.015.11

Экономическая эффективность использования пассивных экзоскелетов на промышленных предприятиях в рамках перехода к тотальной роботизации производства и сокращению человеческого фактора

О. О. Ткачев^{1,2}

¹ООО «Конструкторское бюро внешних каркасов и биомеханики», Российская Федерация, 107140, Москва, ул. Снежная, 26

²АНО ВО «Институт международных экономических связей», Российская Федерация, 119330, Москва, ул. Мосфильмовская, 35

Для цитирования: Ткачев О. О. Экономическая эффективность использования пассивных экзоскелетов на промышленных предприятиях в рамках перехода к тотальной роботизации производства и сокращению человеческого фактора // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 211–227. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-211-227

Аннотация

Цель: Предметом данной работы является исследование использования пассивных экзоскелетов на промышленных предприятиях. Тема работы сосредоточена на анализе роли пассивных экзоскелетов как переходного этапа к полной роботизации производственных процессов. Целью исследования является оценка влияния внедрения пассивных экзоскелетов на производительность труда, безопасность рабочих и экономическую эффективность предприятий. **Методы:** Методология исследования включает в себя сбор и анализ технических данных из публичных источников, а также непосредственно из внутренних отчетов организаций о производительности и безопасности на российских и зарубежных предприятиях, где уже применяются пассивные экзоскелеты. **Результаты:** Зарубежный опыт показывает, что использование экзоскелетов позволяет снизить риск заболеваний опорно-двигательного аппарата на 45–58 %, сократить затраты на компенсации по нетрудоспособности на 31–53 % и повысить производительность труда до 153 % для определенных задач. В России процесс внедрения экзоскелетов находится на начальной стадии, однако уже есть успешные примеры их использования на предприятиях, которые показали снижение времени выполнения задач на 13 %. Экспертная оценка эффективности внедрения экзоскелетов подтвердила их высокую социальную и экономическую значимость. **Практическая значимость:** Внедрение экзоскелетов на промышленных предприятиях способствует снижению травматизма, улучшению условий труда и повышению производительности, что особенно актуально в условиях кадрового дефицита. Использование экзоскелетов позволяет сократить затраты на компенсации по нетрудоспособности и повысить престиж компании среди потенциальных сотрудников. Статья предлагает рекомендации для российских предприятий по внедрению экзоскелетов, что может способствовать выполнению задач, поставленных в рамках национальных проектов, и повышению конкурентоспособности отечественной промышленности. Внедрение экзоскелетов может стать важным шагом на пути к полной автоматизации и роботизации процессов. В выводах подчеркивается, что пассивные экзоскелеты являются эффективным инструментом для повышения производительности и безопасности труда.

Ключевые слова: Экзоскелеты, роботизация, промышленность, пассивные экзоскелеты, производительность, физическая нагрузка, безопасность труда, эффективность, интеграция технологий, экономические аспекты.

Введение

В настоящее время на промышленных предприятиях Российской Федерации, характеризующихся тяжелыми и опасными условиями труда, согласно данным Росстата на конец 2023 года, заняты приблизительно 8 миллионов человек. Удельный вес потребности (далее — УВП) в работниках для замещения вакантных должностей в общем количестве рабочих мест составляет в среднем 5,5 %, что эквивалентно примерно 440 000 вакансиям, которые в текущих условиях трудно заполнить [1]. При этом за последние два года, начиная с момента начала специальной военной операции (далее — СВО), УВП увеличился на 1,5 %. Данный показатель свидетельствует о наличии кадрового дефицита в промышленном секторе страны, что актуализирует проблему замещения человеческого труда автоматизированными системами, а в случаях, где это невозможно, — сохранения здоровья имеющих квалифицированных специалистов.

В рамках настоящей статьи необходимо учитывать следующие нормативно-правовые акты и официальные документы, релевантные рассматриваемой проблематике:

– **Послание Президента РФ В. В. Путина Федеральному Собранию от 29 февраля 2024 года**, в котором обозначены задачи национального проекта «Производительность труда», включая сокращение времени производственных процессов на 30 % и увеличение производительности труда на 45 % при условии максимального сохранения здоровья работников [2];

– **Указ Президента РФ В. В. Путина от 7 мая 2024 года № 309** «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», где одним из ключевых приоритетов является достижение технологического лидерства [3];

– **Поручение Президента РФ В. В. Путина от 7 июня 2024 года**, озвученное в ходе пленарного заседания Петербургского международного экономического форума, в котором подчеркивается необходимость внедрения более 100 тысяч роботизированных систем на российских предприятиях с целью вхождения в число 25 стран с наибольшей плотностью роботизации к 2030 году [4].

Побочной целью данной статьи является оценка возможности реализации задач, поставленных президентом Российской Федерации, а также анализ потенциальной роли пассивных экзоскелетов в их достижении с теоретической и практической точек зрения. Для этого будет рассмотрен зарубежный опыт применения пассивных экзоскелетов и роботизации промышленных предприятий, а также проведено сравнение с текущей ситуацией на отечественных производствах.

Экзоскелеты. Определение. Разновидности. Предложение на рынке российского производства

Экзоскелет представляет собой техническое устройство, предназначенное для компенсации утраченных функций опорно-двигательного аппарата, усиления мышечной активности человека и расширения диапазона движений за счет внешнего каркаса и приводящих механизмов. Кроме того, экзоскелет обеспечивает передачу нагрузки при транспортировке грузов через внешний каркас на опорную поверхность стопы устройства.

Экзоскелеты классифицируются на три основных типа: активные, полуактивные и пассивные [5]. Активные экзоскелеты преимущественно применяются в медицинской сфере для реабилитации пациентов с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата (далее — ОДА). Одним из наиболее известных активных экзоскелетов, производимых в России, является модель ExoAtlet (рис. 1) [6].

Пассивные экзоскелеты предназначены для снижения или перераспределения нагрузки при подъеме и перемещении грузов без использования внешних источников энергии (электричество, пневматические или гидравлические системы). Полуактивные экзоскелеты представляют собой гибридные конструкции, основанные на пассивной технологии с включением упругих элементов (резиновых жгутов, пружин, мало-мощных приводов), которые применяются преимущественно для такелажных работ, включая разгрузку верхних конечностей, плечевого и поясничного отделов. Фактически любое механическое или текстильное устройство, которое может быть закреплено на теле человека и соответствует его биомеханике, способно облегчить выполнение определенных действий, можно отнести к категории пассивных экзоскелетов. В связи с этим компании, выпускающие подобные устройства, позиционируют их как экзоскелеты.

При более детальном рассмотрении пассивные экзоскелеты можно разделить на системы разгрузки и системы перераспределения нагрузки (рис. 2). Одним из лидеров в данной области является компания Ekzo



Рис. 1. Пример активного экзоскелета для реабилитации ExoAtlet



Рис. 2. Пример полуактивного экзоскелета (система перераспределения нагрузки) Ekzo Solutions



Рис. 3. Пример пассивного экзоскелета для поддержки рук Exorise

Solutions. Системы разгрузки предполагают прямой контакт экзоскелета с опорной поверхностью, что позволяет минимизировать нагрузку на оператора. Системы перераспределения нагрузки основаны на переносе усилий с одной части тела на другую (например, с верхних конечностей и спины на нижние конечности), при этом нагрузка на голеностопный сустав остается неизменной.

Данная технология наиболее эффективна при выполнении такелажных работ и подъеме грузов массой до 30 кг. Однако при транспортировке тяжелых объектов такие системы могут оказывать негативное воздействие на голеностопный сустав оператора.

Важным аспектом применения экзоскелетов является использование систем поддержки верхних конечностей при выполнении монотонных операций в неэргономичных позах.

Подобные решения активно применяются при работе со специализированным инструментом (рис. 3), например на сборочных линиях автомобильных заводов. Наиболее значительных результатов в этой области достигла компания Exorise.

Среди пассивных экзоскелетов, разработанных для разгрузки оператора, следует выделить модульный экзоскелет «Напарник», созданный С. В. Злыдарем. Антропоморфная конструкция данного устройства позволяет перенаправлять значительную часть нагрузки на опорную поверхность, минуя тело оператора, с максимальной грузоподъемностью до 55 кг.

Известно, что Центральный научно-исследовательский опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (далее — ЦНИИ РТК) с 2009 года ведет работы по разработке и испытаниям экзоскелетов как гражданского, так и военного назначения.

Тем не менее перечень разработок не ограничивается вышеуказанными примерами. В России зарегистрировано порядка 30 патентов на различные модели пассивных экзоскелетов, созданных разными авторами, однако их практическая применимость и эффективность остаются недостаточно изученными.

Зарубежный опыт внедрения экзоскелетов на производстве на пути к роботизации

Эффективность применения экзоскелетов в производственной сфере уже подтверждена зарубежным опытом, где промышленные предприятия, стремясь к опережающему развитию, активно внедряют данные технологии для сохранения здоровья сотрудников, занятых ручным трудом, и минимизации потенциальных расходов на компенсации в связи с временной или постоянной утратой трудоспособности.

Например, известный автомобильный концерн BMW еще в 2016 году осуществил пробную закупку пассивных экзоскелетов для своего завода в Спартанберге, штат Южная Каролина [7]. Этот пример стал стимулом для других компаний в США, которые также начали внедрять подобные технологии. В период с 2016 по 2019 год экзоскелеты были внедрены на производственных объектах таких компаний, как Toyota, Boeing и Ford [8]. Основным мотивом для внедрения данных инноваций стало то, что, согласно исследованиям, расходы на компенсации сотрудникам в связи с утратой трудоспособности в США составляют приблизительно 15,1 млрд долларов ежегодно, причем эта сумма демонстрирует устойчивую тенденцию к росту [9]. Наибольшую долю в этих расходах занимают компенсации, связанные с заболеваниями поясничного отдела позвоночника.

Однако до сих пор не установлена однозначная корреляция между использованием экзоскелетов и снижением уровня производственного травматизма. Некоторые исследования, проведенные по заказу производителей экзоскелетов и их клиентов, указывают на то, что применение данных устройств способствует снижению потребления кислорода и мышечной активности, что является косвенным показателем уменьшения утомляемости работников. Например, лабораторное исследование, проведенное специалистами Virginia Tech с участием 12 человек, выполнявших смоделированные повторяющиеся задачи (сверление и соединение проводов), продемонстрировало, что использование экзоскелета EksoVest от компании Ekso Bionics снизило среднюю активность плечевого пояса на 60,3 %.

Наиболее актуальное исследование, проведенное Safetytech Accelerator, показало, что [10]:

– заболевания опорно-двигательного аппарата представляют собой серьезную проблему для здоровья на рабочем месте. По оценкам, общая стоимость для организаций и экономик составляет 1–2 % ВВП, или около 1 триллиона долларов США в год;

– использование экзоскелетов позволяет:

- а) снизить риск заболеваний ОДА на 45–58 %;
- б) снизить затраты организации по компенсациям на 31–53 %;
- в) повысить производительность до 153 % для определенных задач.

Использование экзоскелетных систем нашло применение в деятельности крупной логистической корпорации Hermes Germany [11], которая внедрила экзоскелеты для поддержки поясничного отдела позвоночника производства SUITX by Ottobock с целью оптимизации процесса сортировки габаритных грузов. Проведенные исследования демонстрируют, что облегченная конструкция экзоскелета, применяемого компанией Hermes, способствует снижению нагрузки на поясничный отдел на 56–75 % и повышению уровня физической выносливости сотрудников на 52 % после выполнения повторяющихся подъемных операций в течение трудовой смены.

Несмотря на успешное внедрение экзоскелетных технологий, крупные корпорации продолжают стремиться к замене человеческого труда на роботизированные системы, что позволяет минимизировать расходы на оплату труда, страхование сотрудников и компенсационные выплаты в случаях временной или постоянной утраты трудоспособности. Многие производители роботизированных решений акцентируют внимание на данных аргументах как на ключевых преимуществах автоматизации, включая их в свои коммерческие предложения. Например, компания Plus One Robotics, расположенная в Сан-Антонио (штат Техас), сообщает о повышении производительности процессов сортировки и комплектации на 30 % благодаря внедрению автоматизированных систем на складах [12]. С другой стороны, стартап Slip Robotics из Атланты (штат Джорджия) заявляет о трехкратном увеличении пропускной способности складских операций благодаря использованию автономного погрузочного робота, который практически исключает необходимость участия персонала в процессах загрузки и разгрузки трейлеров, а также снижает риски, связанные с выполнением данных задач [13].

Рассматривая инновационные разработки концерна BMW, следует отметить, что уже в 2024 году на производственной площадке в Спартанберге был внедрен первый гуманоидный робот Figure 02 [14]. Данная роботизированная система признана одной из наиболее технологически продвинутых в мире. По заявлениям разработчиков, в отличие от традиционных промышленных роботов, используемых в автомобилестроении, Figure 02 обладает повышенной мобильностью и способностью адаптироваться к изменяющимся внешним условиям. Благодаря интеграции технологий искусственного интеллекта робот способен эффективно взаимодействовать с персоналом в производственной среде. Применение нейронных сетей позволяет системе обучаться в процессе выполнения задач, что повышает ее функциональность и автономность.

Таким образом, развитые экономические системы активно переходят от использования экзоскелетных технологий к внедрению автономных роботизированных систем, стремясь минимизировать зависимость от человеческого фактора в производственных процессах

Внедрение экзоскелетов на российских предприятиях: успехи, выгода, перспективы

Обращаясь к статистическим данным, следует отметить, что в 2022 году Социальный фонд России (СФР) зафиксировал 36,4 тысячи страховых случаев, из которых 32,3 тысячи связаны с производственными травмами [15]. Распределение показателей производственного травматизма по отраслям экономики Российской Федерации представлено на рис. 4.



Рис. 4. Данные Росстата распределения производственных травм по отраслям

К сожалению, уровень внедрения робототехнических систем на российских промышленных предприятиях остается крайне низким. Согласно поручению президента Российской Федерации, направленному на увеличение плотности роботизации в промышленном секторе, по итогам 2023 года в России на 10 тысяч сотрудников приходилось лишь 19 роботизированных единиц. Данный показатель соответствует 53-му месту в глобальном рейтинге [16]. Эти данные приведены в исследовании Центра развития промышленной робототехники Университета «Иннополис» под названием «Состояние роботизации в России и в мире» [17]. Для сравнения: у лидера рейтинга — Южной Кореи — данный показатель составляет 1000 промышленных роботов на 10 000 сотрудников. Согласно прогнозам Центра развития промышленной робототехники, плотность роботизации (количество роботизированных единиц на 10 тысяч сотрудников) должна увеличиться с 19 до 145 к 2030 году, а эксплуатационный парк робототехнических систем — с 12 841 до 99 325 единиц.

Исполнительный директор Национальной ассоциации участников рынка робототехники (НАУРР) Ольга Мудрова отмечает, что поставленная президентом задача является как минимум амбициозной [18]. Большинство экспертов сходятся во мнении, что достижение указанных показателей с большей вероятностью возможно к 2036 году, чем к 2030.

На текущем этапе развития робототехнических технологий наибольший потенциал заключается в оснащении российских промышленных предприятий пассивными экзоскелетами. Это позволит сохранить здоровье

квалифицированных сотрудников в условиях нарастающего дефицита кадров и постепенно снизить зависимость от привлечения трудовых мигрантов из стран ближнего зарубежья. Кроме того, высокий уровень обеспечения охраны труда на производственных объектах может стать значимым фактором привлечения будущих специалистов.

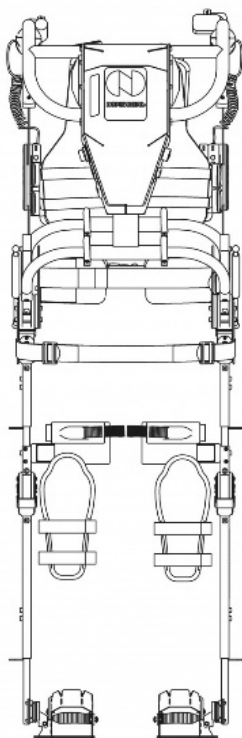


Рис. 5. Схема промышленного экзоскелета Enforcer

Существуют передовые российские предприятия, которые либо уже внедряют экзоскелетные системы для своих сотрудников, либо создают специализированные конструкторские бюро и лаборатории для разработки экзоскелетов, адаптированных к их производственным потребностям. В частности, компания ПАО «ГМК «Норильский никель»» организовала подразделение под названием «Цифровая лаборатория» [19]. Данная лаборатория привлекла к сотрудничеству студентов Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ, г. Курск) и их прототип активного промышленного экзоскелета (рис. 5). Специалисты «Норильского никеля» разработали техническое задание, учитывающее специфику производственных процессов, и реализовали его в новом прототипе экзоскелета Enforcer. Данная модель может быть классифицирована как полуактивная, поскольку для выполнения такелажных работ и подъема тяжестей используются электрические лебедки.

К сожалению, результаты испытаний данного экзоскелета не опубликованы, а его эффективность не подтверждена официально. Однако разработчики утверждают, что грузоподъемность системы достигает 70 кг, а ее применение ориентировано на выполнение задач в статичных позах с минимальной нагрузкой на опорно-двигательный аппарат (ОДА).

Экономический эффект от массового внедрения данного экзоскелета может выражаться в сокращении численности персонала, занятого выполнением задач, связанных с перемещением и подъемом тяжелых предметов и металлических конструкций, а также в снижении уровня травматизма, связанного с нагрузками на ОДА.

Еще одним примером применения экзоскелетных технологий является опыт АО «Российские железные дороги» (РЖД). В 2023–2024 годах Центр инновационного развития провел испытания семи пассивных экзоскелетов ProEXO Boost, предназначенных для перераспределения нагрузки. В результате использования экзоскелета было зафиксировано снижение временных затрат на сверление отверстий с использованием станка СТР-2 на 13 %, что эквивалентно 1,46 нормо-часам на 10 отверстий или 8,76 нормо-минутам на одно отверстие.

Существующая методология и расчеты

Стоит рассмотреть методологию оценки эффективности инновационных проектов в соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» от 28.05.2019 № 1066/р «Об утверждении Единой методики оценки эффективности инновационной деятельности холдинга «РЖД»» [20] как возможный будущий шаблон для расчетов эффективности использования экзоскелетов на производстве. Группы и виды эффектов от инновационных проектов можно рассмотреть в таблице. В вышеуказанном распоряжении рассматриваются как денежные, так и неденежные эффекты.

Группы и виды эффектов от инновационных проектов

Группа эффектов	Вид эффекта	Составляющие эффекта
Денежные	Коммерческий	Увеличение выручки от продаж услуг (за счет роста числа потребителей и/или средней цены услуги); предотвращение сокращения (недополучения) выручки
	Ресурсный	Снижение (экономия) текущих или капитальных затрат (на покупку, установку или обслуживание и ремонт оборудования, техники и объектов инфраструктуры, затрат на персонал, на материалы, энергию и топливо и др.); снижение или предотвращение ущербов (потерь) от аварий, пожаров, других чрезвычайных ситуаций, снижение или предотвращение затрат на ликвидацию их последствий, выплату штрафов и компенсаций пострадавшим; снижение или предотвращение выплат иных компенсаций, штрафов (в том числе за несоблюдение сроков доставки грузов)
Неденежные	Социальный	Снижение числа жертв и пострадавших на железнодорожном транспорте; улучшение условий труда, снижение травматизма и заболеваемости
	Экологический	Снижение и/или предотвращение негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду
	Управленческий	Повышение эффективности управления (в том числе обоснованности и скорости принятия управленческих решений); создание возможности реализации новых бизнес-моделей
	Потребительский	Повышение удовлетворенности потребителей (за счет роста качества, комфорта железнодорожных услуг); повышение лояльности потребителей к бренду РЖД, улучшение имиджа компании
	Научный	Накопление новых знаний, научно-технического задела, повышение вероятности успешного преодоления технических проблем в будущем
	Системный	Создание условий и предпосылок, повышение возможностей для реализации других инновационных проектов в будущем (в том числе внедрение IT-инфраструктуры, программ и платформ)

Денежный эффект рассчитывается по формуле:

$$CF_t = CFO_t + CFI_t,$$

где CF_t — денежный поток в год $t = 0 \dots T$ расчетного периода, руб.;

CFO_t — денежный поток от операционной деятельности в год t расчетного периода, руб.;

CFI_t — денежный поток от инвестиционной деятельности в год t расчетного периода, руб.

Денежный поток от операционной деятельности (CFO_t) рассчитывается в следующем порядке:

1) расчет прибыли до вычета процентов, налогов и амортизации (ЕБИТДА) как разницы притоков и оттоков по операционной деятельности по годам t расчетного периода;

2) расчет прибыли до налогообложения (ЕБИТ) путем вычитания амортизации из показателя ЕБИТДА;

3) расчет чистой прибыли путем вычитания из показателя ЕБИТ суммы налогов;

4) расчет денежного потока от операционной деятельности путем суммирования чистой прибыли и величины амортизации.

Денежный поток от инвестиционной деятельности (CFI_t) рассчитывается как разница притоков и оттоков по инвестиционной деятельности по годам t расчетного периода.

Финансовые показатели эффективности от ОАО «РЖД» получить не удалось, так как считаются коммерческой тайной, однако как срок окупаемости закупки данных экзоскелетов закладывают около 3 лет при сравнении вложенных средств и результата повышения эффективности. Эффект от возможной экономии на выплатах не учитывался.

Заявленный неденежный эффект от реализации внедрения экзоскелетов:

- социальный, т. е. предупреждение травм ОДА;
- улучшение условий труда работников;
- повышение престижа компании.

К сожалению, в ОАО «РЖД» не проводилось исследования по расчету экономии на социальных выплатах сотрудникам по нетрудоспособности от сокращения самих травм на производстве за счет использования пассивных экзоскелетов.

Экспертная оценка социальной эффективности проекта балльная, рассчитывалась по формуле

$$E_{relative} = \frac{E_{real}}{I_{potential}}$$

и включает в расчет три показателя:

– $E_{potential}$ — потенциальная эффективность проекта при условии его успешной реализации и внедрения (тиражирования) результатов в холдинге ОАО «РЖД»;

– E_{real} — реальная эффективность проекта, скорректированная на вероятность его успешной реализации;

– $E_{relative}$ — относительная эффективность проекта, учитывающая затраты на него.

Эксперты оценили проект «Применение промышленных экзоскелетов в технологии производства работ, связанных с поднятием и перемещением тяжестей», который по итогу использования считается эффективным, так как значение реальной эффективности E_{real} выше 30 баллов ($E_{real} = 49,6$ балла).

Результативная часть

Дадим оценку влияния внедрения пассивных экзоскелетов на производительность труда, безопасность рабочих и экономическую эффективность предприятий:

1. Влияние на производительность труда

– **снижение утомляемости:** использование пассивных экзоскелетов позволяет снизить нагрузку на опорно-двигательный аппарат (ОДА) работников, что приводит к уменьшению усталости и увеличению продолжительности эффективной работы. Например, в компании Hermes Germany применение экзоскелетов повысило выносливость сотрудников на 52 % после выполнения повторяющихся задач.

– **ускорение выполнения задач:** в АО «Российские железные дороги» использование экзоскелетов ProEXO Boost сократило время на сверление отверстий на 13 %, что эквивалентно 1,46 нормо-часа на 10 отверстий.

– **повышение качества работы:** снижение физической нагрузки позволяет работникам выполнять задачи с большей точностью и меньшим количеством ошибок, что особенно важно для монотонных операций.

2. Влияние на безопасность рабочих

– **снижение травматизма:** пассивные экзоскелеты способствуют уменьшению нагрузки на поясничный отдел, плечевой пояс и другие части ОДА. Исследования показывают, что использование экзоскелетов снижает риск заболеваний ОДА на 45–58 %. Например, в Hermes Germany нагрузка на поясничный отдел снизилась на 56–75 %;

– **профилактика профессиональных заболеваний:** экзоскелеты помогают предотвратить развитие хронических заболеваний, связанных с физическими перегрузками, таких как остеохондроз и грыжи;

– **улучшение эргономики:** использование экзоскелетов позволяет работникам сохранять правильную осанку и снижает риск травм при выполнении задач в неудобных позах.

3. Экономическая эффективность

– **сокращение затрат на компенсации:** внедрение экзоскелетов позволяет снизить расходы на выплаты по нетрудоспособности и лечение сотрудников. Например, в США ежегодные расходы на компенсации из-за утраты трудоспособности составляют около 15,1 млрд долларов, и использование экзоскелетов может сократить эти затраты на 31–53 %;

– **снижение потерь из-за простоев:** уменьшение травматизма и усталости работников приводит к сокращению простоев и повышению производительности. Например, в РЖД использование экзоскелетов позволило сократить время выполнения задач, что напрямую влияет на экономическую эффективность;

– **сокращение численности персонала:** в некоторых случаях экзоскелеты позволяют уменьшить количество работников, занятых физически тяжелыми задачами, что снижает затраты на оплату труда.

4. Ограничения и риски

– **высокие начальные затраты:** внедрение экзоскелетов требует значительных инвестиций в закупку оборудования и обучение персонала;

– **недостаток исследований:** в России отсутствуют масштабные исследования, подтверждающие долгосрочную эффективность экзоскелетов. Например, результаты испытаний экзоскелета Enforcer в «Норильском никеле» не опубликованы.

– **сопротивление сотрудников:** работники могут испытывать дискомфорт при использовании экзоскелетов или не доверять новым технологиям.

5. Перспективы внедрения

– **социальный эффект:** внедрение экзоскелетов улучшает условия труда, что повышает привлекательность компании для будущих сотрудников и снижает текучесть кадров.

– **технологическое развитие:** разработка новых моделей экзоскелетов, таких как модульный экзоскелет «Напарник» с грузоподъемностью до 55 кг, открывает новые возможности для их применения в различных отраслях.

– **государственная поддержка:** реализация национальных проектов, таких как «Производительность труда», и поручений президента РФ способствует развитию роботизации и внедрению экзоскелетов на российских предприятиях.

Заключение

Внедрение пассивных экзоскелетов может оказывать положительное влияние на производительность труда, безопасность рабочих и экономическую эффективность предприятий. Однако для достижения максимального эффекта необходимо:

– проводить дополнительные исследования для оценки долгосрочной эффективности экзоскелетов;

– обеспечить обучение сотрудников и адаптацию технологий под конкретные производственные задачи;

– учитывать высокие начальные затраты и возможное сопротивление со стороны персонала.

Таким образом, пассивные экзоскелеты являются действенным инструментом для повышения конкурентоспособности российских предприятий в условиях растущего кадрового дефицита и необходимости улучшения условий труда.

Список источников

1. Таблица с показателями удельного веса численности работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, в организациях. — URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/usl_trud1-2023.xlsx (дата документа: 26.04.2024).

2. Послание Президента Федеральному Собранию. — URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/messages/73585> (дата документа: 29.02.2024).

3. Указ Президента Российской Федерации № 309. — URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542> (дата документа: 07.05.2024).

4. Путин поручил за короткий срок войти в топ-25 стран мира по плотности роботизации. — URL: <https://digital.gov.ru/ru/events/51364/> (дата публикации: 07.06.2024).

5. Воробьев А. А. Терминология и классификация экзоскелетов / А. А. Воробьев, Ф. А. Андрющенко, О. А. Засыпкина и др. // Вестник ВолГМУ. — 2015. — № 3(55). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/terminologiya-i-klassifikatsiya-ekzoskeletov> (дата обращения: 18.12.2024).

6. Официальный сайт производителя экзоскелетов «ЭкзоАтлет». — URL: <https://exoatlet.ru> (дата обращения: 15.12.2024).

7. BMW Group Harnesses Potential of Innovative Automation and Flexible Assistance Systems in Production. — URL: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0268199EN/bmw-group-harnesses-potential-of-innovative-automation-and-flexible-assistance-systems-in-production?language=en> (дата обращения: 15.12.2024).

8. The Wall Street Journal / Industrial Exoskeletons Give Workers a Lift. — URL: <https://www.wsj.com/articles/industrial-exoskeletons-give-workers-a-lift-11547730001> (дата обращения: 15.12.2024).

9. Lu M.-L. Work-related Musculoskeletal Disorders / M.-L. Lu, B. Lowe, N. Howard et al. — 2022. — URL: https://www.researchgate.net/publication/364133749_Work-related_Musculoskeletal_Disorders. — DOI: 10.2174/9789815049138122010018 (дата обращения: 15.12.2024).

10. Safety Accelerator Report: Tackling MSD in Industrial Sectors with Emerging Tech. — URL: <https://safetytechaccelerator.org/downloads/report-tackling-msd-in-industrial-sectors-with-emerging-tech/> (дата обращения: 16.12.2024).

11. SuitX Official Website. Hermes Germany. Back exoskeletons provide noticeable relief. — URL: https://www.suitx.com/en/use-case_hermes (дата обращения: 16.12.2024).

12. Plus One Robotics Official Website. 3PL Warehouse Automation Solutions. — URL: <https://www.plusonerobotics.com/3pl> (дата обращения: 15.12.2024).
13. Slip Robotics Official Website. Case Study. — URL: <https://www.sliprobotics.com/case-study> (дата обращения: 17.12.2024).
14. Humanoid Robots for BMW Group Plant Spartanburg. — URL: <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2024/humanoid-robots.html> (дата обращения: 17.12.2024).
15. Открытые данные ФСС до 2023 года. — URL: https://sfr.gov.ru/opendata/fss_opendata/ (дата обращения: 19.12.2024).
16. Global robot statistics. Market Report. — URL: <https://ifr.org/about-world-robotics/> (дата обращения: 15.12.2024).
17. *Кораблева А.* Железная рука роботизации. Автоматизация производства в России растет опережающими темпами / А. Кораблева. — URL: <https://expert.ru/promishlennost/zheleznaaya-ruka-robotizatsii/?ysclid=m4u43drezl524901826> (дата обращения: 19.12.2024).
18. «Войти в топ-25 стран по количеству промышленных роботов к 2030 году — для нас это очень амбициозная задача», — Ольга Мудрова // Новости НАУПР. — URL: <https://robotunion.ru/glavnaya/tpost/8ldvv2ki71-voiti-v-top-25-stran-po-kolichestvu-prom?ysclid=m4u3q2jc3e331462107> (дата обращения: 17.12.2024).
19. «Норникель» продемонстрировал промышленникам возможности экзоскелета. — URL: <https://nornickel.ru/news-and-media/press-releases-and-news/nornikel-prodemonstriroval-promyshlennikam-vozmozhnosti-ekzoskeleta/?ysclid=m4vjgorgc651688955> (дата обращения: 15.12.2024).
20. Единая методика оценки эффективности инновационной деятельности холдинга «РЖД». — URL: <https://rcit.su/techinfoW4.html?ysclid=m6s3ah7wud145894860> (дата обращения: 05.02.2025).

Дата поступления: 20.12.2024

Решение о публикации: 14.02.2025

Контактная информация:

ТКАЧЕВ Олег Олегович — генеральный директор¹, преподаватель²; info@narnik.tech

Economic Efficiency of Using Passive Exoskeletons in Industrial Enterprises Within the Framework of the Transition to Total Robotization of Production and Reduction of the Human Factor

O. O. Tkachev^{1,2}

¹Design Bureau of External Frames and Biomechanics LLC, 26, Snezhnaya Str., Moscow, 107140, Russian Federation

²Institute of International Economic Relations, 35, Mosfilmovskaya Str., Moscow, 119330, Russian Federation

For citation: Tkachev O. O. Economic Efficiency of Using Passive Exoskeletons in Industrial Enterprises Within the Framework of the Transition to Total Robotization of Production and Reduction of the Human Factor. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 211–227. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-211-227

Summary

Purpose: The subject of this work is the study of the use of passive exoskeletons in industrial enterprises. The topic of the work is focused on the analysis of the role of passive exoskeletons as a transitional stage to full robotization of production processes. The purpose of the study is to assess the impact of the introduction of passive exoskeletons on labor productivity, worker safety and economic efficiency of enterprises. **Methods:** The research methodology includes the collection and analysis of technical data from public sources, as well as directly from internal reports of organizations, on productivity and safety at Russian and foreign enterprises where passive exoskeletons are already used. **Results:** Foreign experience shows that the use of exoskeletons can reduce the risk of musculoskeletal diseases by 45–58%, reduce the cost of disability compensation by 31–53% and increase labor productivity up to 153% for certain tasks. In Russia, the process of introducing exoskeletons is at an early stage, but there are already successful examples of their use at enterprises that have shown a 13% reduction in task completion time. An expert assessment of the effectiveness of the introduction of exoskeletons confirmed their high social and economic significance. **Practical significance:** The introduction of exoskeletons in industrial enterprises helps to reduce injuries, improve working conditions and increase productivity, which is especially important in the context of personnel shortages. The use of exoskeletons allows to reduce costs for disability compensation and increase the prestige of the company among potential employees. The article offers recommendations for Russian enterprises on the introduction of exoskeletons, which can contribute to the implementation of tasks set within the framework of national projects and increase the competitiveness of the domestic industry. The introduction of exoskeletons can be an important step towards full automation and robotization of processes. The conclusions emphasize that passive exoskeletons are an effective tool for increasing productivity and labor safety.

Keywords: Exoskeletons, robotics, industry, passive exoskeletons, productivity, physical strain, workplace safety, efficiency, technology integration, economic aspects.

References

1. *Tablitsa s pokazatelyami udel'nogo vesa chislennosti rabotnikov, zanyatykh na rabotakh s vrednymi i (ili) opasnymi usloviyami truda, v organizatsiyakh* [Table with indicators of the proportion of employees engaged in jobs with harmful and (or) hazardous working conditions in organizations]. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/usl_trud1-2023.xlsx (document date: 26.04.2024). (In Russian)

2. *Poslanie Prezidenta Federal'nomu Sobraniyu* [The President's Address to the Federal Assembly]. Available at: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/messages/73585> (document date: 29.02.2024). (In Russian)
3. *Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii № 309* [Decree of the President of the Russian Federation № 309]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542> (document date: 07.05.2024). (In Russian)
4. *Putin poruchil za korotkiy srok voyti v top-25 stran mira po plotnosti robotizatsii* [Putin ordered to enter the top 25 countries in the world in terms of robotization density in a short time]. Available at: <https://digital.gov.ru/ru/events/51364/> (date of publication: 07.06.2024). (In Russian)
5. Vorob'ev A. A., Andryushchenko F. A., Zasypkina O. A. et al. Terminologiya i klassifikatsiya ekzoskeletov [Terminology and classification of exoskeletons]. *Vestnik VolGMU* [Bulletin of VolGMU]. 2015, Iss. 3(55). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/terminologiya-i-klassifikatsiya-ekzoskeletov> (accessed: December 18, 2024). (In Russian)
6. *Ofitsial'nyy sayt proizvoditelya ekzoskeletov "EkzoAtlet"* [Official website of the manufacturer of exoskeletons "ExoAtlet"]. Available at: <https://exoatlet.ru> (accessed: December 15, 2024). (In Russian)
7. BMW Group Harnesses Potential of Innovative Automation and Flexible Assistance Systems in Production. Available at: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0268199EN/bmw-group-harnesses-potential-of-innovative-automation-and-flexible-assistance-systems-in-production?language=en> (accessed: December 15, 2024).
8. The Wall Street Journal / Industrial Exoskeletons Give Workers a Lift. Available at: <https://www.wsj.com/articles/industrial-exoskeletons-give-workers-a-lift-11547730001> (accessed: December 15, 2024).
9. Lu M.-L., Lowe B., Howard N. et al. Work-related Musculoskeletal Disorders. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/364133749_Work-related_Musculoskeletal_Disorders. DOI: 10.2174/9789815049138122010018 (accessed: December 15, 2024).
10. Safety Accelerator Report: Tackling MSD in Industrial Sectors with Emerging Tech. Available at: <https://safetytechaccelerator.org/downloads/report-tackling-msd-in-industrial-sectors-with-emerging-tech/> (accessed: December 16, 2024).
11. SuitX Official Website. Hermes Germany. Back exoskeletons provide noticeable relief. Available at: https://www.suitx.com/en/use-case_hermes (accessed: December 16, 2024).
12. Plus One Robotics Official Website. 3PL. Warehouse Automation Solutions. Available at: <https://www.plusonerobotics.com/3pl> (accessed: December 15, 2024).
13. Slip Robotics Official Website. Case Study. Available at: <https://www.sliprobotics.com/case-study> (accessed: December 17, 2024).
14. Humanoid Robots for BMW Group Plant Spartanburg. Available at: <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2024/humanoid-robots.html> (accessed: December 17, 2024).
15. *Otkrytye dannye FSS do 2023 goda* [Open data of the Social Insurance Fund until 2023]. Available at: https://sfr.gov.ru/opendata/fss_opendata/ (accessed: December 19, 2024).

16. Global robot statistics. Market Report. Available at: <https://ifr.org/about-world-robotics/> (accessed: December 15, 2024). (In Russian)

17. Korableva A. *Zheleznaya ruka robotizatsii. Avtomatizatsiya proizvodstva v Rossii rastet operezhayushchimi tempami* [The iron hand of robotics. Automation of production in Russia is growing at an accelerated pace]. Available at: <https://expert.ru/promishlennost/zheleznaya-ruka-robotizatsii/?ysclid=m4u43drezl524901826> (accessed: December 19, 2024). (In Russian)

18. “Voiti v top-25 stran po kolichestvu promyshlennykh robotov k 2030 godu — dlya nas eto ochen’ ambitsioznaya zadacha”, — Ol’ga Mudrova [“Entering the top 25 countries in terms of the number of industrial robots by 2030 is a very ambitious goal for us”, Olga Mudrova]. *Novosti NAURR* [News of the National Academy of Agricultural Sciences]. Available at: <https://robotunion.ru/glavnaya/tpost/8ldvv2ki71-voiti-v-top-25-stran-po-kolichestvu-prom?ysclid=m4u3q2jc3e331462107> (accessed: December 17, 2024). (In Russian)

19. “Nornikel” prodemonstriroval promyshlennikam vozmozhnosti ekzoskeleta [Norilsk Nickel demonstrated the capabilities of an exoskeleton to industrialists]. Available at: <https://nornikel.ru/news-and-media/press-releases-and-news/nornikel-prodemonstriroval-promyshlennikam-vozmozhnosti-ekzoskeleta/?ysclid=m4vjgxorgc651688955> (accessed: December 15, 2024). (In Russian)

20. *Edinaya metodika otsenki effektivnosti innovatsionnoy deyatel’nosti kholdinga “RZhD”* [Unified methodology for assessing the effectiveness of innovative activities of the Russian Railways holding]. Available at: <https://rcit.su/techinfoW4.html?ysclid=m6s3ah7wud145894860> (accessed: February 05, 2025). (In Russian)

Received: December 20, 2024

Accepted: February 14, 2025

Author’s information:

Oleg O. TKACHEV — General Director¹, Lecturer²; info@naparnik.tech

УДК 338.47

Выявление тенденций развития логистики распределения и оценка возможностей их применения в холдинге «РЖД»

Е. М. Волкова, М. А. Лякина, О. О. Рахимов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Волкова Е. М., Лякина М. А., Рахимов О. О. Выявление тенденций развития логистики распределения и оценка возможностей их применения в холдинге «РЖД» // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 228–238. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-228-238

Аннотация

Цель: Выявление современных тенденций управления цепями поставок в теории и на практике и оценка возможностей их применения для совершенствования системы снабжения ОАО «РЖД». **Методы:** Для достижения поставленной цели используются общенаучные методы исследования, включая сравнительный анализ, обобщение и систематизацию данных, полученных из научных исследований отечественных и зарубежных авторов. **Результаты:** Выявлены особенности современного этапа управления цепями поставок, заключающиеся в: смещении акцента с SCM на DCM, выстраивании конфигурации и работы цепей поставок с максимизацией ценности для конечного клиента, развитии интегрированного планирования и управления с использованием современных CRM-систем и широком применении цифровых инструментов управления в транспортно-логистическом бизнесе. Проведенный анализ структуры логистической составляющей рынка электронной коммерции показал значительное увеличение доли маркетплейсов, а также усиление их влияния на поведение других участников сферы товародвижения, состояние и размещение складской инфраструктуры, конфигурацию цепей поставок. В статье сформулированы особенности системы материально-технического снабжения холдинга «РЖД», заключающиеся в высокой степени централизации закупок и финансовых ресурсов на уровне ЦДЭС, а также высокой степени «бюрократизации» процесса закупочной деятельности ОАО «РЖД». Обозначены направления применения новых подходов и тенденций, характерных для современного этапа управления цепями поставок, в вертикально-интегрированном транспортном холдинге. **Практическая значимость:** Представляет собой возможность использования представленных авторами предложений в системе снабжения железнодорожных организаций на региональном уровне.

Ключевые слова: Управление цепями поставок, цепочка спроса, логистика распределения, материально-техническое снабжение, интернет-коммерция, рынок логистических услуг, маркетплейс.

Введение

Эволюция практической и научной деятельности в области логистики стала причиной возникновения новой концепции управления цепями поставок (SCM) во второй половине XX века. Основные принципы управления цепями поставок детально изучены в трудах как отечественных, так и зарубежных ученых, в частности в работах Дж. Стока и Д. Ламберта, У. Копаццо, а также Т. Джонса и Д. Райли [1, 2]. Содержание самого термина «управление цепями поставок»,

а также его сопоставление с термином «логистика» в рамках количества объектов управления раскрыты в работах Е. Ю. Китриш и Н. А. Журавлевой [3, 4]. Исходя из содержания рассмотренных определений можно заключить, что SCM является объективным этапом развития концепции интегрированной логистики.

Следует отметить, что идея интеграции независимых компаний в единую цепь взаимодействий для удовлетворения потребности конечного потребителя при минимизации затрат на этот процесс находит развитие во множестве публикаций. Так, в статье О. А. Третьяк отмечается различие между управлением цепочкой поставок и цепочкой спроса (далее — DCM) [5]. В частности, в управлении цепочкой спроса (DCM) цепь взаимосвязей в первую очередь должна быть ориентирована на потребителя. В обратном случае вся связь процессов и организация может оказаться без конечного адресата и не занять свою нишу на современном рынке.

Одновременно с развитием теории управления цепями поставок происходят структурные трансформации последних на практике, в связи с чем приобретает актуальность оценка возможностей применения новых идей на практике с учетом тенденций развития цепей поставок. В данной статье предпринята попытка оценить соответствие новым идеям и тенденциям системы управления снабжением холдинга «РЖД». Для этого необходимо, во-первых, провести анализ структуры рынка транспортно-логистических услуг и дать оценку ее изменения под влиянием появления новых бизнес-моделей и участников в сфере товародвижения с учетом развития теоретических подходов к управлению цепями поставок. Второй задачей является исследование специфики системы снабжения холдинга «РЖД» и определение возможностей для применения современных подходов к управлению цепями поставок, а также инновационных инструментов управления ресурсами и форм проявления рыночной власти активной компании.

Материалы и методы

В рамках достижения поставленной цели был сформулирован перечень задач, решение которых базировалось на применении следующих общенаучных методов исследования:

- для описания этапов развития теоретических подходов к управлению цепями поставок и выявления отличительных тенденций современного этапа развития процесса «управление цепями поставок» был проведен анализ и сравнение отечественных и зарубежных исследований в данной области;
- оценка структуры транспортно-логистических услуг в секторе онлайн-коммерции и ее изменения под влиянием появления новых бизнес-моделей и участников в сфере товародвижения выполнена с использованием методов общей теории статистики и экономического анализа;

– для выявления особенностей системы снабжения ОАО «РЖД» и определения возможностей применения в холдинге новых подходов к управлению цепями поставок был проведен анализ положений действующих нормативных актов, регламентирующих функции и процедуры взаимодействия в процессах закупочной деятельности ОАО «РЖД».

Результаты. Анализ основных подходов к определению SCM

В отечественной и зарубежной научной литературе имеются различные точки зрения касательно определения термина «управление цепями поставок». Так, Т. Джонс и Д. Райли [2] рассматривают управление цепями поставок как совокупность принципов, согласно которым деятельность каждой компании, входящей в цепь, оказывает прямое или косвенное влияние на работу остальных участников, а также на функционирование всей цепи в целом. Особенностью этого подхода является акцент на взаимозависимости компаний внутри цепи. У. Копаццо [1] определяет управление цепями поставок как процесс, направленный на объединение всех участников, задействованных в преобразовании сырья в готовую продукцию и ее доставке потребителям. При этом подчеркивается важность обеспечения своевременности и эффективности доставки в заданное место. Р. Монца, Р. Трент и Р. Хендфилд рассматривают эту концепцию через призму интеграции и управления ресурсами, потоками и контроля материалов. Особенностью данного подхода является внимание к оптимизации использования ресурсов и управлению потоками для повышения эффективности всей цепи поставок [3].

Хотя концепция управления цепями поставок (SCM) не имеет общепризнанного автора, большинство отечественных и зарубежных экспертов в области логистического менеджмента единодушно считают, что SCM представляет собой объективный этап эволюции идеи интегрированной логистики. Термин «управление цепями поставок» все чаще применяется для описания стратегических аспектов, тогда как термин «логистика» преимущественно связывается оперативными задачами. Иными словами, логистика включает в себя и представляет собой совокупность действий, таких как организация и контроль движения материальных и нематериальных потоков между точками производства и потребления с целью удовлетворения нужд конечного потребителя. В то же время она выступает как одна из функций цепи поставок, тогда как управление цепями поставок охватывает более широкий спектр функций, включая стратегическое руководство бизнес-процессами как внутри одной компании, так и между участниками [3].

Схожую точку зрения высказывает Н.А. Журавлева, утверждая, что «логистика SCM» представляет собой целостный подход к управлению потоками сырья и продукции от изготовителя до конечного пользователя. Этот подход охватывает весь цикл движения материалов от начального этапа производства до доставки

готовой продукции потребителям, а также включает обратные информационные потоки, которые обслуживают и фиксируют перемещение материалов [4]. Основные идеи, такие как интеграция процессов и организаций в единую цепь взаимодействий для удовлетворения потребности клиентов при минимизации затрат на этот процесс, пересекаются с другими экономическими концепциями, то есть управление цепями поставок представляет собой интеграцию различных экономических и логистических концепций, обусловленных определенным этапом ведения хозяйствования и научной деятельности с целью улучшения долгосрочной эффективности индивидуальных организаций и цепи поставок в целом.

Современный этап развития управления цепями поставок продиктован продвижением идеи клиентоориентированности бизнеса с учетом максимизации прибыли, представляя собой интеграцию управления цепочкой поставок и цепочкой спроса (DCM). Данное сочетание подходов иллюстрирует возможности интегрирования классического маркетинга и процессов объединения всех участников цепи преобразования сырьевых материалов в продукты для покупателя. Другими словами, происходит использование идей маркетинга для построения модели управления сбалансированным потоком товаров/услуг (ценностей), ориентированным на клиентов [5].

Анализ тенденций развития логистической составляющей рынка электронной коммерции

Одним из наиболее динамично развивающихся рынков в современном мире является рынок электронной коммерции. С каждым годом его объемы увеличиваются, что привлекает все больше новых пользователей. Высокие темпы роста заставляют владельцев бизнесов следовать за современными digital-тенденциями, чтобы не упустить возможность занять перспективную область рынка и не потерять потенциального потребителя. Рынок интернет-торговли по итогам 2023 г. достиг объема 7,9 млрд руб. с приростом к 2022 г. в размере 36 % [6]. Динамика объема интернет-торговли в России показана на рис. 1.

Исходя из исследования Data Insight, по итогам 2023 года по сравнению с предыдущим годом в России рост количества отправок заказов логистическими операторами на рынке онлайн-торговли вырос более чем на 81 % и составил 4640 млн шт., что показано на рис. 2 [6].

Средняя доля маркетплейсов на рынке логистики для интернет-торговли в 2023 году составила 74,5 %, что выше на 12,5 % по сравнению с 2022 годом. Wildberries и Ozon занимают ведущее положение на этом рынке со средними долями 35 и 31 % соответственно в 2023 году. Тенденция к снижению объемов доставок логистических компаний и собственных служб магазинов подтверждается с каждым годом (рис. 3) [6].



Рис. 1. Динамика объема интернет-торговли в России, млрд руб. (источник: составлено авторами по данным [6])

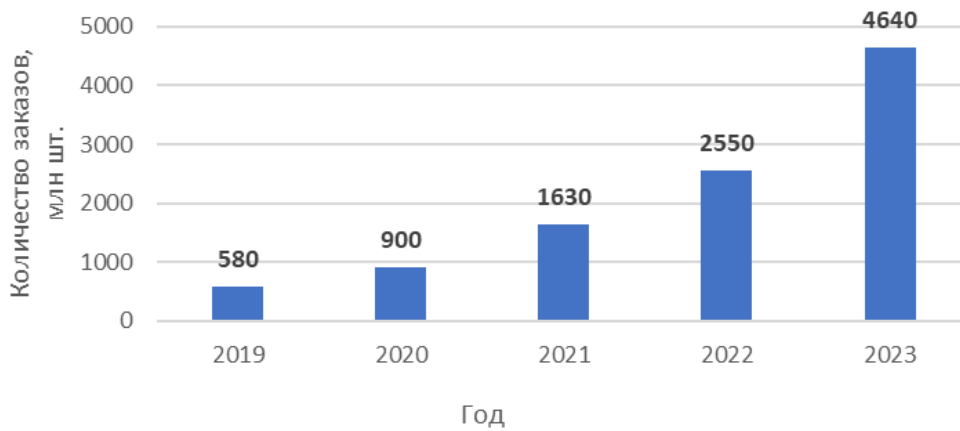


Рис. 2. Динамика заказов на рынке логистики для электронной торговли, млн руб. [6] (источник: составлено авторами по данным [6])

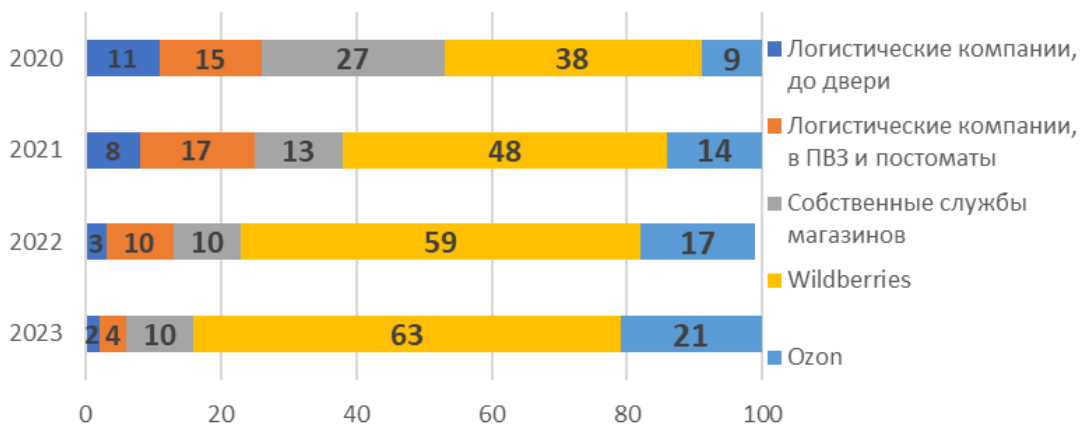


Рис. 3. Структура каналов доставки на рынке логистики для электронной торговли в России, % [6] (источник: составлено авторами по данным [6])

В текущих реалиях маркетплейсы набирают популярность среди покупателей, тем самым обозначая вектор развития современных подходов SCM и DCM. В соответствии с представленными тенденциями можно предположить основные направления развития логистической инфраструктуры современных участников цепочки поставок электронной коммерции:

– Дальнейшее активное развитие Wildberries и Ozon. Существующая тенденция значительно понижает возможность роста для других участников рынка, в том числе и для региональных. Это обусловлено тем, что эти маркетплейсы имеют собственную инфраструктуру для выполнения заказов в интернете, что ограничивает возможности остальных игроков рынка.

– Интеграция логистических операторов в широкую информационную экосистему бизнеса, в которой будут предоставляться не только традиционные услуги, но и дополнительные, которые расширят возможности получения дохода для продавцов и увеличат качество предоставляемой услуги для клиента (фулфилмент-услуги, финансовые, маркетинговые и информационные услуги).

– Появление новых участников рынка логистической инфраструктуры узкой специализации, в частности фулфилмент-операторов.

Современные цифровые технологии и логистические информационные системы активно используются для управления заказами, а также для планирования, организации, мониторинга и контроля процессов доставки товаров. При этом важно подчеркнуть, что предприятия, стремящиеся повысить свою конкурентоспособность на рынке транспортно-экспедиторских услуг, должны внедрять и эффективно использовать разнообразные системы электронного обмена данными в своей логистической деятельности [7, 8].

Организация системы закупок и участие «РЖД» в цепях поставок с участием маркетплейсов

Современные тенденции развития рынка электронной коммерции являются не только вызовом для логистических операторов, обслуживающих данный рынок, но и возможностью занять эту перспективную нишу. В задачи настоящего исследования входит определение возможности применения выявленных тенденций развития логистической инфраструктуры организациями железнодорожного транспорта. ОАО «РЖД» как одна из крупнейших транснациональных корпораций России, а также компаний, входящих в число лидеров по цифровизации, может использовать модели управления и логистические схемы, характерные для рынка электронной коммерции, с учетом отраслевой специфики и особенностей имеющейся системы снабжения.

Существующая система материально-технического снабжения ОАО «РЖД» разделена на 5 взаимосвязанных последовательных блоков:

- Планирование поставок МТР.
- Планирование закупок товаров, работ, услуг (ТРУ).
- Осуществление закупок.
- Договорная работа.
- Доставка МТР.

Закупки товарно-материальных ценностей (ТМЦ) подразделяются на региональные и централизованные. Проведя анализ внутренней нормативной документации, можно сделать вывод о высокой степени централизации финансовых ресурсов на уровне Центральной дирекции закупок и снабжения (ЦДЗС) в вопросах организации закупок. В 2024 году совокупность закупок, инициируемых и проводимых ЦДЗС, превысила 95 % от общей потребности филиалов холдинга, при этом значительная часть закупок на региональном уровне приходится на удовлетворение внутренних потребностей подразделений, территориально и функционально относящихся к территориальному филиалу Железной дороги [8].

Ими выполняется закупка продукции, поставка которой через ЦДЗС экономически нецелесообразна: канцелярские предметы, оргтехника для собственных нужд, предметы труда и т. д. Исходя из совокупного объема поставок 2023 г., можно сделать вывод о том, что на закупки МТР для собственных нужд подразделений пришлось порядка 2,1 млрд руб. С учетом фактического объема и специфики структуры закупаемых МТР ОАО «РЖД» экономически обоснованно и целесообразно применение современных торговых площадок для снижения совокупных расходов компании, поскольку это является основной задачей системы снабжения ОАО «РЖД».

При использовании маркетплейсов процесс избрания контрагента станет более гибким, дифференциация предлагаемых товаров по различным критериям, в том числе по стоимостному, может принести существенную экономию затрат. Также подобная схема закупки будет являться инструментом поддержки малого и среднего бизнеса, что в условиях политической и экономической турбулентности на фоне санкционного давления представляет собой особую важность для населения страны.

Осуществление закупочной деятельности в ОАО «РЖД» осуществляется в соответствии с ФЗ «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц». Отношения между участниками процесса МТС контролируются нормативно-правовыми документами (регламентами, приказами и инструкциями) холдинга «РЖД».

Процесс приобретения товарно-материальных ценностей является довольно сложным и включает в себя участие нескольких уровней управления. Его реализация осуществляется следующим образом. После согласования перечня

закупок в ЦДЗС составляется и утверждается единый реестр и план закупок холдинга «РЖД».

Основой для формирования плана закупок являются прогнозные или утвержденные бюджетные параметры и производственные, инвестиционные программы подразделений. Подразделения центрального уровня отправляют заявки на организацию и проведение закупочной деятельности в ЦДЗС, если они выступают организатором закупки. ДМС и подразделения «РЖД» формируют заявки на закупку ТРУ регионального уровня. Рассмотрением заявок подразделений занимается РЦОЗ, в свою очередь, заявки ДМС рассматриваются управлением маркетинга и ценообразования ЦДЗС. Полученные заявки утверждают конкурсные комиссии ОАО «РЖД» и центральных подразделений компании, на основании чего происходит подготовка документации, на уровнях:

РЦОЗ для региональных закупок подразделений;

ДМС для региональных и централизованных поставок;

ЦДЗС для централизованных поставок и размещение ее на информационных ресурсах.

В зависимости от характера закупки, в том числе ее назначения, суммы, конечного получателя, проведения конкурсного процесса, характера организаций, процесс закупки может кардинально отличаться. Помимо обязательных требований федеральных законов к проведению аукциона к его участнику выставляются дополнительные требования [9].

После сбора всех заявок потенциальными контрагентами и окончания срока проведения аукциона (которые также следуют строгому регламенту) проводится вскрытие, рассмотрение и выбор контрагента с обязательным формированием протоколов вскрытия, анализ и подведение итогов.

Затем происходит заключение договоров на уровне ДМС, ЦДЗС, региональных и центральных подразделений ОАО «РЖД» и их регистрация в системе на региональном и центральном уровнях. После определения и утверждения поставщиков на центральном и региональном уровнях ЦДЗС и ДМС формируют итоговые транспортные задания организациям, занимающимся поставками МТР.

Сложность процесса закупок и снабжения, наличие множества уровней управления и утверждения, с одной стороны, ограничивают участие холдинга в использовании возможностей маркетплейсов. С другой стороны, значительные масштабы закупок и разнообразие номенклатурных позиций, территориальная разобщенность подразделений компании создают условия для внедрения внутренней системы обеспечения, основанной на принципах маркетплейса. Это предполагает использование специализированных цифровых платформ и передачу функций по доставке и складированию на аутсорсинг.

Заключение

На основе проведенного исследования выявлены ключевые тенденции и перспективные подходы к управлению цепями поставок, которые могут быть применены для совершенствования системы снабжения материально-техническими ресурсами ОАО «РЖД». Установлено, что современные подходы в управлении цепями поставок смещают акцент на клиентоориентированность, интеграцию цепей поставок и спроса (SCM и DCM), а также на цифровизацию процессов.

Рассмотрена специфика системы снабжения ОАО «РЖД», которая характеризуется высокой степенью централизации закупок, бюрократизацией процессов и использованием устаревших подходов к выбору поставщиков. Проведен анализ логистической составляющей рынка электронной коммерции, который показал высокую динамику роста объемов рынка, усиление роли маркетплейсов и интеграцию современных технологий в цепи поставок.

На основании анализа предложены направления оптимизации системы снабжения ОАО «РЖД», включая:

- внедрение цифровых технологий и логистических схем маркетплейса в процессы закупок;
- сокращение этапов согласования заявок и упрощение требований к контрагентам;
- расширение возможностей для региональных подразделений в управлении закупками.

Применение указанных подходов позволит не только снизить затраты на закупки, но и повысить эффективность всей системы снабжения, а также интегрировать ОАО «РЖД» в цифровую экосистему современной логистики.

Список источников

1. Copacino W. C. Supply chain management: the basics and beyond / W. C. Copacino // APICS Series on Resource Management, 1997. — Boca Raton: St. Lucie Press. — P. 160.
2. Jones T. C. Using inventory for competitive advantage through supply chain management / T. C. Jones, D. W. Riley // International Journal of Physical Distribution and Materials Management. — 1985. — Vol. 15. — Iss. 5. — Pp. 16–26.
3. Китриш Е. Ю. Управление цепями поставок: теоретические аспекты / Е. Ю. Китриш // Восточно-Европейский научный журнал. — 2021. — № 1-4(65). — С. 8–15.
4. Журавлева Н. А. Методология исследования управления цепями поставок / Н. А. Журавлева, В. М. Шавшуков. — М.: Магистраль, 2023. — 127 с.
5. Третьяк О. А. Развитие концепции управления цепочкой спроса на новых основаниях / О. А. Третьяк // Российский журнал менеджмента. — 2008. — Т. 6. — № 4. — С. 141–148.
6. Маркетинговое исследование рынка интернет-торговли 2022 // DataInsight. — URL: https://datainsight.ru/eCommerce_2022 (дата обращения: 16.11.2024).
7. Маркетинговое исследование рынка интернет-торговли 2022 // DataInsight. — URL: https://datainsight.ru/eCommerce_2022 (дата обращения: 16.11.2024).

8. Дмитриев А. В. Цифровые технологии в транспортной логистике / А. В. Дмитриев // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. — 2017. — № 4. — С. 14–18.

9. Распоряжение ОАО «РЖД» от 18 апреля 2023 года № 963/р «Об утверждении Регламента организации закупок и снабжения в ОАО «РЖД»» (вместе с Регламентом). — URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения: 16.11.2024).

Дата поступления: 20.01.2025

Решение о публикации: 31.01.2025

Контактная информация:

ВОЛКОВА Елена Михайловна — д-р экон. наук, доц.; moonlight34@yandex.ru

ЛЯКИНА Мария Анатольевна — канд. экон. наук, доц.; malyakina@mail.ru

РАХИМОВ Олег Олегович — аспирант; olegairo2@yandex.ru

The Distribution Logistics Trends, Their Identification, Development and Application in the “Russian Railways” Holding Company

E. M. Volkova, M. A. Lyakina, O. O. Rahimov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Volkova E. M., Lyakina M. A., Rakhimov O. O. The Distribution Logistics Trends, Their Identification, Development and Application in the “Russian Railways” Holding Company. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 228–238. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-228-238

Summary

Purpose: To analyze theory and practices of the supply chain management trends and assess their potential implementation to enhance the supply system of JSC “Russian Railways”. **Methods:** To accomplish the stated objective, general scientific methods are employed such as comparative analysis, generalization, and the systematization of research data obtained from both domestic and international experts. **Results:** Modern supply chain management features have been revealed, such as shifting emphasis from SCM to DCM, building the configuration and operation of supply chains and maximizing the end customer value, developing integrated planning and management using SRM-systems and applying digital management tools in transport and logistics business. The conducted analysis of the logistics component structure of the e-commerce market has shown increased marketplace share and their growing impact on the behavior of other participants in the field of goods movement, the warehouse infrastructure status and location, and the supply chain configuration. This paper highlights the logistics system features of the “Russian Railways” holding emphasizing the significant centralization of material and equipment procurement system and financial resources within the Central Supply Chain Management System, as well as the pronounced “bureaucratization” inherent in the company’s procurement procedures. It also identifies potential avenues for implementing innovative approaches and trends typical of contemporary supply chain management practices within a vertically integrated transport holding. **Practical significance:** The recommendations proposed by the authors have a good potential of being implemented in the materials and equipment procurement system in regional railway transport organizations.

Keywords: Supply chain management, demand chain, distribution logistics, materials and equipment supply, e-commerce, logistics services market, marketplace.

References

1. Copacino W. C. Supply chain management: the basics and beyond. APICS Series on Resource Management, 1997. Boca Raton: St. Lucie Press Publ., p. 160.
2. Jones T. C., Riley D. W. Using inventory for competitive advantage through supply chain management. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, 1985, vol. 15, Iss. 5, pp. 16–26.
3. Kitrish E. Yu. Upravlenie tsepyami postavok: teoreticheskie aspekty [Supply chain management: theoretical aspects]. *Vostochno-Evropeyskiy nauchnyy zhurnal* [East European Scientific Journal]. 2021, Iss. 1-4(65), pp. 8–15. (In Russian)
4. Zhuravleva N. A., Shavshukov V. M. *Metodologiya issledovaniya upravleniya tsepyami postavok* [Methodology for studying supply chain management]. Moscow: Magistr' Publ., 2023, 127 p. (In Russian)
5. Tret'yak O. A. Razvitie kontseptsii upravleniya tsepkoy sprosa na novykh osnovaniyakh [Development of the concept of demand chain management on new grounds]. *Rossiyskiy zhurnal menedzhmenta* [Russian Journal of Management]. 2008, vol. 6, Iss. 4, pp. 141–148. (In Russian)
6. *Marketingovoe issledovanie rynka internet-torgovli 2022. DataInsight* [Marketing research of the e-commerce market 2022. DataInsight]. Available at: https://datainsight.ru/eCommerce_2022 (accessed: November 16, 2024). (In Russian)
7. *Marketingovoe issledovanie rynka internet-torgovli 2022. DataInsight* [Marketing research of the e-commerce market 2022. DataInsight]. Available at: https://datainsight.ru/eCommerce_2022 (accessed: November 16, 2024). (In Russian)
8. Dmitriev A. V. Tsifrovye tekhnologii v transportnoy logistike [Digital technologies in transport logistics]. *RISK: Resursy, Informatsiya, Snabzhenie, Konkurentsia* [RISK: Resources, Information, Supply, Competition]. 2017, Iss. 4, pp. 14–18. (In Russian)
9. *Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 18 aprelya 2023 goda № 963/r "Ob utverzhenii Reglamenta organizatsii zakupok i snabzheniya v OAO "RZhD" (vmeste s Reglamentom)* [Order of JSC Russian Railways dated April 18, 2023 № 963/r "On approval of the Regulations for the organization of procurement and supply at JSC Russian Railways" (together with the Regulations)]. Available at: <https://www.consultant.ru/> (accessed: November 16, 2024). (In Russian)

Received: January 20, 2025

Accepted: January 31, 2025

Author's information:

Elena M. VOLKOVA — Dr. Sci. in Economics, Associate Professor; moonlight34@yandex.ru

Maria A. LYAKINA — PhD in Economics, Associate Professor; malyakina@mail.ru

Oleg O. RAHIMOV — Postgraduate Student; olegairo2@yandex.ru