

БЮЛЛЕТЕНЬ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ВЫПУСК 4 2025

BULLETIN OF SCIENTIFIC RESEARCH RESULTS

ISSUE 4 2025

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. Liutomskaia

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 Н 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; OS Mac OS, Windows (XP, Vista, 7); видеосистема: встроенная; дополнительное ПО: Adobe Reader версия от 7.Х или аналог. Защита от незаконного распространения: реализуется встроенными средствами Adobe Acrobat

Подписано в печать 15.12.2025.

Формат 60×84/8. Уч.-изд. л. 265

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, Словакская Республика
Milos Polak, Ing. PhD, Professor, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

Стыскала Вitezслав, профессор, Остравский технический университет, Острава, Чешская Республика
Vitezslav Styksala, 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, School of the School of Locomotives and Rolling Stock, Zhengzhou, China

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

Бляжко Людмила Сергеевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Ljudmila 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
Eugenij 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

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

Лапидус 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 Racheck, D. Econ. Sci., Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

Титова Тамила Семеновна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Tamila 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 экспертиза 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

П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров	Разработка и верификация пространственной динамической модели рессорного подвешивания маневрового локомотива ТЭМ2	7
Г. И. Никифорова	Исследование стоимостиостояния вагонов при взаимодействии железнодорожного и морского видов транспорта	20
А. В. Агунов, А. В. Щербань, Д. Д. Архипов	Обоснование актуальности защиты контактной сети наземного городского электрического транспорта от малых токов короткого замыкания	28
М. В. Шевлюгин, М. Р. Ради	Интеграция распределенной газотурбинной генерации в систему электроснабжения города Тартуса (CAP): надежность и технико-экономическая эффективность	37
Д. П. Кононов, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко	Современные технологические процессы сварки и их эффективность при изготовлении кузовов высокоскоростного транспорта	51
В. А. Бараусов	Автоматизированный метод определения обледенения контактного провода на основе контроля фазового перехода воды	64
Д. А. Басовский, Н. М. Панченко, О. В. Востриков	Особенности эксплуатации трамвайных стрелок различной конструкции	78
Ю. В. Бабков, К. С. Перфильев, С. Н. Журавлев, И. А. Уколов,	Регулятор тягового усилия локомотива на основе алгоритма с нечеткой логикой	87
Е. П. Дудкин, Я. С. Хомяков, А. А. Зайцев	Разработка и обоснование математической модели исследования колебаний трамвая	100
Е. А. Коченов, Д. Г. Евсеев	Разработка теоретико-математической модели для оптимизации распределения тормозного усилия грузовых вагонов при неоднородном износе тормозных колодок в условиях потенциального торможения	117
И. И. Лапсарь, А. Е. Цаплин	Организация эксплуатации электропоездов метрополитена «НеВа» с учетом возможности импортозамещения системы управления	127

Д. С. Ломакина, А. В. Новицхин	Методика взаимодействия припортовых станций и портов	135
Д. А. Басовский, О. В. Востриков, А. А. Костенко	Анализ влияния протяженности участка между остановочными пунктами и временных задержек на расчетную скорость движения подвижного состава скоростного трамвая	148

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Ю. И. Макаров, А. Г. Нуриев, Я. А. Гренадер, А. Н. Федорова	Оптимизация метрологического обслуживания динамических вагонных весов	157
В. П. Бирюков, А. Н. Миряха, А. А. Якубовский, Я. А. Горюнов, О. И. Кулаков	Влияние лазерной закалки на металлографические и триботехнические характеристики стали 55 распределительного вала дизеля тепловоза	167

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

М. Ю. Агеев, Л. М. Чеченова,	Рациональные решения по вопросам организации контейнерных перевозок	178
В. С. Меркушева, Е. А. Перков	Стратегия развития предприятия в долгосрочном периоде в условиях санкций	193
Е. С. Бут	Оценка применения глобальных подходов к развитию городской мобильности в транспортной политике Санкт-Петербурга	201

Contents

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

P. S. Grigorev, N. S. Kodirov	Development and Validation of a Spring Suspension Spatial Dynamic Model for the TEM2 Shunting Locomotive	18
G. I. Nikiforova	Research into the Financial Implications of Idle Railway Wagons in the context of Railway and Marine Transport Interaction	26
A. V. Agunov, A. V. Shcherban, D. D. Arkhipov	Justification for Protecting the Overhead Contact System of Urban Land Electric Transport from Low Short-Circuit Currents	35
M. V. Shevlyugin, M. R. Radi	Integration of Distributed Gas-Turbine Generation into the Power Supply System of Tartus (Syrian Arab Republic): Reliability and Techno-Economic Efficiency	48
D. P. Kononov, A. M. Budyukin, V. G. Kondratenko	Contemporary Welding Processes and Their Efficiency in the Manufacturing of High-Speed Railway Car Bodies	61
V. A. Barausov	An Automated Method for Detecting the Icing of a Contact Wire Based on Thermophysical Phase Transition Control	75
D. A. Basovsky, N. M. Panchenko, O. V. Vostrikov	Specifics of Operating Tram Switches of Different Designs	85
Yu. V. Babkov, K. S. Perfilyev, S. N. Zhuravlev, I. A. Ukolov	Controlling the Locomotive Traction Effort Using Fuzzy Logic Algorithm	98
E. P. Dudkin, Ya. S. Khomyakov, A. A. Zaitsev	Development and Justification of a Mathematical Model for Tram Vibration Analysis	114
E. A. Kochenov, D. G. Evseev	A Mathematical Model for Optimized Brake Force Distribution in Freight Wagons with Non-Uniform Brake Shoe Wear in the Bogie-Wise Brake System	124
I. I. Lapsar, A. E. Tsaplin	Management of the «NeVa» Metro Train Operation, with the Potential of Import Substitution of the Control System	133

D. S. Lomakina, A. V. Novichikhin	Methodology for Interaction in the “Railway Station – Port” System	146
--------------------------------------	---	-----

D. A. Basovskiy, O. V. Vostrikov, A. A. Kostenko	The Influence of the Inter-Station Section Length and Time Delays on the Tram Design Speed	155
--	---	-----

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

Yu. I. Makarov, A. G. Nuriev, Ya. A. Grenader, A. N. Fedorova	Optimization of Metrological Maintenance of Dynamic Wagon Scales	165
--	---	-----

V. P. Biryukov, A. N. Miryakha, A. A. Yakubovsky, Ya. A. Goryunov, O. I. Kulakov	The Influence of Laser Hardening on the Metallographic and Tribotechnical Properties of Class 55 Steel Used in Diesel Locomotive Camshafts	175
--	--	-----

GOVERNANCE AND ECONOMICS

M. Yu. Ageev, L. M. Chechenova	Efficient Solutions for Containerized Freight Transportation Management	190
-----------------------------------	--	-----

V. S. Merkusheva, E. A. Perkov	A Long-Term Strategy for Company Development Under Sanctions	199
-----------------------------------	---	-----

E. S. But	Assessing Global Approaches to Urban Mobility Development in the Context of Saint Petersburg’s Transport Policy	210
-----------	---	-----

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.4.027.4

Разработка и верификация пространственной динамической модели рессорного подвешивания маневрового локомотива ТЭМ2

П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров

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

Для цитирования: Григорьев П. С., Кодиров Н. С. Разработка и верификация пространственной динамической модели рессорного подвешивания маневрового локомотива ТЭМ2 // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 7–19. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-7-19

Аннотация

Цель: Исследование посвящено построению и численной верификации пространственной модели рессорного подвешивания маневрового локомотива ТЭМ2, реализованной в программном комплексе «Универсальный механизм». На фоне износа подвижного состава, эксплуатируемого сверх нормативного срока службы, возрастает значимость точных инженерных методов оценки динамической нагруженности. **Методы:** В работе представлено моделирование взаимодействия тележки и кузова локомотива при прохождении искусственно сгенерированных неровностей пути, сопровождаемое сравнительным анализом с экспериментальными данными. **Результаты:** Оценка динамических параметров, таких как деформации концевых пружин, коэффициенты вертикальной динамики и рамные силы, продемонстрировала отклонения, не превышающие 15 %, что подтверждает адекватность разработанной модели. Отмечено, что наиболее точные совпадения зафиксированы в диапазоне скоростей 60–80 км/ч. **Практическая значимость:** Результаты могут быть использованы как основа при дальнейшем расчете остаточного ресурса, а также при уточнении методик для оценок динамических характеристик.

Ключевые слова: Маневровый локомотив ТЭМ2, пространственная динамическая модель, рессорное подвешивание, коэффициент вертикальной динамики, рамные силы, «Универсальный механизм», моделирование экипажной части, демпфирующие характеристики, численная верификация.

Введение

Маневровые локомотивы играют ключевую роль в обеспечении бесперебойной работы сортировочных станций и промышленных предприятий, формируя основу маневровых операций и внутризаводской логистики [1]. В транспортной системе Республики Узбекистан значительная доля парка тепловозов, включая серию ТЭМ2, продолжает эксплуатироваться за пределами нормативного срока службы, что приводит к повышенной частоте отказов и росту затрат на техническое обслуживание [2]. Под действием неравномерных нагрузок, вызванных неровностями пути, геометрическими отклонениями рельсовой

колеи и особенностями эксплуатационных режимов, в элементах несущей структуры возникают напряжения, способствующие развитию усталостных повреждений [3].

При отсутствии должных диагностических инструментов и строгой количественной оценки остаточного ресурса прогнозирование срока службы становится неточным. В связи с этим возрастаёт потребность в создании пространственных моделей, способных учитывать взаимодействие многотелых компонентов экипажа и воспроизводить трехмерную кинематику системы с учетом ее демпфирующих и инерционных свойств [4–9]. Такие модели позволяют оценить влияние вертикальных, поперечных и продольных нагрузок на состояние несущих конструктивных узлов. Однако, как показывает анализ литературы, до настоящего времени отсутствуют верифицированные трехмерные модели, адаптированные под условия работы маневровых локомотивов. Это ограничивает как точность инженерных расчетов, так и возможность адаптации существующих нормативов к реальным эксплуатационным условиям.

Интересно, что программные комплексы, применяемые для целей многостороннего моделирования, включают в себя как зарубежные продукты (SIMPACK, ADAMS/Rail), так и отечественные решения, среди которых особое место занимает «Универсальный механизм» (УМ). Последний демонстрирует высокую степень приспособленности к задачам, связанным с анализом динамики подвижного состава в условиях эксплуатации на железных дорогах. Адаптивная параметризация, поддержка метода подсистем и возможность включения контактных взаимодействий делают УМ эффективным инструментом для моделирования сложных механических систем [10]. Таким образом, ограниченное число работ, описывающих пространственное моделирование маневровых локомотивов с последующей численной верификацией, определяет актуальность и практическую значимость настоящего исследования.

Целью настоящей работы является построение и численная верификация пространственной динамической модели маневрового локомотива ТЭМ2 на основе программного комплекса «Универсальный механизм» с последующим анализом его динамических характеристик в условиях реальных эксплуатационных воздействий.

Для реализации цели были поставлены следующие задачи:

- построить параметризованную модель экипажа ТЭМ2 с учетом жесткостно-демпфирующих характеристик и трения;
- выполнить численное решение уравнений движения, полученных из построенной модели;
- выполнить верификацию модели по данным деформаций упругих элементов, коэффициента динамики и рамных сил;
- оценить точность модели и возможность ее дальнейшего применения.

Методы и материалы

Объектом исследования выбран маневровый тепловоз ТЭМ2, широко эксплуатируемый на сети железных дорог Республики Узбекистан. Одним из ключевых параметров, отражающих динамическую нагруженность рессорного подвешивания, выступает амплитуда деформации пружины, чувствительная к изменению коэффициентов трения и особенностям контактных взаимодействий экипажных элементов. Следует отметить, что данный параметр обладает высокой корреляцией с величиной передаваемых вертикальных и поперечных нагрузок.

В связи с этим для численного моделирования динамики системы использован программный комплекс «Универсальный механизм» (УМ) [11, 12], обладающий развитым инструментарием построения пространственных моделей железнодорожного подвижного состава. В качестве основной среды реализации принят модуль UM Loco, предназначенный для расчета движения экипажа при воздействии переменных во времени нагрузок. Данный модуль позволяет создавать параметризованные многостепенные модели, в которых инерционные, геометрические и визуализированные элементы задаются в виде идентификаторов и выражений, связующих между собой реальные характеристики узлов конструкции локомотива.

При выполнении моделирования учитывались силовые элементы, описываемые параметрами жесткости, демпфирования и трения, подбираемыми с опорой на реальные эксплуатационные режимы. Особое внимание уделялось корректному описанию граничных условий взаимодействия между кузовом, тележками, буксами и колесно-моторными блоками.

Разработка конструкции модели в среде УМ основана на логике соединения твердых или упругих тел посредством шарниров, ограничителей и силовых элементов. Для повышения структурной прозрачности и упрощения построения модели был реализован метод подсистем, при котором каждый крупный компонент (например, кузов, тележка, колесная пара) моделируется отдельно, а затем объединяется в единую динамическую схему через силовые и кинематические связи. Эти структурные подсистемы впоследствии интегрируются в единую систему через жесткие и податливые связи. Рис. 1 демонстрирует схему взаимодействия всех подсистем в компьютерной модели маневрового локомотива ТЭМ2. В табл. 1 приведены основные физические характеристики модели локомотива ТЭМ2.

Модель тележки локомотива ТЭМ2 была построена с точным воспроизведением геометрии и кинематических зависимостей, присущих реальной конструкции рессорного подвешивания. Для повышения точности сопоставления с результатами экспериментальных испытаний, представленными в источнике [13], была сформирована отдельная подсистема, отражающая поведение рамы тележки. При этом использована унифицированная тележка, идентичная исследуемому объекту по конструкции подвески и структуре контактных связей.

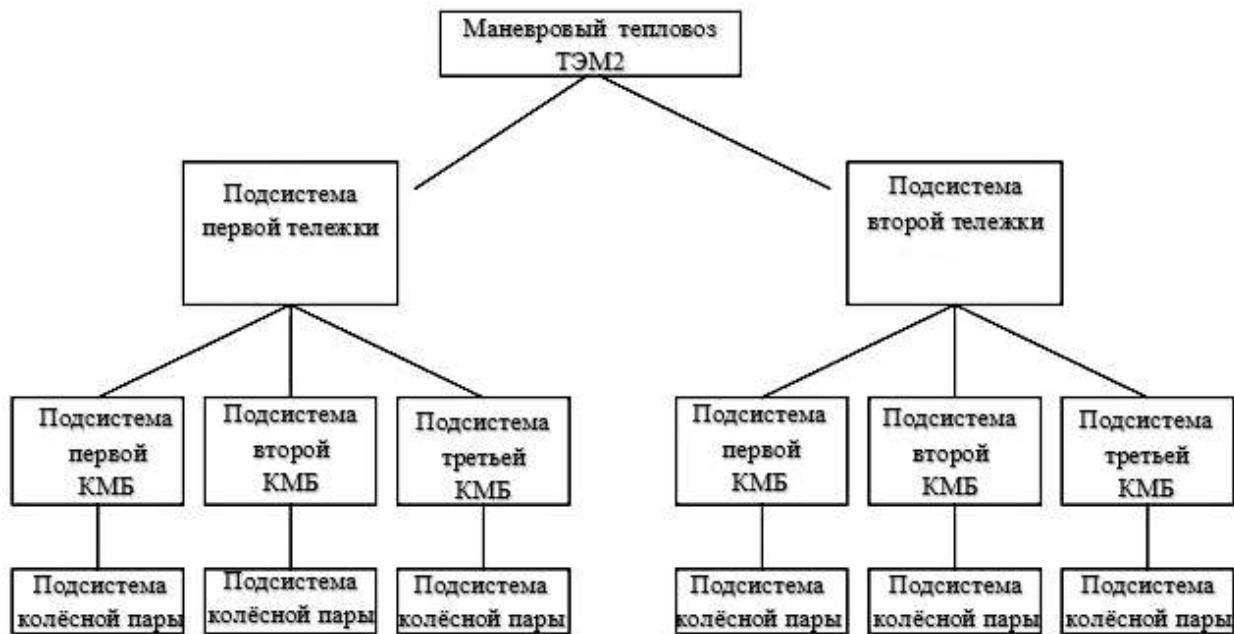


Рис. 1. Структура подсистем в программном комплексе «Универсальный механизм»

ТАБЛИЦА 1. Массовые и инерционные параметры модели маневрового локомотива ТЭМ2

Параметр	Значение	Единица измерения
Масса кузова	72,864	т
Масса тележки	6,259	т
Масса колесной пары	1,345	т
Масса тягового электродвигателя (ТЭД)	3100	кг
Масса рессоры	123	кг
Момент инерции кузова вокруг оси Z	1 050 000	кг м ²
Момент инерции кузова вокруг оси X	73 000	кг м ²
Момент инерции кузова вокруг оси Y	1 100 000	кг м ²

После завершения этапа геометрического и физического построения вся механическая модель локомотива представлена в виде системы из 71 абсолютно твердого тела, включая кузов, рамы тележек, элементы подвески, буксы, балансиры, колесные пары, тяговые электродвигатели и сопряженные с ними подвески (рис. 2). В результате такой дискретизации удалось получить динамическую модель с 182 степенями свободы, отражающими движение всех ключевых компонентов конструкции в пространстве.

В построенной в программной среде «Универсальный механизм» модели тележки маневрового тепловоза ТЭМ2 силовое поведение элементов рессорного подвешивания моделировалось на основе линейных соотношений классической теории упругости. Такой подход позволил сформировать функциональную модель взаимодействия, адекватно отражающую поведение системы в пределах допускаемых эксплуатаций деформаций.

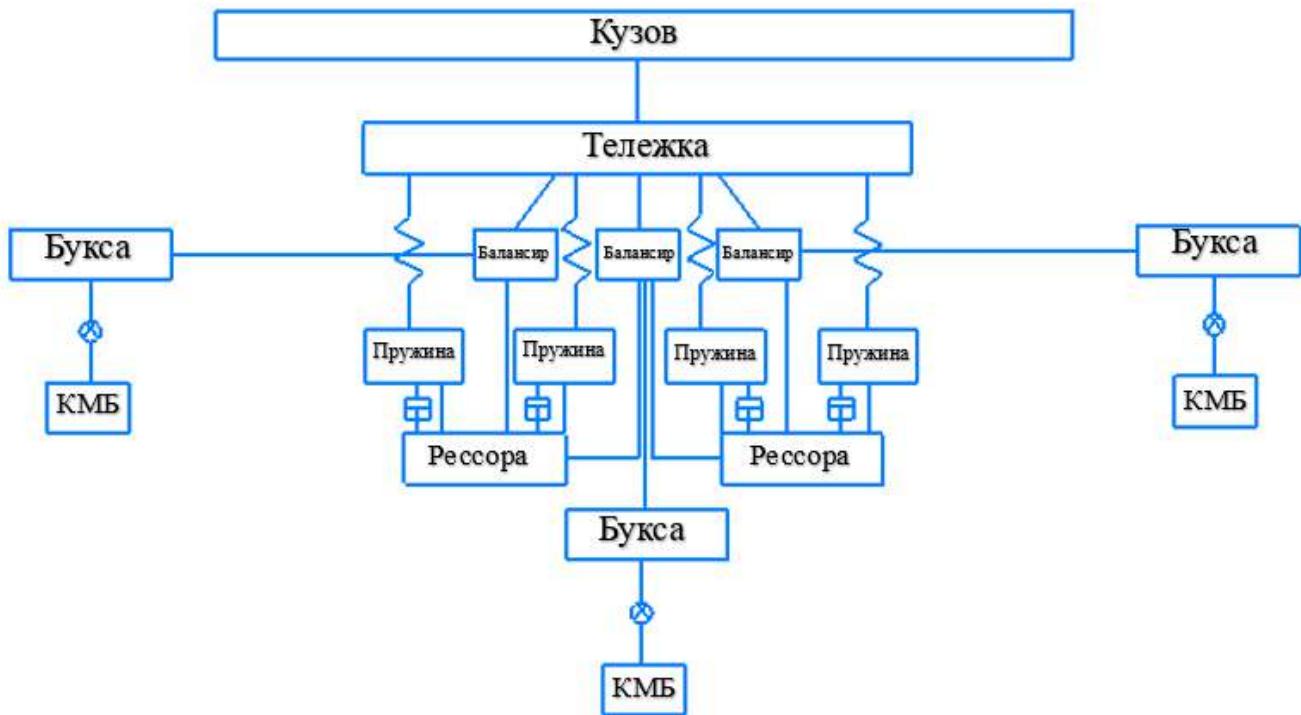


Рис. 2. Структура пространственной механической модели локомотива ТЭМ2

ТАБЛИЦА 2. Условные обозначения элементов в структуре модели локомотива ТЭМ2

Обозначение	Описание элемента
	абсолютно твердое тело
	жесткое закрепление тел
	линейный (билинейный) силовой элемент
	вращательный шарнир
	биполярный силовой элемент

Следует отметить, что полученная линейная аппроксимация обеспечивает воспроизведение упругой характеристики с достаточной точностью, по крайней мере в пределах первичной рабочей области. Это критически важно для корректного моделирования динамических процессов, особенно в условиях циклических нагрузений и переменной кинематики при взаимодействии тележки с кузовом.

При расчетах использовано выражение для силы:

$$f = F_0 - c(x - x_0) - dv + Q \sin(\omega t + \alpha), \quad (1)$$

где F_0 — постоянная составляющая силы;
 c, d — коэффициенты жесткости и диссипации;
 x_0 — координата равновесного положения;
 Q, ω, α — амплитуда, частота и начальная фаза гармонического возбуждения.



Рис. 3. а — унифицированная тележка маневрового локомотива;
б — построенная модель тележки в среде «Универсальный механизм»:
1 — рама тележки; 2 — балансир; 3 — цилиндрическая пружина; 4 — лист рессоры; 5 — букса; 6 — колесная пара; 7 — тяговый электродвигатель; 8 — подвеска ТЭД; 9 — вспомогательная пружина



Рис. 4. Схема соединения элементов рессорного подвешивания
в программной среде «Универсальный механизм»

Конструктивно рессорное подвешивание ТЭМ2 реализовано в виде комбинированной схемы, в которой пружина с жесткостью C_1 соединена последовательно с параллельной ветвью,ключающей вторую пружину C_2 и трение, сформированный набором листов рессоры. Иллюстративное отображение данной структуры представлено на рис. 4.

Значение деформации Δx определяется из условия равенства силы в пружине C_1 , в параллельном соединении пружины C_2 и трения:

$$f = f_1 = f_2 + F_{fr}. \quad (2)$$

Из данного выражения выведена формула для определения результирующей деформации системы:

$$\Delta x = x_1 - x_2; \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{c_1 \Delta x}{c_1 + c_2(1 \pm \mu)}, \quad (4)$$

где x_1, x_2 — деформации пружин,
 C_1 и C_2 — жесткости пружин,
 f — усилия в пружинах,
 μ — коэффициент трения скольжения,
 F_{fr} — сила трения, зависящая от режима контакта (скольжение или сцепление). Переход от сцепления к скольжению в среде Universal Mechanism реализуется в соответствии с законом Кулона при выполнении следующего условия:

$$|F_{fr}| = |f_1 - c_2 x_2| > \mu_0 |c_2 x_2|. \quad (5)$$

где μ_0 — коэффициент трения покоя [11, 13].

Таким образом, данный подход позволяет точнее отразить реальные физические процессы, происходящие в подвеске при различных режимах нагружения, и обеспечивает адекватное описание демпфирующих свойств системы.

В работе использован метод символьного синтеза уравнений динамики, реализованный в программной среде Universal Mechanism. Данный подход позволил существенно сократить вычислительные затраты благодаря оптимизации символьных выражений. Важным преимуществом является поддержка как нелинейных, так и линеаризованных форм уравнений, что значительно расширяет возможности моделирования.

Для получения уравнений движения применен подход Ньютона — Эйлера. Численное интегрирование осуществлялось с использованием следующих методов:

- метод Адамса — Башфорта — Моултона;
- метод Рунге — Кутты;
- формулы обратного дифференцирования;
- схема Гира.

ТАБЛИЦА 3. Упругие и демпфирующие характеристики элементов модели ТЭМ2

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Вертикальная жесткость основной пружины	c_1	990	кН/м
Вертикальная жесткость вспомогательной пружины	c_2	990	кН/м
Жесткость рессоры	—	1880	кН/м
Коэффициент трения скольжения	μ	0,032	—
Коэффициент трения покоя	μ_0	0,0384	—

При моделировании жестких задач, включая контактные взаимодействия, был применен метод Парка с автоматическим построением матриц Якоби. Такой подход обеспечил высокую устойчивость вычислений при резких динамических переходах, что особенно важно при решении сложных инженерных задач.

Результаты

В качестве экспериментальной базы для верификации модели использованы данные динамических испытаний локомотива 2ТЭ10Л, приведенные в техническом отчете [10]. Несмотря на различие в серии и назначении локомотивов, необходимо отметить, что конструкция тележек 2ТЭ10Л и ТЭМ2 идентична по геометрии рессорного подвешивания, компоновке основных узлов и типу упругих элементов. Это обеспечивает допустимость использования результатов испытаний 2ТЭ10Л для ориентировочной верификации модели, разработанной для ТЭМ2, особенно в части оценки амплитудных деформаций, коэффициента вертикальной динамики и рамных сил. Ниже приведены графические (рис. 5–7) и табличные материалы (табл. 4–6), иллюстрирующие соответствие расчетных и экспериментальных данных.

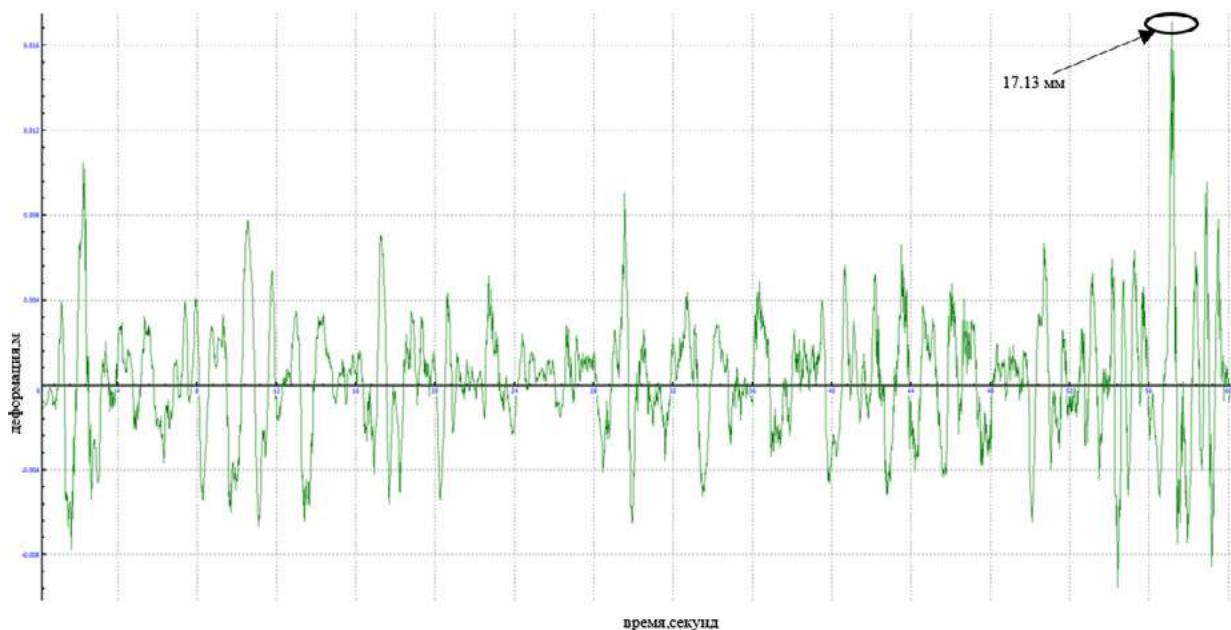


Рис. 5. Деформации концевых пружин при прохождении расчетной неровности пути по ПНСТ 511—2020 (60 км/ч)

ТАБЛИЦА 4. Сравнение деформаций пружин по эксперименту и численному моделированию

Скорость, км/ч	Эксперимент [8], мм	Моделирование (УМ), мм
60	6–18	17
70	7–16	19
80	10–21	20

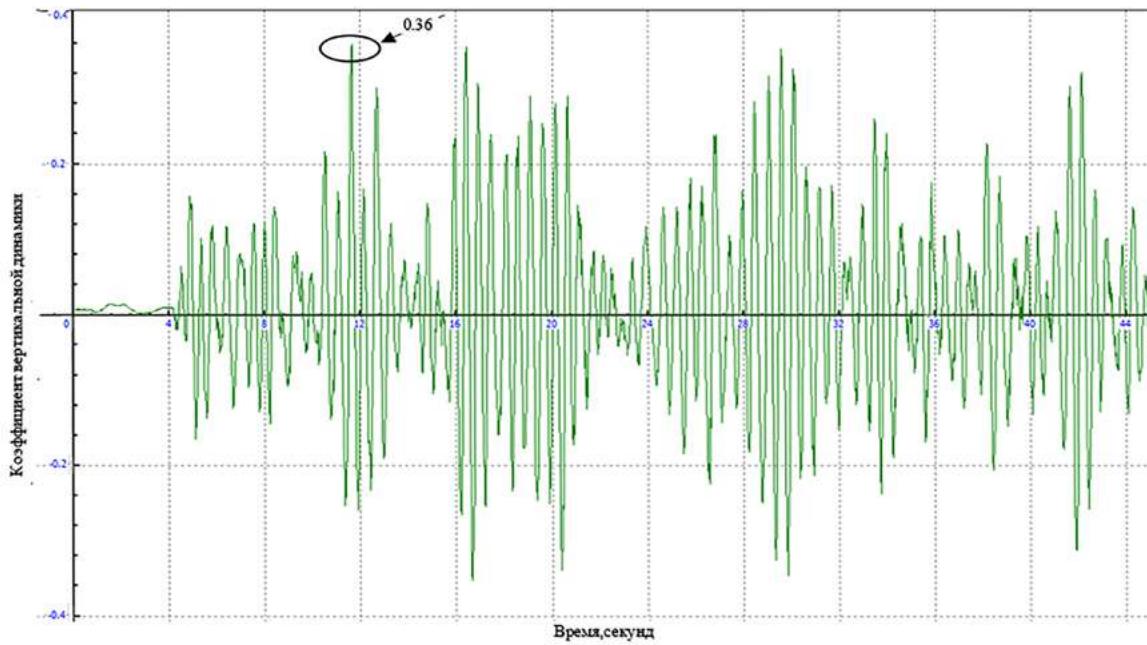


Рис. 6. Коэффициент вертикальной динамики при движении по расчетной неровности по ПНСТ 511—2020 (60 км/ч)

ТАБЛИЦА 5. Сравнение коэффициента вертикальной динамики

Скорость, км/ч	Эксперимент [8]	Моделирование (УМ)
60	0,35	0,36
70	0,42	0,39
80	0,49	0,50

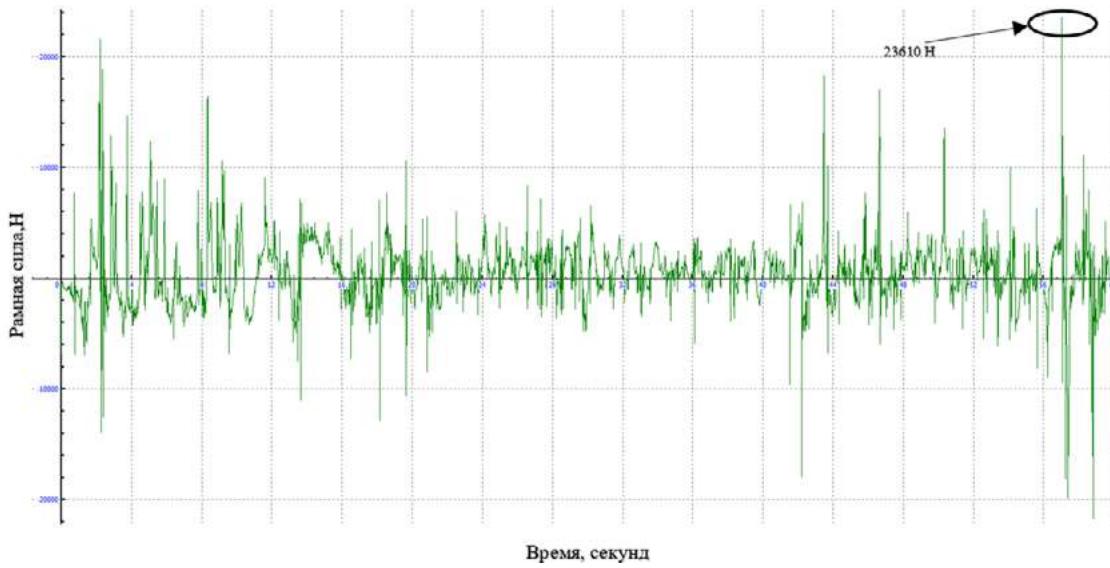


Рис. 7. Рамные силы при прохождении расчетной неровности пути по ПНСТ 511—2020 (80 км/ч)

ТАБЛИЦА 6. Сравнение расчетных и экспериментальных значений рамных сил

Скорость, км/ч	Эксперимент [8], кН	Моделирование (УМ), кН
60	18,635	19,215
80	22,896	23,160

Выводы и обсуждение

Проведенное моделирование динамики рессорного подвешивания маневрового локомотива ТЭМ2 в программной среде «Универсальный механизм» показало высокую степень соответствия с результатами экспериментальных испытаний, описанных в [13]. Сравнительный анализ подтвердил корректность используемой модели и обоснованность принятых в ходе построения допущений.

Во-первых, по деформациям концевых пружин при различных скоростях движения (60, 70 и 80 км/ч) расчетные значения составили соответственно 17, 19 и 20 мм, в то время как натурные измерения варьировались в пределах 6–18, 7–16 и 10–21 мм. Среднее отклонение от экспериментальных данных составило порядка 15 %, что укладывается в диапазон допустимой инженерной погрешности и демонстрирует надежность модели при воспроизведении нелинейных деформаций элементов подвески.

Во-вторых, сравнение коэффициентов вертикальной динамики, полученных при численном моделировании и в ходе натурных испытаний, также подтверждает достоверность модели. При скорости 60 км/ч значение составило 0,36 в модели против 0,35 в эксперименте; при 70 км/ч — 0,39 против 0,42; при 80 км/ч — 0,50 против 0,49. Среднее отклонение составило 3,3 %, при этом наибольшее расхождение (7,1 %) зафиксировано при скорости 70 км/ч. Тем не менее даже это значение не выходит за пределы допустимой точности для расчетов динамики подвижного состава.

В-третьих, при анализе рамных сил также наблюдается высокая степень совпадения. Для скоростей 60 и 80 км/ч расчетные значения составили 19,215 кН и 23,160 кН, тогда как экспериментальные составили 18,635 кН и 22,896 кН соответственно. Среднее отклонение по этим параметрам составило 2,09 %.

Таким образом, расхождения между результатами численного моделирования и натурных испытаний не превышают 15 %, а в большинстве случаев остаются в пределах 3–5 %. Это подтверждает адекватность разработанной пространственной модели и ее пригодность для инженерных расчетов динамических характеристик локомотивов в условиях сложных путевых возмущений. Модель может быть использована как основа для уточнения нормативных требований, оценки остаточного ресурса, а также при разработке методик расчета динамических нагрузок с учетом расчетных неровностей пути.

Список источников

1. Пеканов А. А. Состояние парка локомотивов промышленных предприятий: причины и следствия / А. А. Пеканов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2014. — № 3(27). — С. 35–39.

2. Хамидов О. Р. Оценка остаточного ресурса главных рам маневровых тепловозов / О. Р. Хамидов, А. М. Юсуфов, Н. С. Кодиров, Ш. Ф. Жамилов и др. // Universum: технические науки. — 2022. — № 2-3(95).
3. Оганьян Э. С. Критерии несущей способности конструкций локомотивов в экстремальных условиях нагружения: дис. ... д-ра техн. наук / Э. С. Оганьян. — Коломна, 2004. — 389 с. — URL: <https://www.dissercat.com> (дата обращения: 09.03.2025).
4. Григорьев П. С. Определение динамической нагруженности несущего узла маневрового локомотива / П. С. Григорьев // Транспорт Российской Федерации. — 2015. — № 3(58). — С. 44–46.
5. Тарасов А. Э. Отладка и проверка пространственных динамических моделей локомотивов в Simpack Rail на верхнем уровне / А. Э. Тарасов // Инновационный транспорт. — 2018. — № 1(27). — С. 67–75. — DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-249-263.
6. Тарасов А. Э. Моделирование движения рельсового экипажа в кривой в Simpack Rail / А. Э. Тарасов, Е. В. Сердобинцев // Компьютерные исследования и моделирование. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 249–263. — DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-249-263.
7. Çati Yu. Development of a New Vertical Dynamic Model of a Rail Vehicle for the Analysis of Ride Comfort / Yu. Çati, M. Düzgün, F. E. Kracht // Applied Sciences (Switzerland). — 2024. — Vol. 14. — Iss. 9. — P. 3848. — DOI: 10.3390/app14093848.
8. Bruni S. State-of-the-art and challenges of railway and road vehicle dynamics with multibody dynamics approaches / S. Bruni, J. P. Meijaard, A. L. Schwab, G. Rill // Multibody System Dynamics. — 2020. — Vol. 49. — Iss. 1. — DOI: 10.1007/s11044-020-09735-z.
9. Кожухов И. А. Разработка динамической модели маневрового локомотива / И. А. Кожухов // Вестник науки. — 2023. — Т. 3. — № 7(64). — С. 305–309.
10. Погорелов Д. Ю. Программный комплекс «Универсальный механизм» для моделирования динамики железнодорожного транспорта / Д. Ю. Погорелов, В. А. Симонов, В. В. Яковлев // Журнал компьютерных и системных наук. — 2015. — Т. 54. — № 6. — С. 912–920. — URL: <https://www.springer.com> (дата обращения: 04.04.2025).
11. Универсальный механизм: Руководство пользователя УМ. Моделирование динамики железнодорожных экипажей. — URL: <http://www.universalmechanism.com> (дата обращения: 10.05.2024).
12. Сайт «Универсальный механизм». Руководство пользователя УМ. Руководство пользователя УМ. Механическая система как объект моделирования. — URL: <http://www.universalmechanism.com> (дата обращения: 10.05.2024).
13. Кокорев А. И. Исследование влияния увеличенной осевой нагрузки до 23 т на динамические, прочностные и тягово-эксплуатационные характеристики. Динамические и прочностные испытания тепловоза 2ТЭ10Л с нагрузкой от оси на рельсы 23 тонны. Технический отчет по научно-исследовательской работе: № И-28-74. отчет о НИР И-01-94 / А. И. Кокорев, Б. Б. Бунин, В. А. Пархонин. ВНИТИ. — Коломна, 1974. — 218 с.

Дата поступления: 14.06.2025

Решение о публикации: 11.07.2025

Контактная информация:

ГРИГОРЬЕВ Павел Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; grigorev.p@gmail.com

КОДИРОВ Нозимжон Солиевич — аспирант; nazimzhank@bk.ru

Development and Validation of a Spring Suspension Spatial Dynamic Model for the TEM2 Shunting Locomotive

P. S. Grigorev, N. S. Kodirov

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Grigorev P. S., Kodirov N. S. Development and Validation of a Spring Suspension Spatial Dynamic Model for the TEM2 Shunting Locomotive. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 7–19. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-7-19

Summary

Purpose: The research focuses on the development and numerical validation of a spatial model for the spring suspension in the TEM2 shunting locomotive, utilising the Universal Mechanism software environment. As the rolling stock operated beyond its standard service lifespan experiences wear and tear, the necessity for precise engineering methodologies to evaluate dynamic loads becomes increasingly critical. **Methods:** The study includes a simulation of the interaction between the bogie and the locomotive body while traversing artificially created track irregularities, as well as a comparative analysis with experimental data. **Results:** The results reveal that the assessment of dynamic parameters, including end spring deformations, vertical dynamics coefficients and frame forces, has demonstrated deviations not exceeding 15%, thus affirming the model's validity. It is noteworthy that the most accurate correlations have been recorded in the speed range of 60–80 km/h. **Practical significance:** The results can be used as a basis for further calculation of the residual service life, and for refining methods for assessing dynamic characteristics.

Keywords: TEM2 shunting locomotive, spatial dynamic model, spring suspension, vertical dynamic coefficient, frame forces, universal mechanism, modelling of the underframe part, damping characteristics, numerical validation.

References

1. Pekanov A. A. Sostoyanie parka lokomotivov promyshlennykh predpriyatiy: prichiny i sledstviya [The state of the locomotive fleet of industrial enterprises: causes and effects]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog* [Bulletin of the Institute of Natural Monopolies Problems: Railway Engineering]. 2014, Iss. 3(27), pp. 35–39. (In Russian)
2. Khamidov O. R., Yusufov A. M., Kodirov N. S., Zhamilov Sh. F. et al. Otsenka ostatochnogo resursa glavnnykh ram manevrovyykh teplovozov [Assessment of the residual resource of main frames of shunting diesel locomotives]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: Technical Sciences]. 2022, Iss. 2–3(95). (In Russian)
3. Ogan'yan E. S. *Kriterii nesushchey sposobnosti konstruktsiy lokomotivov v ekstremal'nykh usloviyakh nagruzheniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Criteria for the load-bearing capacity of locomotive structures under extreme loading conditions: Dr. tech. sci. diss.]. Kolomna, 2004, 389 p. Available at: <https://www.dissercat.com> (accessed: March 09, 2025). (In Russian)
4. Grigor'ev P. S. Opredelenie dinamicheskoy nagruzhennosti nesushchego uzla manevrovogo lokomotiva [Determination of dynamic loading of the load-bearing unit of a shunting locomotive]. *Transport Rossiiyiskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2015, Iss. 3(58), pp. 44–46. (In Russian)

5. Tarasov A. E. Otladka i proverka prostranstvennykh dinamicheskikh modeley lokomotivov v Simpack Rail na verkhnem urovne [Adjustment and verification of spatial dynamic models of locomotives in Simpack Rail at the upper level]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative Transport]. 2018, Iss. 1(27), pp. 67–75. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-249-263. (In Russian)
6. Tarasov A. E., Serdobintsev E. V. Modelirovanie dvizheniya rel'sovogo ekipazha v krivoy v Simpack Rail [Modeling the movement of a rail vehicle in a curve in Simpack Rail]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling]. 2019, vol. 11, Iss. 2, pp. 249–263. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-249-263. (In Russian)
7. Çati Yu., Düzgün M., Kracht F. E. Development of a New Vertical Dynamic Model of a Rail Vehicle for the Analysis of Ride Comfort. *Applied Sciences* (Switzerland). 2024, vol. 14, Iss. 9, p. 3848. DOI: 10.3390/app14093848.
8. Bruni S., Meijaard J. P., Schwab A. L., Rill G. State-of-the-art and challenges of railway and road vehicle dynamics with multibody dynamics approaches. *Multibody System Dynamics*. 2020, vol. 49, Iss. 1. DOI: 10.1007/s11044-020-09735-z.
9. Kozhukhov I. A. Razrabotka dinamicheskoy modeli manevrovogo lokomotiva [Development of a dynamic model of a shunting locomotive]. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science]. 2023, vol. 3, Iss. 7(64), pp. 305–309. (In Russian)
10. Pogorelov D. Yu., Simonov V. A., Yakovlev V. V. Programmnyy kompleks “Universal'nyy mekhanizm” dlya modelirovaniya dinamiki zheleznodorozhного transporta [Universal mechanism software complex for railway transport dynamics modeling]. *Zhurnal komp'yuternykh i sistemnykh nauk* [Journal of Computer and System Sciences]. 2015, vol. 54, Iss. 6, pp. 912–920. Available at: <https://www.springer.com> (accessed: April 04, 2025). (In Russian)
11. Universal'nyy mekhanizm: Rukovodstvo pol'zovatelya UM. Modelirovaniye dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazhey [Universal mechanism: User Guide UM. Railway vehicle dynamics modeling]. Available at: <http://www.universalmechanism.com> (accessed: May 10, 2024). (In Russian)
12. Sayt “Universal'nyy mekhanizm”. Rukovodstvo pol'zovatelya UM. Mekhanicheskaya sistema kak ob'ekt modelirovaniya [Website “Universal mechanism”. User Guide UM. Mechanical system as a modeling object]. Available at: <http://www.universalmechanism.com> (accessed: May 10, 2024). (In Russian)
13. Kokorev A. I., Bunin B. B., Parkhonin V. A. Issledovanie vliyaniya uvelichennoy osevoy nagruzki do 23 t na dinamicheskie, prochnostnye i tyagovo-ekspluatatsionnye kharakteristiki. Dinamicheskie i prochnostnye ispytaniya teplovoza 2TE10L s nagruzkoy ot osi na rel'sy 23 tonny [Study of the influence of increased axle load up to 23 tons on dynamic, strength and traction-operational characteristics. Dynamic and strength tests of the 2TE10L diesel locomotive with an axle load of 23 tons: Technical report on research work № I-28-74. Research report I-01-94. VNITI]. Kolomna, 1974, 218 p. (In Russian)

Received: June 14, 2025

Accepted: July 11, 2025

Author's information:

Pavel S. GRIGOREV — PhD in Engineering, Associate Professor; grigorev.p@gmail.com

Nozimzhon S. KODIROV — Postgraduate Student; nazimzhank@bk.ru

УДК 656.2

Исследование стоимости простоя вагонов при взаимодействии железнодорожного и морского видов транспорта

Г. И. Никифорова

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

Для цитирования: Никифорова Г. И. Исследование стоимости простоя вагонов при взаимодействии железнодорожного и морского видов транспорта // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 20–27. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-20-27

Аннотация

Цель: Заключается в анализе, выявлении и учете всех затрат, связанных с непроизводительным простоем вагонов при взаимодействии железнодорожного и морского видов транспорта. На уровне припортовой станции-порта особенно актуальны вопросы технологии взаимодействия при передаче грузопотока. Выбор технологического варианта передачи грузопотока в условиях ограниченности ресурсов железнодорожной инфраструктуры и тягового подвижного состава должен быть экономически обоснован. Прямой вариант перегрузки груза с одного вида транспорта на другой увеличивает риски непроизводительного простоя вагонов, так как технологически и организационно сложно одновременно подготовить судно и подать вагоны под грузовые операции. Целесообразно выявить и учесть все затраты, связанные с возможными непроизводительными простоями вагонов. **Методы:** Анализ, синтез, формализация. **Результаты:** Было установлено, что базовые ставки по «Тарифному руководству № 2» не учитывают всех расходов на непроизводительный простой вагонов. Получены различные значения стоимости непроизводительного простоя для ОАО «РЖД» и операторской компании для двух вариантов маневрового обслуживания, учитывающих разную стоимость локомотиво-часа маневровой работы. Построены диаграммы детализации затрат на непроизводительный простой вагонов по различным категориям. Обосновано технологическое решение перегрузки груза при взаимодействии железнодорожного и морского транспорта с использованием терминала. **Практическая значимость:** Результаты работы имеют практическое значение для организации работы на припортовых станциях и в железнодорожных районах порта ОАО «РЖД» и операторских компаний. Выявлены скрытые затраты при непроизводительном простое вагонов для ОАО «РЖД» и операторских компаний при двух вариантах маневрового обслуживания.

Ключевые слова: Взаимодействие порта и станции, затраты на непроизводительный простой вагонов, портовый терминал, прямой вариант перегрузки груза.

В современных условиях геополитической нестабильности возникает необходимость оперативной адаптации логистических потоков к быстро меняющимся внешним факторам [1–3]. Это приводит к обострению проблем в традиционно уязвимых звеньях логистических цепей, особенно на стыках различных видов транспорта, в частности железнодорожного и морского.

Вопросам взаимодействия железнодорожного и морского транспорта традиционно уделяется значительное внимание в научных исследованиях [4–6]. Существенные различия между этими видами транспорта по объему грузовых партий и временным характеристикам создают комплекс проблем, требующих системного решения.

Проблемы взаимодействия можно классифицировать по уровням:

- **Локальный уровень** — регулирование взаимодействия в системе «порт — припортовая станция».
- **Государственный уровень** — управление логистическими потоками в масштабах страны [7, 8].

Взаимодействие смежных видов транспорта возможно по двум технологическим вариантам: прямая перегрузка груза и перегрузка груза с использованием терминала [8, 9]. При прямой перегрузке на первый план выходит точность технологических и управляющих решений, когда необходимо подать транспортные средства взаимодействующих видов транспорта на грузовой фронт одновременно. На практике это достаточно сложно осуществить, в связи с чем могут возникнуть непроизводительные простой транспортных средств. Перегрузка груза с использованием терминала увеличивает срок нахождения груза в пункте переработки, однако риски непроизводительного простоя снижаются. Целесообразно исследовать затраты на простой вагонов в пунктах взаимодействия порта и припортовой станции.

Базовые ставки за пользование вагонами регламентируются «Тарифным руководством № 2» [10]. Рассмотрим первый способ определения потерь времени и затрат на простой вагонов. Согласно руководству, вагоны подразделяются на шесть групп, от чего зависит величина базовой ставки (см. табл. 1). В документе также определены периоды времени пользования вагонами.

ТАБЛИЦА 1. Базовые ставки платы за пользование вагонами по «Тарифному руководству № 2», руб/ч [10]

Интервалы времени пользования, ч	Группы грузовых вагонов					
	1	2	3	4	5	6
0–12	10,90	16,70	13,00	10,30	67,00	26,90
13–24	19,10	29,30	22,90	18,10	97,30	47,20
Свыше 24	43,80	66,90	52,20	36,00	245,10	108,10

Если рассмотреть простой вагонов в ожидании готовности судна к грузовым операциям, то структура затрат усложняется (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Структура затрат на простой вагона

Затраты на простой вагона в ожидании грузовых операций, C , тыс. руб./ваг.-сут.	Первая группа затрат: C_1 , тыс. руб./ваг.-сут.	Расходы на дополнительную обработку вагонов и занятие железнодорожной инфраструктуры
	Вторая группа затрат: C_2 , тыс. руб./ваг.-сут.	Недополученный доход от простоя вагонов

К первой группе следует отнести стоимость обеспечения охраны груженых вагонов, затраты на занятие железнодорожного пути станции или маневрового района порта, расходы на дополнительные коммерческие и технические операции и затраты на дополнительную работу маневрового локомотива и бригады. Расходы на хранение грузов в «брошенных поездах» следует учитывать в расходах в основном операторской компании как владельца вагонного парка.

Затраты на занятие путей железнодорожной инфраструктуры в большей мере относятся к холдингу ОАО «РЖД». Величина таких затрат может определяться по формуле [11]:

$$C_{\text{инфр}} = \frac{1}{365} s_{\text{п}} l_{\text{п}} (\alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{рп}} + N_{\text{им}}) 10^{-2},$$

где $s_{\text{п}}$ — стоимость погонного метра пути, тыс. руб.;

$l_{\text{п}}$ — длина пути, занимаемая вагоном, м;

$\alpha_{\text{п}}, \alpha_{\text{рп}}$ — нормы годовых амортизационных отчислений, %;

$N_{\text{им}}$ — налог на имущество.

Расходы на маневровую работу будут прямо пропорциональны продолжительности дополнительных маневров и стоимости локомотиво-часов работы. В свою очередь, стоимость локомотиво-часов работы может оцениваться различными способами.

При условии обслуживания терминала в порту локомотивом Федерального железнодорожного транспорта применяется «Тарифное руководство № 3». Если терминал и порт обслуживаются маневровыми локомотивами частной компании (как, например, в Лужском узле), то действует прайс-лист этой компании, и плата взимается, как правило, за час работы.

Таким образом, плата за локомотиво-час дополнительной маневров работы будет составлять при прочих равных условиях около 3000 рублей в час для локомотива Федерального железнодорожного транспорта и порядка 5000 рублей в час для частной компании.

При расчете потерь доходов или недополученной прибыли для ОАО «РЖД» должны учитываться общий доход от перевозок по всей сети и общесетевой рабочий парк. Для операторской компании — соответственно доход этого оператора и рабочий парк вагонов, находящийся в ведении этого оператора.

Стоимость суточного непроизводительного простоя одного вагона может быть рассчитана отдельно для ОАО «РЖД» и для оператора вагонного парка, соответственно.

Расчеты показывают, что для ОАО «РЖД»:

- при обслуживании маневровым локомотивом, принадлежащим организации федерального железнодорожного транспорта, затраты на непроизводительный простой вагона в течение суток составят — 7,668 тыс. руб./ваг.-сут.;

— при обслуживании локомотивом, принадлежащим частной компании, — 7,681 тыс. руб./ваг.-сут.

Для операторской компании такие расходы возрастут до 12,33 тыс. руб./ваг.-сут.

Возвращаясь к «Тарифному руководству № 2», в пересчете на сутки простоя для третьей группы вагонов, затраты на непроизводительный простой составят 1,253 тыс. руб./ваг.-сут.

Таким образом, реальная стоимость простоя вагонов с учетом всех скрытых расходов для ОАО «РЖД» выше в 6 раз, а для операторской компании — в 10 раз.

На рис. 1–3 можно оценить доли различного вида расходов в общих затратах на непроизводительный простой вагона по описанным вариантам.



Рис. 1. Доли расходов в затратах на непроизводительный простой вагонов для ОАО «РЖД» при обслуживании маневровым локомотивом организаций федерального железнодорожного транспорта. Составлено автором на основе [11]

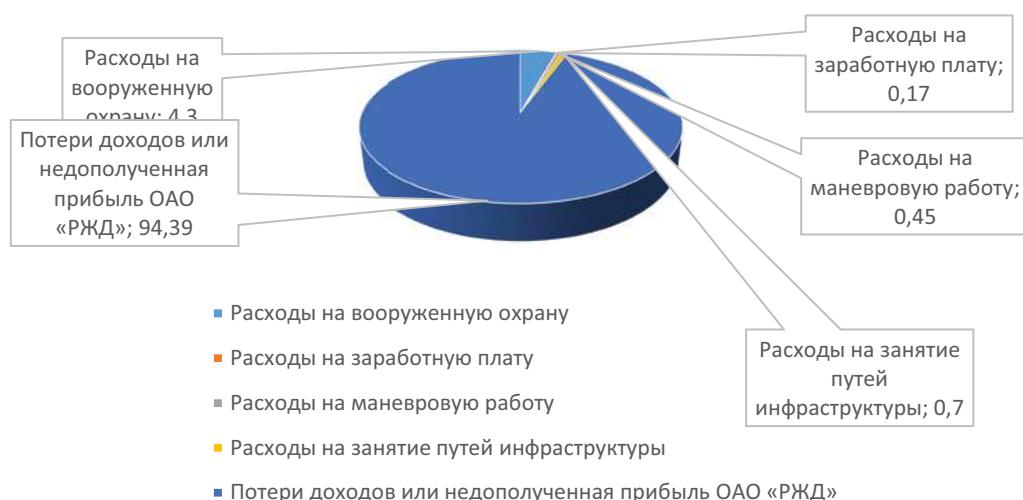


Рис. 2. Доли расходов в затратах на непроизводительный простой вагонов для ОАО «РЖД» при обслуживании маневровым локомотивом частной компании. Составлено автором на основе [11]

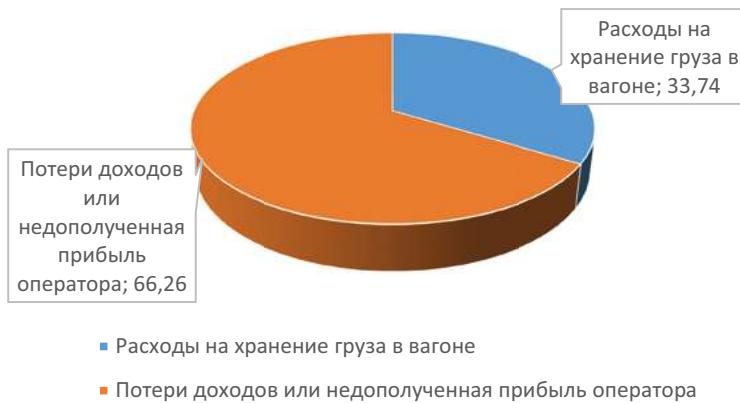


Рис. 3. Доли расходов в затратах на непроизводительный простой вагонов для операторской компании. Составлено автором на основе [11]

На диаграммах рис. 1–3 видно, что для ОАО «РЖД» около 94 % составляет потеря дохода или недополученная прибыль. Для операторской компании доля недополученной прибыли в общих затратах ниже — 66 %, однако значительно возрастает доля расходов на хранение груза в вагоне — до 34 %.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

- следует констатировать заниженные базовые ставки за пользование вагонами в «Тарифном руководстве № 2»;
- при взаимодействии железнодорожного и морского транспорта в системе «порт — припортовая станция» привлекательность прямого варианта перегрузки снижается в связи с риском возникновения непроизводительного простоя вагонов в ожидании обработки судов;
- в условиях необходимости адаптации к быстроменяющимся внешним условиям и нехватки тяговых ресурсов на железнодорожном транспорте актуальность технологии передачи грузопотока с использованием терминальных емкостей возрастает. Это приведет к снижению расходов ОАО «РЖД» и операторских компаний.

Список источников

1. Куренков П. В. Вопросы организации мультимодальных перевозок грузов / П. В. Куренков, Е. А. Герасимова, М. М. Мизиев, Д. О. Черкасова // Прогрессивные технологии в эксплуатации наземных транспортно-технологических комплексов и логистических транспортных систем: сборник трудов международной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 110-летнему юбилею со дня рождения профессора Каракулева А. В., Санкт-Петербург, 26 февраля 2024 года. — Казань: ООО «Бук», 2024. — С. 211–217.
2. Куренков П. В. Развитие порта Санкт-Петербург в международном транспортном коридоре «Север — Юг» / П. В. Куренков, М. А. Сироткин // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2025. — № 4. — С. 37–41. — DOI: 10.36535/0236-1914-2025-04-6.

3. Толкачева Е. В. Перспективы развития Международного транспортного коридора «Север—Юг» в условиях современных геополитических вызовов / Е. В. Толкачева, А. А. Воронов, П. И. Лукащук // Экономика устойчивого развития. — 2025. — № 2(62). — С. 295–297.
4. Путилина Д. В. Особенности выбора схемы расположения железнодорожных устройств, обслуживающих морской порт / Д. В. Путилина, П. К. Рыбин // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 20–27 апреля 2020 года / Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2020. — С. 54–58.
5. Рыбин П. К. Модели учета неопределенности в задаче планирования подвода поездов к припортовым станциям / П. К. Рыбин, Р. В. Горин // Russian Journal of Logistics & Transport Management. — 2019. — Т. 4. — № 1. — С. 4–17.
6. Гарнов Н. А. Развитие логистического планирования погрузки в адрес портов в эксплуатационной работе железной дороги / Н. А. Гарнов, Г. И. Никифорова // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–22 апреля 2024 года. — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2024. — С. 325–327.
7. Badetskii A. P. Choice of cargo delivery option in multimodal connection based on reinforcement learning / A. P. Badetskii, O. A. Medved // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2131. — Iss. 3. — P. 032103. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032103.
8. Покровская О. Д. Трансформация логистических цепей поставок лесных грузов из России в условиях санкций / О. Д. Покровская, Е. В. Пакулина // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2023. — № 10. — С. 36–43. — DOI: 10.36535/0236-1914-2023-10-6.
9. Nikiforova G. A Study of the Interaction Between Rail and Maritime Transport / G. Nikiforova // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021, Novosibirsk, May 11–14, 2021. — Vol. 402-1. — Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. — Pp. 145–152. — DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_17.
10. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=2195&ysclid=m92e6nr5k3672474950>.
11. Никифорова Г. И. Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта при передаче контейнеропотока на основе принципов логистики: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Г. И. Никифорова. — СПб., 2005. — 195 с.

Дата поступления: 09.06.2025

Решение о публикации: 11.07.2025

Контактная информация:

НИКИФОРОВА Гузель Исламовна — канд. техн. наук, доц.; guzel.spb@mail.ru

Research into the Financial Implications of Idle Railway Wagons in the context of Railway and Marine Transport Interaction

G. I. Nikiforova

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

For citation: Nikiforova G. I. Research into the Financial Implications of Idle Railway Wagons in the context of Railway and Marine Transport Interoperability. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 20–27. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-20-27

Summary

Purpose: To analyze, identify, and account for all costs associated with unproductive downtime of wagons during the interaction between rail and sea transport. At the seaport - railway station level, the technology of cargo transfer is particularly relevant. The choice of the technological option for cargo transfer in the context of limited resources for railway infrastructure and traction rolling stock must be economically justified. The direct transfer of cargo from one mode of transport to the other has been shown to increase the risks of unproductive downtime of wagons. This is due to the technologically and organizationally challenging nature of simultaneously preparing a vessel and supplying wagons for cargo operations. It is recommended that all costs associated with potential unproductive downtime of wagons be identified and taken into account. **Methods:** Analysis, synthesis, and formalization of aforementioned concepts is of paramount importance. **Results:** It has been determined that the base rates stipulated in the "Tariff Guide No. 2" do not encompass all the expenses associated with unproductive idle time of wagons. A range of values for the cost of unproductive downtime was collated for JSC "Russian Railways" and the operator companies for two scenarios of shunting services. This was undertaken with consideration for the varying cost per locomotive-hour of shunting work. Diagrams of data detailing the costs of unproductive idle time of wagons by various categories have been constructed. The technological solution of cargo overloading in the interaction of railway and sea transport using the terminal has been substantiated. **Practical significance:** The findings of the study can be of significance for the organization of operations at portside stations and railway areas for JSC "Russian Railways" and operator companies. Hidden costs of wagon unproductive idle time for both variants of shunting services have been identified for JSC Russian Railways and the operator companies.

Keywords: Sea port — railway station interaction, the cost of unproductive idle time of wagons, the seaport terminal, the direct transfer of cargo.

References

1. Kurenkov P. V., Gerasimova E. A., Miziev M. M., Cherkasova D. O. Voprosy organizatsii mul'timodal'nykh perevozok gruzov [Issues of organizing multimodal cargo transportation]. *Progressivnye tekhnologii v ekspluatatsii nazemnykh transportno-tehnologicheskikh kompleksov i logisticheskikh transportnykh sistem* [Advanced technologies in the operation of ground-based transport and technological complexes and logistics transport systems]. Kazan: OOO "Buk" Publ., 2024, pp. 211–217. (In Russian)
2. Kurenkov P. V., Sirotkin M. A. Razvitie porta Sankt-Peterburg v mezhdunarodnom transportnom koridore "Sever — Yug" [Development of the St. Petersburg port in the international transport corridor "North — South"]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management]. 2025, Iss. 4, pp. 37–41. DOI: 10.36535/0236-1914-2025-04-6. (In Russian)
3. Tolkacheva E. V., Voronov A. A., Lukashchuk P. I. Perspektivy razvitiya Mezhdunarodnogo transportnogo koridora "Sever — Yug" v usloviyakh sovremennykh geopoliticheskikh vyzovov

[Prospects for the development of the International Transport Corridor “North — South” in the context of modern geopolitical challenges]. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Economics of sustainable development]. 2025, Iss. 2(62), pp. 295–297. (In Russian)

4. Putilina D. V., Rybin P. K. Osobennosti vybora skhemy raspolozheniya zheleznodorozhnykh ustroystv, obsluzhivayushchikh morskoy port [Features of choosing a scheme for the location of railway facilities serving a seaport]. *Transport: problemy, idei, perspektivy* [Transport: problems, ideas, prospects]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2020, pp. 54–58. (In Russian)

5. Rybin P. K., Gorin R. V. *Modeli ucheta neopredelennosti v zadache planirovaniya podvoda poezdov k priportovym stantsiyam* [Models for accounting for uncertainty in the task of planning the supply of trains to port stations]. *Russian Journal of Logistics & Transport Management*. 2019, vol. 4, Iss. 1, pp. 4–17. (In Russian)

6. Garnov N. A., Nikiforova G. I. Razvitie logisticheskogo planirovaniya pogruzki v adres portov v ekspluatatsionnoy rabote zheleznoy dorogi [Development of logistics planning of loading to ports in railway operations]. *Transport: problemy, idei, perspektivy* [Transport: problems, ideas, prospects]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2024, pp. 325–327. (In Russian)

7. Badetskii A. P., Medved O. A. Choice of cargo delivery option in multimodal connection based on reinforcement learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2131, Iss. 3, p. 032103. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032103.

8. Pokrovskaya O. D., Pakulina E. V. Transformatsiya logisticheskikh tsepey postavok lesnykh gruzov iz Rossii v usloviyakh sanktsiy [Transformation of logistics supply chains for timber cargo from Russia under sanctions]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2023, Iss. 10, pp. 36–43. DOI: 10.36535/0236-1914-2023-10-6. (In Russian)

9. Nikiforova G. A Study of the Interaction Between Rail and Maritime Transport / G. Nikiforova. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021, Novosibirsk, May 11–14, 2021, vol. 402-1. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022, pp. 145–152. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_17.

10. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=2195&ysclid=m92e6nr5k3672474950>.

11. Nikiforova G. I. *Vzaimodeystvie zheleznodorozhnogo i morskogo transporta pri peredache konteyneropotoka na osnove printsipov logistiki: spetsial'nost' 05.22.08 “Upravlenie protsessami perevozok”: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Interaction of rail and sea transport in the transfer of container traffic based on the principles of logistics: specialty 05.22.08 “Transportation process management”: dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. St. Petersburg, 2005, 195 p. (In Russian)

Received: June 09, 2025

Accepted: July 11, 2025

Author's information:

Guzel Is. NIKIFOROVA — PhD in Engineering, Associate Professor; guzel.spb@mail.ru

УДК 621.316.925

Обоснование актуальности защиты контактной сети наземного городского электрического транспорта от малых токов короткого замыкания

А. В. Агунов¹, А. В. Щербань², Д. Д. Архипов²

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

²СПб ГУП «Горэлектротранс», Российская Федерация, 196105, Санкт-Петербург, Сызранская ул., 15

Для цитирования: Агунов А. В., Щербань А. В., Архипов Д. Д. Обоснование актуальности защиты контактной сети наземного городского электрического транспорта от малых токов короткого замыкания // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 28–36. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-28-36

Аннотация

Цель: Цель настоящей работы заключается в создании эффективной системы защиты контактной сети наземного городского электрического транспорта от малых токов короткого замыкания, возникающих преимущественно в местах пересечений путей и при нарушениях правил эксплуатации подвижного состава. Несмотря на наличие существующих методов защиты, такие аварии часто приводят к серьезным последствиям — полному выходу из строя отдельных участков сети и остановке пассажирского движения. **Методы:** Методы исследования включают анализ действующих систем защиты питающих линий, выявление недостатков существующей схемы защиты, а также разработку нового алгоритма распознавания аварийных ситуаций, вызванных маломощными короткими замыканиями. **Результаты:** Полученные промежуточные результаты экспериментальной эксплуатации показывают перспективность дальнейших исследований в области малых токов короткого замыкания. Внедрение быстroredействующих систем регистрации аварийных процессов позволяет эффективно обнаруживать и устранять угрозы, возникающие при небольших значениях токов короткого замыкания. Проведение дальнейших испытаний запланировано на последующие годы, итоговая задача состоит в полной автоматизации процесса выявления и предотвращения аварийных режимов контактной сети, связанных с малыми токами короткого замыкания. **Практическая значимость:** Практическое значение работы определяется возможностью значительно повысить надежность электроснабжения городских транспортных сетей, снизить частоту вынужденных простоев общественного транспорта и минимизировать риски безопасности пассажиров. Результаты исследования имеют потенциал широкого внедрения в практику эксплуатационных служб предприятий городского электротранспорта, обеспечивая стабильную работу инфраструктуры и повышение качества обслуживания населения.

Ключевые слова: Городской электрический транспорт, защита контактной сети, короткое замыкание, рекуперация энергии, мониторинг.

Несмотря на то, что на сегодняшний день, казалось бы, многие вопросы по автоматической защите контактно-кабельной сети наземного городского электрического транспорта решены [1], все же остаются проблемы, которые нередко серьезным образом влияют как на надежность электроснабжения, так и на безопасность организации пассажирских перевозок наземным городским электротранспортом. Одной из таких проблем является возникновение малых токов короткого замыкания на контактной сети [2].

Данное физическое явление происходит на специальных частях контактной сети. В основном это пересечения «трамвай — троллейбус», «троллейбус — троллейбус», салазки разводных частей мостов города. Безусловно, подобные аварийные ситуации сами по себе не происходят, а возникают при прохождении подвижного состава трамваев или троллейбусов. Но в любом случае последствие одно — полный выход из строя специальных частей, а точнее — полное выгорание изделия и, как следствие, полная остановка пассажирского движения.

Это происходит из-за того, что автоматическая защита не видит (находясь в слепой зоне) аварийный режим, так как величина тока малого короткого замыкания, под влиянием которого происходит разрушение изделия контактной сети, сопровождается относительно небольшими значениями — от 300 до 600–650 А. То есть ток невысокий и является, по сути, нормальным при безаварийном режиме работы во время нахождения подвижного состава на контактной сети.

Таким образом, вопрос по разработке защиты контактной сети от малых токов короткого замыкания является актуальным.

В настоящее время в СПб ГУП «Горэлектротранс» существует защита контактной сети от токов перегрузки, в том числе от токов короткого замыкания (КЗ), и имеет следующие виды [3]:

1. Защита от перегрузки — срабатывает при достижении током значения в 2700 А. Время срабатывания составляет 0,08 секунды. Далее следует выдержка времени до 8 секунд и срабатывание автоматического повторного включения (АПВ). В случае повторного срабатывания защиты после АПВ оно блокируется, и линия остается отключенной до устранения причины возникновения тока перегрузки. После устранения неисправности линия возвращается в работу вручную — посредством энергодиспетчера.

2. Токо-временная защита контактной сети, которая реагирует на температуру нагрева провода.

Основной недостаток действующей защиты питающих линий заключаются в следующем [4]: ввиду сложности конфигурации тяговой сети и географического расположения ее элементов длины питающих линий для всех участков различны: от нескольких десятков метров до нескольких километров. Одинаковый ток срабатывания автоматических выключателей не обеспечивает требуемого уровня селективности, из-за чего защита может реагировать на КЗ в контактной сети за пределами длины питающей линии или не реагировать на КЗ в конце линии, где величина тока будет меньше тока срабатывания. В первом случае увеличивается износ оборудования из-за чрезмерного количества срабатываний выключателя, во втором — повреждение питающей линии и других агрегатов тяговой подстанции [5].

На рис. 1–11 представлены графики, описывающие процессы отключения фидеров функцией автоматического повторного включения (АПВ), системой токо-временной защиты (ТВЗ) и принудительно.

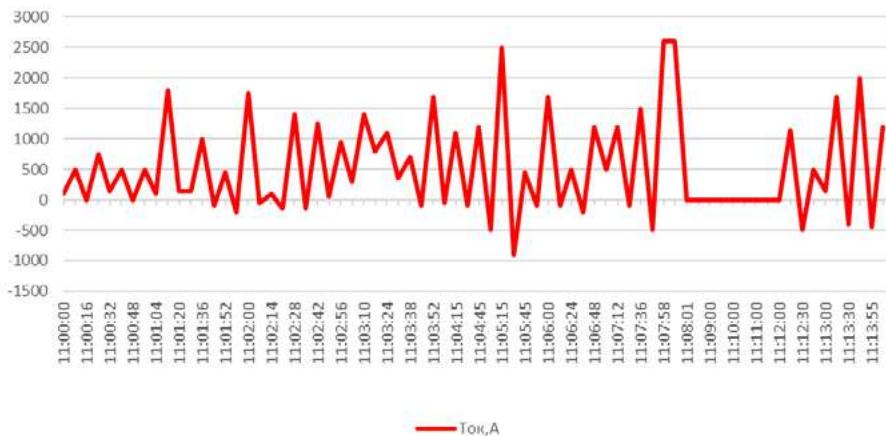


Рис. 1. График потребления тока со срабатыванием ТВЗ фидера «ЛЭМ3», зафиксированный комплексом телемеханики

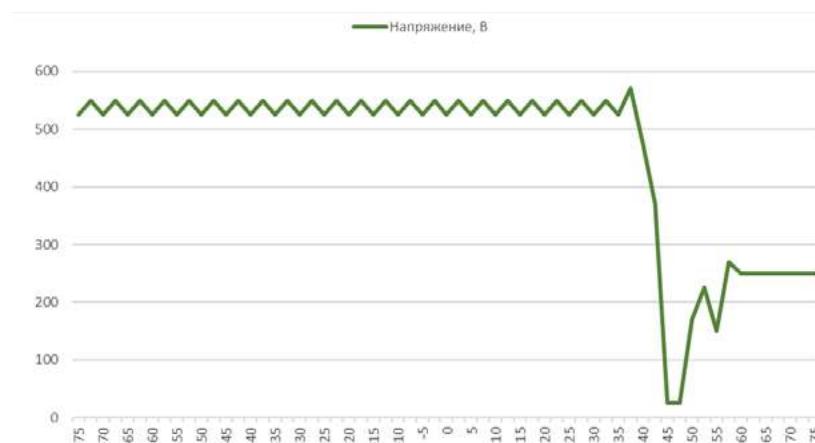


Рис. 2. График напряжения в момент срабатывания ТВЗ фидера «ЛЭМ3», зафиксированный комплексом телемеханики

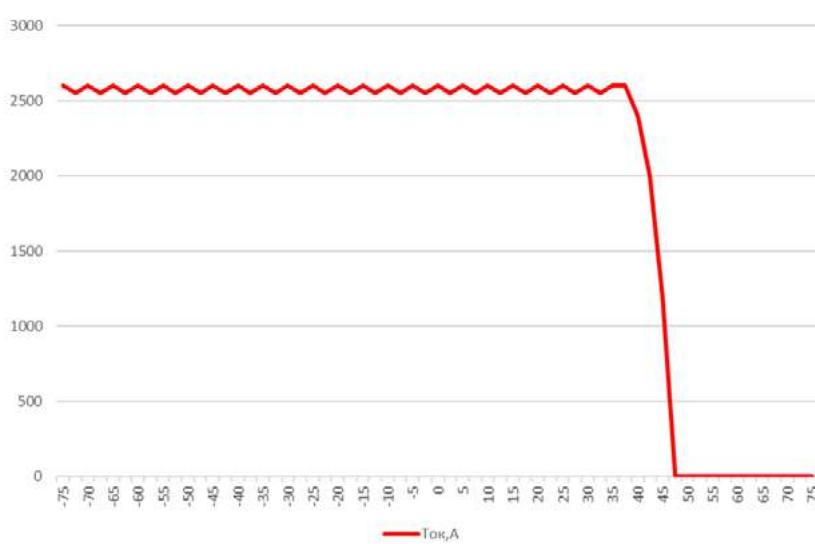


Рис. 3. График тока в момент срабатывания ТВЗ фидера «ЛЭМ3», зафиксированный комплексом телемеханики

При $I_{уст}$ фидера «ЛЭМЗ», равного 2800 А, на данном фидере значение тока было 2600 А в течении 6 секунд. Так как данное значение ниже, чем $I_{уст}$, сработала токо-временная защита.

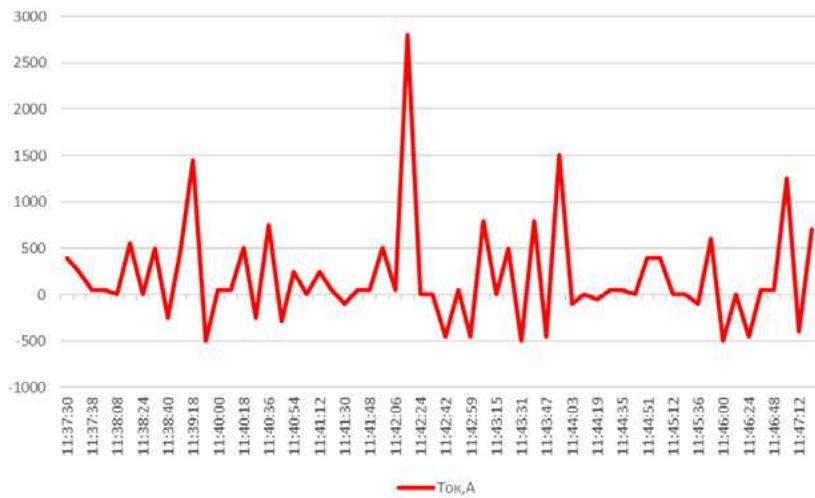


Рис. 4. График потребления тока со срабатыванием АПВ фидера «Дачный», зафиксированный комплексом телемеханики

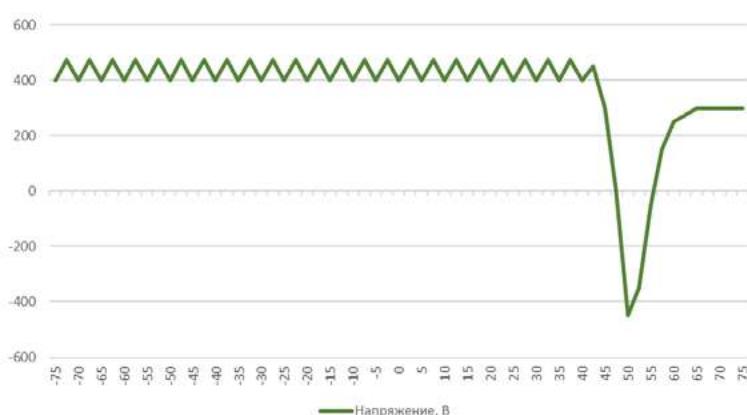


Рис. 5. График напряжения в момент срабатывания АПВ фидера «Дачный»

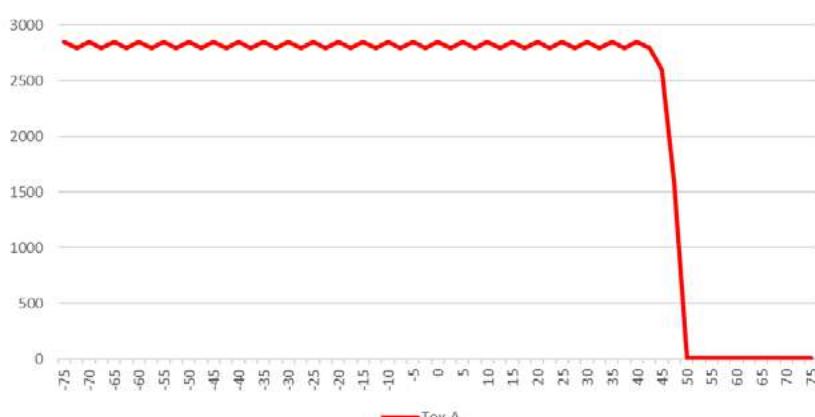


Рис. 6. График тока в момент срабатывания автоматического выключателя фидера «Дачный»

$I_{уст}$ фидера «Дачный» равен 2800 А. При достижении данного показателя сработал автоматический выключатель постоянного тока по $I_{уст}$.

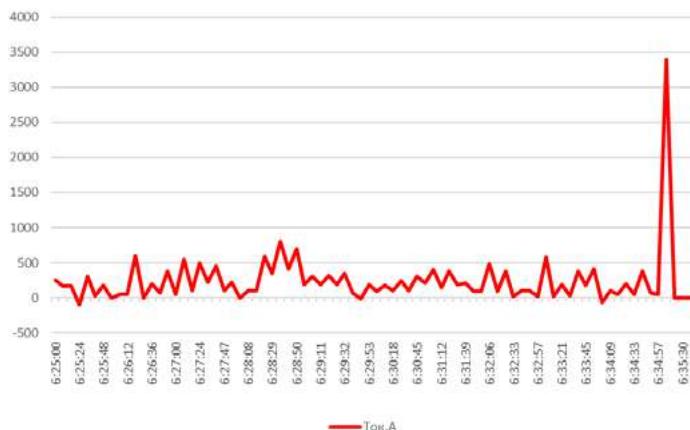


Рис. 7. График потребления тока со срабатыванием АПВ фидера «Егорова», зафиксированный комплексом телемеханики

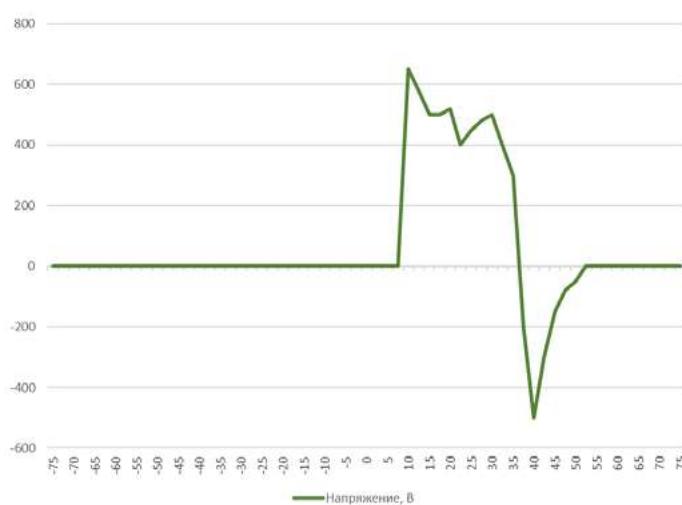


Рис. 8. График напряжения в момент срабатывания АПВ фидера «Егорова»

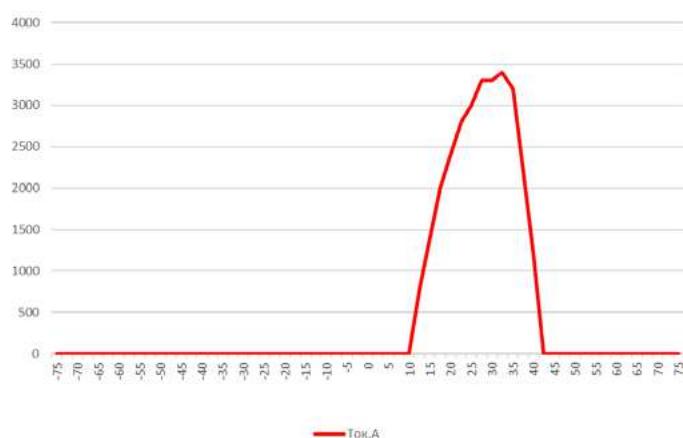


Рис. 9. График тока в момент срабатывания автоматического выключателя фидера «Егорова»

$I_{уст}$ фидера «Егорова» равен 2400 А. При превышении данного показателя сработал автоматический выключатель постоянного тока по $I_{уст}$.

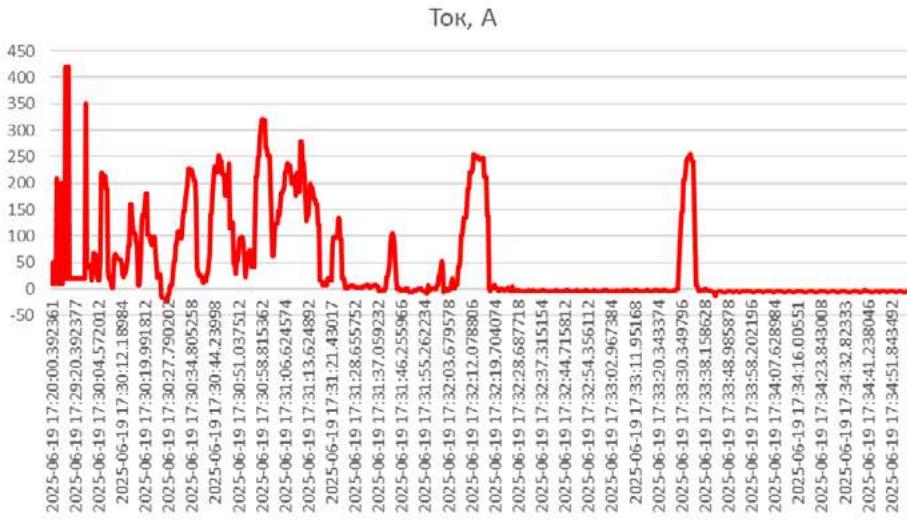


Рис. 10. График потребления тока фидера «Решетникова», зафиксированный комплексом телемеханики



Рис. 11. График напряжения в момент отключения диспетчером фидера «Решетникова»

$I_{уст}$ фидера «Решетникова» равен 2400 А. Автомат был отключен принудительно диспетчером РДП по команде с линии. Ток в момент отключения составил порядка 425 А. При этом наблюдалась длительная электрическая дуга на пересечении трамвай/троллейбус. В результате изделие вышло из строя (сгорело).

Анализ различных видов и причин коротких замыканий в контактной сети привел к необходимости выделения особой группы коротких замыканий малого тока, характеризующихся возникновением устойчивой электрической дуги (дуговой эффект). Дуговой эффект в контактной сети может возникнуть вследствие [6]:

- обрыва и падения контактного провода на подвижный состав или рельсы;
- перехлеста контактных проводов вследствие сильного ветра или внешнего воздействия;
- падения посторонних предметов на контактную сеть;
- неисправности токоприемников;
- пробоя изоляции в подвесной арматуре контактной сети;
- неисправности дугогасящих элементов контактной сети;
- неисправности подвижного состава;
- специфических погодных условий (сильный мороз, образование наледи);
- при нарушении своих действий (должностных инструкций) водителями, при управлении подвижным составом.

В некоторых случаях токи и время их действия в процессе возникновения дуговых эффектов, как правило, не достигают значений, при которых происходит срабатывание основных защит от коротких замыканий и токо-временной защиты, при этом негативные последствия длительного воздействия их на контактную сеть и подвижный состав могут быть необратимыми.

Малые значения токов короткого замыкания, сопровождающиеся дуговыми эффектами, не позволяют выявлять и анализировать их имеющимися техническими средствами [7]. Для более детального исследования поведения контактной сети и оборудования в момент возникновения коротких замыканий всех видов, включая короткие замыкания с малым током и дуговыми эффектами, принято решение о внедрении в опытную эксплуатацию на одной из тяговых подстанций ГЭТ быстродействующей системы регистрации аварийных процессов с одновременным расширением комплекса телемеханики в части повышения производительности и надежности сбора данных.

Опытная эксплуатация проводилась в 2024 г., однако принято решение продолжить ее в 2025 и 2026 гг. соответственно. Итоговая цель данных исследований — разработка алгоритма защиты контактной сети от малых токов короткого замыкания.

Промежуточные и итоговые результаты опытной эксплуатации будут опубликованы в последующих статьях.

Список источников

1. Горшков П. Ю. Контактные сети и воздушные линии электропередачи городского электротранспорта / П. Ю. Горшков, Н. Д. Ковалев, М. Ф. Бочаров. — М.: Транспорт, 2010. — 348 с.
2. Савин В. А. Электрооборудование и электрические установки наземного городского транспорта / В. А. Савин, Е. Н. Павлов. — Новосибирск: Наука, 2013. — 412 с.

3. Колесник Т. Р. Автоматизация защиты распределительных сетей / Т. Р. Колесник, О. В. Дубровская. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2015. — 264 с.
4. Максимова Е. В. Диагностика и мониторинг состояния контактных сетей городского электротранспорта / Е. В. Максимова, А. С. Маслов. — Самара: СамГУПС, 2018. — 216 с.
5. Сидоров Н. А. Методические основы проектирования и эксплуатации контактных сетей городского электрического транспорта / Н. А. Сидоров, А. Я. Петров. — Хабаровск: ХабарГУ, 2012. — 304 с.
6. Кондратьев В. В. Эксплуатационные характеристики и ремонт контактных сетей городского транспорта / В. В. Кондратьев, Н. В. Федоров. — Челябинск: ЧГАСУ, 2016. — 248 с.
7. Чернышов С. И. Релейная защита и автоматика распределительных сетей промышленного назначения / С. И. Чернышов, В. П. Сергеев. — Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 2019. — 320 с.

Дата поступления: 24.06.2025

Решение о публикации: 20.07.2025

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, проф.; alexagunov@mail.ru

ЩЕРБАНЬ Александр Владимирович — начальник ОСП «Энергохозяйство»; en_gi@spbget.ru

АРХИПОВ Дмитрий Дмитриевич — заместитель начальника ПТО ОСП «Энергохозяйство»; digital5563@icloud.com

Justification for Protecting the Overhead Contact System of Urban Land Electric Transport from Low Short-Circuit Currents

A. V. Agunov¹, A. V. Shcherban², D. D. Arkhipov²

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

²SUE “Gorelectrotrans”, 15 Syzranskaya str., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

For citation: Agunov A. V., Shcherban A. V., Arkhipov D. D. Justification for Protecting the Overhead Contact System of Urban Land Electric Transport from Low Short-Circuit Currents. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 28–36. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-28-36

Summary

Purpose: This paper aims to create an efficient system for protecting the overhead contact system of urban land electric transport from low short-circuit currents, which primarily occur at track intersections and from violations of rolling stock operation protocols. Despite existing protection measures, such incidents frequently result in severe consequences, including the total collapse of network segments and disruptions to passenger services. **Methods:** An analysis of existing feeder protection systems, identification of shortcomings within the existing protection framework, and the development of a new algorithm to detect low-power short circuits. **Results:** The obtained preliminary findings from experimental operations indicate the prospects for further research into low short-circuit currents. The introduction of rapid alarm registration systems facilitates the effective detection and elimination of threats associated with low short-circuit currents. Further tests are

planned for the coming years, with the ultimate goal of fully automating the detection and prevention of emergency situations in the contact network associated with low short-circuit currents. **Practical significance:** The practical significance of this research lies in its potential to significantly boost the reliability of power supply for urban transportation networks, reduce unexpected downtime of public transport, and minimize passenger safety risks. The results of the study have the potential for widespread adoption in the operational practices of urban electric transport enterprises. This would ensure uninterrupted operation of infrastructure and enhance the overall quality of public services.

Keywords: Urban electric transport, overhead contact network protection, short circuit, energy recuperation, monitoring.

References

1. Gorshkov P. Yu., Kovalev N. D., Bocharov M. F. *Kontaktnye seti i vozдушные линии электропередачи городского электротранспорта* [Contact Networks and Overhead Power Lines for Urban Electric Transport]. Moscow: Transport Publ., 2010, 348 p. (In Russian)
2. Savin V. A., Pavlov E. N. *Elektrooborudovanie i elektricheskie ustanovki наземного городского транспорта* [Electrical Equipment and Installations for Ground Urban Transport]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2013, 412 p. (In Russian)
3. Kolesnik T. R., Dubrovskaya O. V. *Avtomatizatsiya zashchity raspredelitel'nykh setey* [Automation of Protection for Distribution Networks]. Ekaterinburg: UGTU-UPI Publ., 2015, 264 p. (In Russian)
4. Maksimova E. V., Maslov A. S. *Diagnostika i monitoring sostoyaniya kontaktnykh setey gorodskogo elektrotransporta* [Diagnostics and Monitoring of the State of Urban Electric Transport Contact Networks]. Samara: SamGUPS Publ., 2018, 216 p. (In Russian)
5. Sidorov N. A., Petrov A. Ya. *Metodicheskie osnovy proektirovaniya i ekspluatatsii kontaktnykh setey gorodskogo elektricheskogo transporta* [Methodological Foundations of Design and Operation of Urban Electric Transport Contact Networks]. Khabarovsk: KhabarGU Publ., 2012, 304 p. (In Russian)
6. Kondrat'ev V. V., Fedorov N. V. *Ekspluatatsionnye kharakteristiki i remont kontaktnykh setey gorodskogo transporta* [Operational Characteristics and Repair of Urban Transport Contact Networks]. Chelyabinsk: ChGASU Publ., 2016, 248 p. (In Russian)
7. Chernyshov S. I., Sergeev V. P. *Releynaya zashchita i avtomatika raspredelitel'nykh setey promyshlennogo naznacheniya* [Relay Protection and Automation of Industrial Distribution Networks]. Saratov: Saratovskiy gos. tekhn. un-t Publ., 2019, 320 p. (In Russian)

Received: June 24, 2025

Accepted: July 20, 2025

Author's information

Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Alexander V SHCHERBAN — Head of the SSE “Energokhozeystvo”; en_gi@spbget.ru

Dmitry D. ARKHIPOV — Production Department Deputy Head of the SSE “Energokhozeystvo”; digital5563@icloud.com

УДК 621.316.9

Интеграция распределенной газотурбинной генерации в систему электроснабжения города Тартуса (CAP): надежность и технико-экономическая эффективность

М. В. Шевлюгин, М. Р. Ради

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

Для цитирования: Шевлюгин М. В., Ради М. Р. Интеграция распределенной газотурбинной генерации в систему электроснабжения города Тартуса (CAP): надежность и технико-экономическая эффективность // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 37–50. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-37-50

Аннотация

Цель: Обосновать способ повышения надежности и экономической эффективности дефицитной системы электроснабжения города Тартуса за счет внедрения распределенной газотурбинной генерации. **Методы:** Включают аналитический расчет коэффициента готовности по ГОСТ Р 27.002—2009 для трех сценариев энергоснабжения (только внешняя сеть, изолированная и параллельная работа распределенной генерации (РГ)); моделирование нормальных и аварийных режимов в PowerFactory и RastrWin3 с оценкой потерь мощности, отклонений напряжения и частоты; технико-экономический анализ проекта газотурбинного энергоцентра (18 МВт) методом чистого дисконтированного дохода. **Результаты:** Показывают, что интеграция распределенной генерации не снижает надежность: общий коэффициент готовности системы достигает 0,999, что сопоставимо с базовым вариантом и превышает нормативные требования. В автономном режиме отклонение напряжения остается в пределах $\pm 5\%$, частоты — $\pm 0,2$ Гц. Экономический расчет выявил срок окупаемости инвестиций около 9 лет при условной себестоимости генерации порядка 5 руб/кВт · ч. **Практическая значимость:** Заключается в предложении оптимальной конфигурации газотурбинной распределенной генерации и схемы ее подключения (20 кВ, двухцепные линии 2×300 мм 2), обеспечивающих повышение устойчивости электроснабжения критически важных потребителей города и сокращение зависимости от внешней энергосистемы. Результаты исследования могут служить методической основой для модернизации энергосистем в других регионах, испытывающих аналогичный дефицит мощности.

Ключевые слова: Распределенная генерация, надежность электроснабжения, коэффициент готовности, газотурбинная установка, возобновляемые источники энергии, экономическая эффективность, энергетическая система, Тартус.

Введение

Город Тартус, как и энергосистема Сирии в целом, сталкивается с острым дефицитом электроэнергии и износом оборудования энергоснабжения [1]. В результате военного конфликта и санкций существенно сократились генерирующие мощности и нарушена работа электросетевой инфраструктуры [2]. По состоянию на 2023 г. объем электроэнергии, выделяемый для провинции Тартуса, снизился до 110 МВт, а непосредственно для города — до ~ 30 МВт, что вынуждает вводить длительные отключения (до 5 часов из 6) [1]. Одновременно нагрузка на сети 20 кВ и распределительные трансформаторы значительно возросла, превышая их

номинальную пропускную способность и приводя к перегрузкам и аварийным отключениям [1, 3]. Таким образом, обеспечение надежного электроснабжения Тартуса требует поиска новых решений.

Одним из перспективных направлений является использование распределенной генерации (РГ) и местных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [4]. Предполагается, что внедрение РГ позволит частично заместить дефицит генерирующих мощностей и повысить устойчивость системы за счет территориальной децентрализации производства электроэнергии [5]. В мировой и сирийской практике рассматриваются различные варианты: ветер, солнце, газотурбинные установки и др. Так, например, ветровая энергия в Сирии имеет ограниченный потенциал из-за низкой скорости ветра [6]. Солнечная энергетика обладает значительным ресурсом и была внедрена в виде пилотных фотоэлектрических станций мощностью 56 МВт и 200 МВт, однако даже такие установки не способны покрыть пиковое потребление города, особенно в зимний период [7]. Кроме того, станции мощностью свыше 50 МВт формально не относятся к распределенной генерации и требуют значительных капитальных вложений с длительным сроком окупаемости (около 12 лет) [7]. В то же время газотурбинные электростанции средней мощности представляют собой эффективный источник распределенной генерации с относительно коротким сроком окупаемости (~ 9 лет по расчетам) и способностью обеспечивать стабильную выработку [7, 8].

Цель данной работы — обосновать предложения по развитию системы электроснабжения Тартуса на основе распределенной генерации, обеспечивающие повышение надежности и качества электроснабжения при оптимальных затратах.

Для достижения поставленной цели проведены сравнения двух основных сценариев:

- изолированный режим, когда энергоснабжение города осуществляется только за счет локального энергоцентра;
- параллельный режим, при котором распределенная генерация работает совместно с внешней энергосистемой.

Оценка этих вариантов выполнена по комплексу критериев:

- показатели надежности системы;
- технические параметры режима (потери мощности, отклонения напряжения и частоты);
- экономические показатели (капитальные затраты, стоимость выработки, срок окупаемости и др.).

В качестве основного источника генерации в рассматриваемой системе принят газотурбинный энергоцентр как наиболее эффективный в условиях Сирии [7].

Методика исследования

Анализ надежности

Ключевым показателем надежности энергоснабжения потребителей принят коэффициент готовности K_g — вероятность того, что объект (система электроснабжения) находится в работоспособном состоянии в произвольный момент времени [9]. Этот показатель учитывает как безотказность, так и восстановимость элементов. Для оценки K_g используются стандартные соотношения теории надежности [7]:

$$K_g = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{раб}}$ — средняя наработка на отказ, $T_{\text{пр}}$ — среднее время восстановления.

В расчетах применялись нормативные данные по среднему времени безотказной работы и частоте отказов для линий электропередачи и трансформаторов [10]. Коэффициент готовности сложной системы определяется на основе структурной схемы сети: при последовательном соединении элементов (цепь питания без резервирования) K_g системы равен произведению K_g всех элементов, а при параллельном соединении (наличие резервных или дублирующих элементов) — вычисляется как $K_g = 1 - \prod(1 - K_{g,i})$ для n резервируемых элементов. В данном исследовании оценивается готовность энергосистемы при разных схемах питания: только от внешней сети; только от собственного энергоцентра; комбинированное питание (сеть + РГ). На рис. 1 представлена упрощенная модель городской энергосистемы Тартуса без распределенной генерации, а на рис. 2 — та же система с подключением собственного распределенного энергоцентра.

Для вычисления коэффициентов готовности компонентов были собраны исходные данные по надежности высоковольтных линий и трансформаторов, включая частоту отказов на единицу длины линии и среднее время восстановления. В частности, для каждой линии 110–10 кВ рассчитывалась средняя наработка на отказ $T_{\text{раб}}$ как обратная величина средней частоты отказов (с учетом длины линии). Аналогично для силовых трансформаторов брались типовые показатели надежности из нормативных источников [10]. Результаты расчета показателей надежности для основных элементов системы приведены в табл. 1.

Надежность (табл. 1)

Для трех последовательно включенных трансформаторов внешней сети (Т1–Т3) получены индивидуальные коэффициенты готовности $K_g \geq 0,999$; совокупный $K_{g\Sigma} \geq 0,999$ при наличии резервирования на ступени 66/20 кВ стремится к 1, что

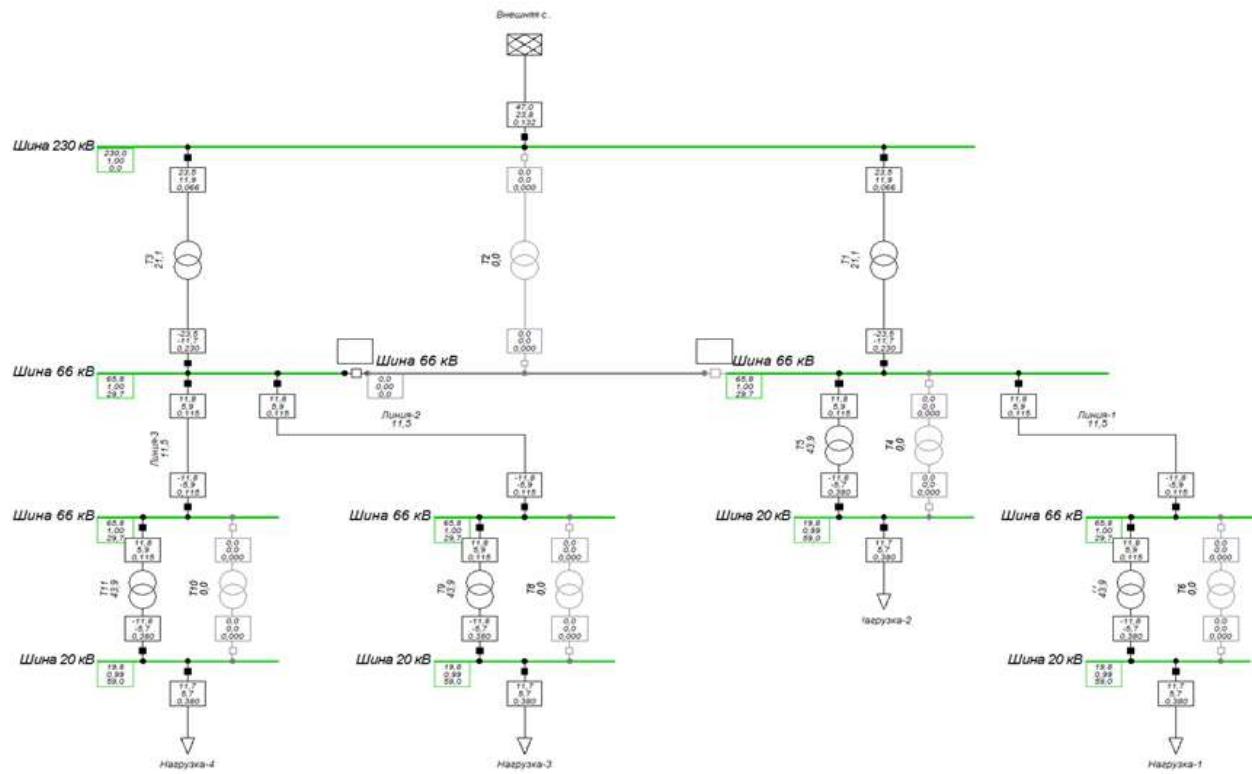


Рис. 1. Модель электрической сети Тартуса
(4 узла нагрузки 66/20 кВ, питание только от внешней системы)

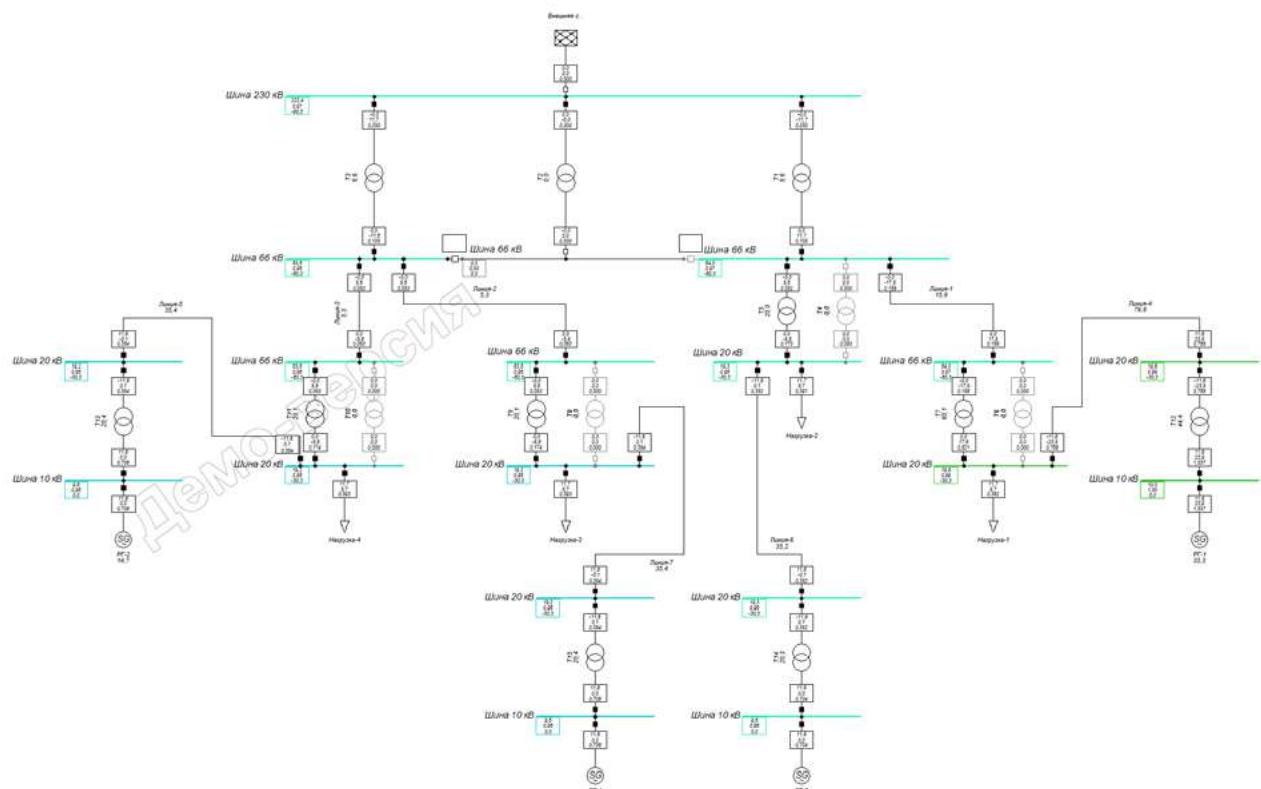


Рис. 2. Модель электрической сети Тартуса с подключенным собственным
энергоцентром распределенной генерации мощностью 18 МВт

ТАБЛИЦА 1. Показатели надежности основных элементов сети
(трансформаторы внешней системы)

Обозначение трансформатора	Номинальное напряжение, кВ	$T_{раб}$, ч	K_g (индивидуальный)	K_{g1} (с учетом резерва)
T1 (230/66 кВ)	230/66	250286	0,9997	0,9999
T2 (66/20 кВ)	66/20	700800	0,9999	0,9999
T3 (20/10 кВ)	20/10	730000	0,9999	0,9999

эквивалентно $\geq 99,99\%$ времени работоспособности. Общесистемный показатель определялся как произведение готовностей последовательно включенных подсистем (сценарий «только сеть») либо по эквивалентным схемам с резервированием (сценарий с собственным энергоцентром). Сравнение вариантов выполнялось по величине общего K_g ; наиболее надежным признан вариант с максимальным K_g .

Моделирование режимов

В DIgSILENT PowerFactory построена расчетная модель системы электроснабжения Тартуса: четыре узла нагрузки 20 кВ (подстанции 66/20 кВ) и внешняя система через два трансформатора 230/66 кВ (см. рис. 1). Проанализированы три сценария:

1. Нормальный без РГ — питание полностью от внешней энергосистемы; рассчитаны распределение нагрузок, потери, уровни напряжений.
2. Нормальный с РГ — к каждой из 4 подстанций подключен ГТЭЦ суммарной мощностью 18 МВт (3×6 МВт, генерация 10 кВ) через трансформаторы 10/20 кВ; оценены перераспределение потоков, изменения потерь и напряжений (см. рис. 2).
3. Аварийный с РГ — внезапное отключение внешней системы (220 кВ) и переход на островную работу от ГТЭЦ; проанализированы во времени отклонения частоты и напряжения, поведение генераторов и нагрузок.

Во всех сценариях использованы паспортные данные ГТЭС-6000 (6 МВт, табл. 4) и трансформаторов ТМН-6300/35 (табл. 5) [10, 11]; нагрузка распределена равномерно по четырем подстанциям.

Технико-экономические расчеты

Выполнена оценка экономической эффективности проекта распределенной газотурбинной генерации (18 МВт) методом чистого дисконтированного дохода:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t},$$

где CF_t формируется как (выручка от отпуска электроэнергии, топливо, эксплуатация) с учетом налога, капитальных вложений и амортизации [12].

Основные инвестиции приходятся на $t = 0$, топливные затраты зависят от годовой генерации и удельного расхода; ценовые допущения приняты по внутренним тарифам Сирии начала 2020-х с индексацией на инфляцию [13]. Ключевые метрики: срок окупаемости (момент перехода накопленного ЧДД в «плюс», см. рис. 3) и приведенная себестоимость 1 кВт · ч; показатели сопоставлены для сценариев с РГ и без нее.

Инженерное обоснование присоединения ЭЦ выполнено для уровней 20/66/230 кВ и различного числа цепей: по методике экономической плотности тока (формула Вейкерта) определены требуемые сечения, далее проверены потери напряжения по $\Delta U \approx I (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$ при допустимых отклонениях $\pm 5\%$ (нормально) и $\pm 10\%$ (предельно) [13]. По результатам (см. табл. 2) рекомендовано подключение на 20 кВ через двухцепные линии с алюминиевым кабелем $2 \times 300 \text{ mm}^2$ к каждой ПС 66/20 кВ: решение минимизирует ΔU и обеспечивает резервирование связи, оставаясь технологически простым для интеграции РГ, несмотря на меньшее требуемое сечение на более высоких напряжениях.

Из табл. 2 следует, что на напряжении 20 кВ для передачи 18 МВт по двум параллельным линиям необходим кабель суммарным сечением около 262 mm^2 на фазу; выбран стандартный кабель $3 \times 300 \text{ mm}^2$, что обеспечивает допустимые потери напряжения ($< 5\%$). На более высоких уровнях (66 кВ, 230 кВ) требуемое

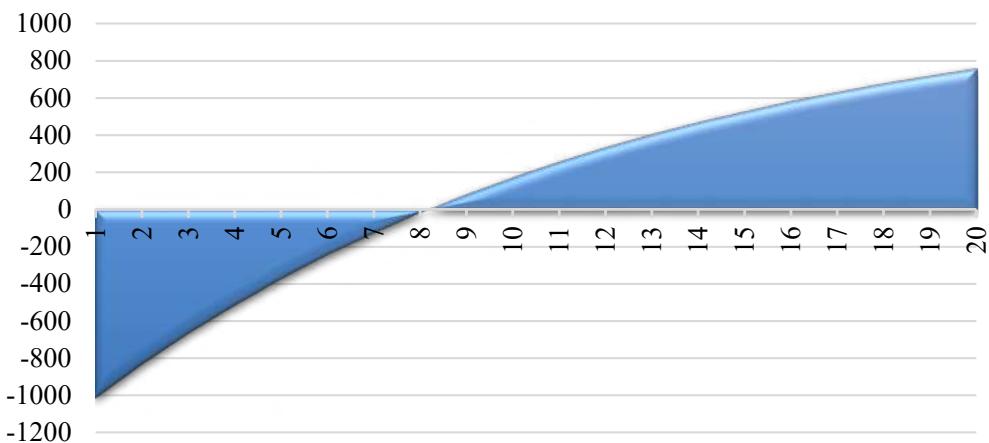


Рис. 3. Накопленный ЧДД (NPV) проекта РГ; горизонтальная линия $NPV = 0$ пересекается на ~ 9 -м году эксплуатации (окупаемость проекта)

ТАБЛИЦА 2. Выбор напряжения и сечения линии для подключения распределенной генерации (18 МВт, 2 цепи)

Уровень напряжения линии, кВ	Ток на одну цепь, А	Эквивалентное требуемое сечение, мм^2	Выбранный тип кабеля (сечение, мм^2)
20 кВ	341	262,3	ААБл $3 \times 300/39$ (300 mm^2)
66 кВ	103	79,5	AC $3 \times 95/16$ (95 mm^2)
230 кВ	29,7	22,8	AC 1×25 (25 mm^2)

сечение значительно меньше, однако реализация подключения на этих напряжениях связана с усложнением схемы (необходимость дополнительных трансформаторов, оборудования высоких классов напряжения). Поэтому, исходя из соображений надежности и экономичности, принят вариант распределенной генерации с присоединением к распределительной сети 20 кВ каждой подстанции города двумя кабельными линиями 20 кВ.

Результаты и их обсуждение

Сравнение надежности вариантов

Расчет показал, что коэффициент готовности системы электроснабжения Тартуса при наличии собственного энергоцентра (РГ) практически не отличается от исходного. Для базового варианта (питание только от внешней сети) $K_g \approx 0,997$, и точно такое же значение получено для случая автономного режима с РГ (табл. 3). Это объясняется тем, что основное влияние на надежность оказывают распределительная сеть 20 кВ и трансформаторы, отказ которых приводит к отключению нагрузки. В сценарии с РГ отключение внешней сети компенсируется работой энергоцентра, однако выход из строя любого узлового элемента (например, трансформатора 66/20 кВ) столь же критичен, как и в исходной схеме. Таким образом, введение распределенной генерации не снижает надежность, что является важным результатом — система с РГ сохраняет уровень безотказности, сравнимый с внешней сетью. В то же время наличие РГ предоставляет дополнительные резервы мощности, которые могут быть задействованы при отказе внешнего источника, повышая уверенность в непрерывности электроснабжения.

Полученное значение $K_g \approx 0,9995$ в режиме параллельной работы указывает на крайне высокую готовность системы (в годовом выражении простои суммарно менее 4–5 часов). Следует отметить, что для поддержания столь высокого уровня надежности в реальных условиях необходимо обеспечить должный резерв мощности генераторов (например, установка дополнительного резервного агрегата) и своевременное обслуживание оборудования [14]. В представленной модели

ТАБЛИЦА 3. Итоговый коэффициент готовности системы электроснабжения

Вариант работы системы	Коэффициент готовности, K_g
Только внешняя энергосистема	0,997
Только автономная генерация (РГ)	0,997
РГ + внешняя сеть (параллельно)	0,99957*

* При установке четырех распределенных генераторов суммарно 18 МВт в модели (по 4,5 МВт эквивалентно на каждый узел нагрузки) получен $K_g \approx 0,99957$ за счет частичного резервирования генераторов в параллельной работе.

резервирование генерации учитывалось условно — работа 3 ГТУ параллельно с возможностью покрытия нагрузки при отключении одного агрегата внешней сетью. Это отражает важное преимущество параллельного режима: внешняя энергосистема может компенсировать выход из строя одного из местных генераторов, сохраняя питание потребителей [9].

Нормальный режим работы

В исходной конфигурации без РГ активные потери в городской сети составляют 0,66 МВт, реактивные — 6,07 Мвар. После ввода собственного энергоцентра (РГ) перетоки перераспределяются: внешняя сеть отдает меньший объем, локальная генерация покрывает значительную часть нагрузки, а суммарные технические потери остаются $\approx 0,65$ МВт. Это объясняется присоединением РГ непосредственно на шинах 20 кВ узлов нагрузки: потери в магистральных линиях 66 кВ практически исчезают, но появляются сопоставимые потери на стороне генераторов и трансформаторов энергоцентра. В результате снижается загрузка внешней сети и повышается устойчивость узлов в пики за счет локального покрытия дефицита и стабилизации напряжения [7].

В качестве источника РГ принята ГТУ ГТЭС-6000 ГЖ: 6 МВт электрической и 12 Гкал/ч тепловой мощности; электрический КПД около 25 %; основное топливо — природный газ, резерв — дизель [11]. Три агрегата формируют энергосцентр 18 МВт, достаточный для покрытия базовой части городского спроса (при выделенной мощности ~ 30 МВт на 2020 г.) [1].

Для полного функционирования энергоцентра также потребовалась установка трансформаторов связи генераторов с сетью. В работе использованы два трехфазных трансформатора ТМН-6300/35 У1 мощностью по 6,3 МВА (напряжение высоковольтной обмотки 20/35 кВ, низковольтной — 6,3–10,5 кВ). Их основные характеристики приводятся в табл. 5 [10]. Два трансформатора обеспечивают резервирование внутри энергоцентра: при выходе одного из строя генерация 18 МВт может быть временно распределена через оставшийся трансформатор с некоторой перегрузкой.

Аварийный режим (отключение внешней сети)

Моделирование аварийного режима показало, что система с распределенной генерацией способна автономно поддерживать электроснабжение города при исчезновении связи с внешней энергосистемой. На рис. 3 представлен график накопленного чистого дисконтированного денежного потока (ЧДД) проекта РГ, а на рис. 4 и 5 — характер отклонения напряжения и частоты в узлах нагрузки сразу после отключения внешней сети.

ТАБЛИЦА 4. Основные характеристики газотурбинной установки ГТЭС 6000 ГЖ [11]

Параметр	Значение
Номинальная электрическая мощность, МВт	6
Номинальная тепловая мощность, Гкал/ч	12,12
КПД на клеммах генератора, %	25
Частота вращения турбины, об/мин	3000
Топливо	природный газ / дизель
Расход топлива на номинале, кг/ч	1830 (газ) / 2180 (дизель)
Температура выхлопных газов, °C	460
Масса агрегата (на раме), т	5,62
Габариты ($D \times Ш \times В$), м	$3,4 \times 2,3 \times 2,5$

ТАБЛИЦА 5. Технические характеристики трансформатора ТМН-6300/35 У1 [10]

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВА	6300
Высшее напряжение, кВ (обмотка ВН)	35 (20)
Низшее напряжение, кВ (обмотка НН)	6,3–10,5
Потери холостого хода ΔP_x , кВт	9,25
Потери короткого замыкания ΔP_k , кВт	46,5
Напряжение короткого замыкания u_k , %	7,5
Ток холостого хода I_x , %	0,9
Масса масла, т	9,43 (из 19,6 — полная масса)
Масса трансформатора, т	17,9 (транспортная) / 19,6 (полная)

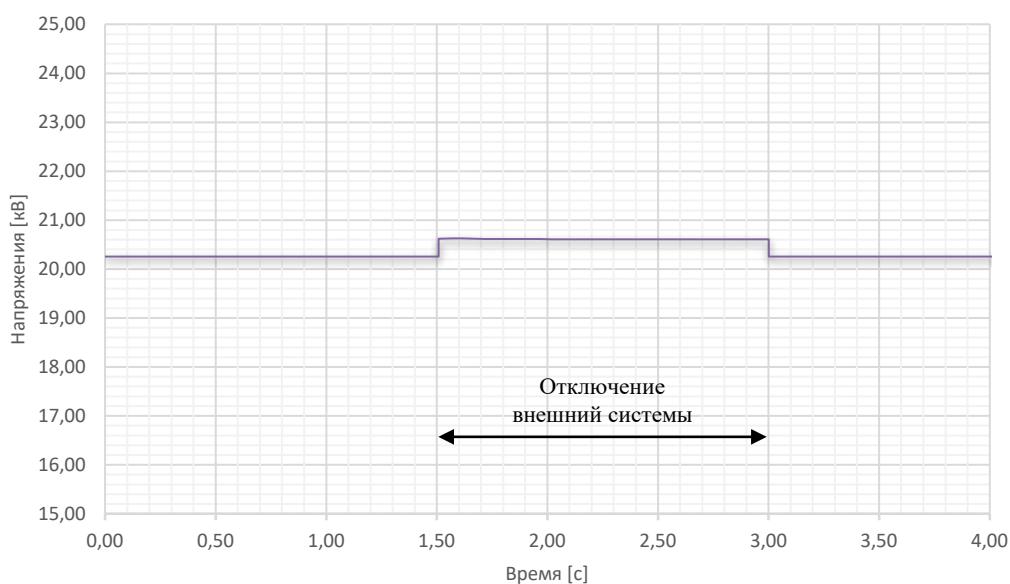


Рис. 4. Отклонение напряжения на шине 20 кВ подстанции при аварийном режиме (отключение внешней сети в момент $t = 1,5$ сек.); пределы нормы $\pm 5\%$ показаны штриховой линией

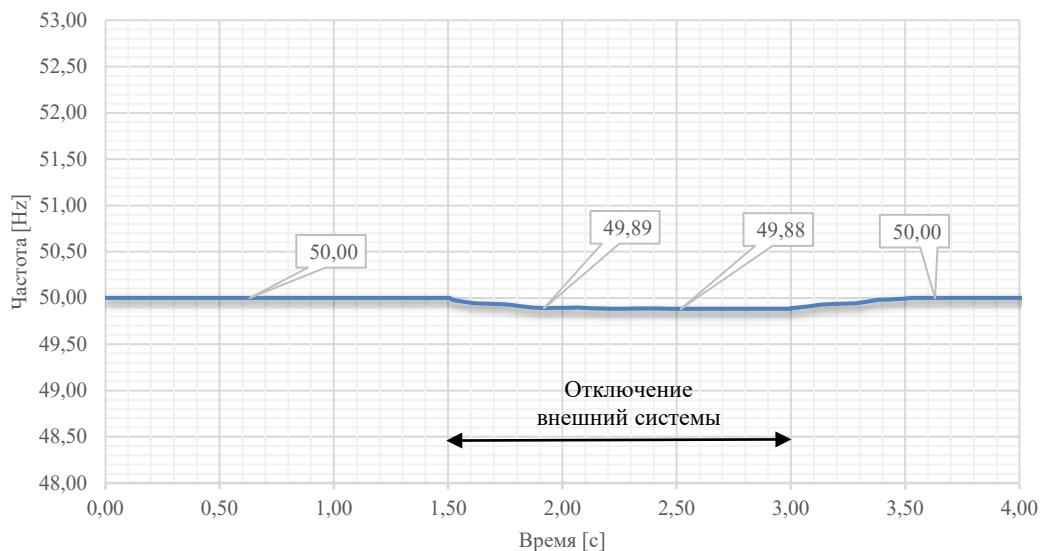


Рис. 5. Отклонение частоты в автономной системе при отключении внешней сети;
пределы отклонения $\pm 0,2$ Гц показаны штриховой линией

После отключения внешней системы параметры остаются в допустимых пределах: напряжение в сети города отклоняется не более чем на 3–4 % (норма $\pm 5\%$ [13]), частота генераторов ГТЭС кратковременно проседает на 0,15–0,2 Гц и быстро стабилизируется к 50 Гц за счет АСР турбин. Система РГ надежно переносит аварийный режим без выхода за нормативы качества электроэнергии, обеспечивая непрерывное питание, в том числе критических потребителей (больницы, водоканал, порт), что подтверждает целесообразность параллельной работы с возможностью автономии при авариях.

Экономически проект окупается ориентировочно за 9 лет: совокупные капиталовложения $\sim 9,66$ млрд руб. (2024 г.), NPV становится положительным на 9-м году, IRR — порядка 10 %. Условная себестоимость генерации — ~ 5 руб/кВт·ч; у СФЭС — 4–6 руб/кВт·ч при субсидиях, но с непостоянной выработкой и потребностью в резерве [7]. Ветровая генерация в условиях Сирии имеет более высокую удельную стоимость из-за слабого ресурса [6]. Следовательно, газотурбинная распределенная генерация — оптимальный компромисс по надежности и экономике для Тартуса.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает целесообразность внедрения распределенной генерации (РГ) для ликвидации дефицита мощности и повышения устойчивости электроснабжения г. Тартуса. Оптимальным признан режим параллельной работы РГ с внешней сетью: в штатных условиях внешняя система покрывает базовую нагрузку, РГ компенсирует пики и дефицит; при авариях локальная

генерация временно обеспечивает автономию питания потребителей. В качестве базового источника РГ рекомендованы газотурбинные установки средней мощности — благодаря быстрой мобилизации, маневренности и приемлемой окупаемости (~ 9 лет); ветровая генерация неперспективна из-за слабого ресурса [6], а полноценное замещение солнечными станциями потребовало бы сотен МВт, что выходит за рамки РГ [7]. Принята децентрализованная схема присоединения на уровне 20 кВ к четырем подстанциям города (двухцепные линии 2×300 мм 2), что повышает отказоустойчивость и снижает сетевые потери [3]. Моделирование и расчеты подтверждают: коэффициент готовности системы $\approx 0,999$; в автономии отклонение напряжения $\leq \pm 5\%$, частоты $\leq \pm 0,2$ Гц; условная себестоимость ~ 5 руб/кВт · ч; срок окупаемости ~ 9 лет. С учетом выявленного дефицита и износа инфраструктуры внедрение ГТ-энергоцентра 18 МВт с параллельной работой обосновано и необходимо [1, 2].

Список источников

1. Электроснабжение в Тартусе в худших состояниях // Оукат аш-Шам. — URL: <https://goo.su/fO9C2MV> (дата обращения: 11.07.2025).
2. Состояние электроснабжения в Сирии и перспективы решения проблемы // Аль-Маядин. — URL: <https://goo.su/wRp4mvY> (дата обращения: 15.07.2025).
3. Хоссам Э. Оценка производительности электросети распределения в городе Тартус: дис. ... канд. техн. наук: 13.04.02 / Э. Хоссам. — Латакия, 2019. — 113 с.
4. Al Halabi I. Status of energy in Syria — Study on how to meet the energy shortage by means of renewable resources / I. Al Halabi, S. Das, G. Warkozek, B. Misra // IEEE Xplore. — 2021. — P. 6. — DOI: 10.1109/IREC51415.2021.9427837.
5. Aljendy R. I. Optimal Installed Capacity of Renewable Energy Sources for Active Power Shortage Minimization / R. I. Aljendy, R. R. Nasyrov, V. N. Tulsky, H. M. Sultan // IEEE Xplore. — 2019. — P. 6. — DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877659.
6. Алджамил А. Оценка ветровых ресурсов Сирии и обоснование их более широкого использования: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.08 / А. Алджамил. — СПб., 2020. — 140 с.
7. Ramadan A. Techno-Economic Evaluation of a Grid-Connected Solar PV Plant in Syria / A. Ramadan, V. Elistratov // Applied Solar Energy. — 2019. — Vol. 55. — Iss. 3. — Pp. 174–188.
8. Артемьев И. Б. Выбор генерирующего оборудования для объектов распределенной генерации / И. Б. Артемьев, А. М. Синельников // Турбины и Дизели. — 2015. — № 3–4 (март — апрель).
9. ГОСТ Р 27.002—2009. Надежность в технике. Термины и определения. — Введ. 2009-07-01. — М.: Стандартинформ, 2009.
10. Трансформаторы. Технические характеристики, обозначение трансформаторов // ЭлектроТехИнфо. — URL: https://eti.su/articles/spravochnik/spravochnik_1734.html (дата обращения: 23.07.2025).

11. Газотурбинные электростанции (ГТУ) // ПКФ «ТСК». — URL: <https://pkftsk.ru/gas-turbine.html> (дата обращения: 23.07.2025).
12. Климовец О. В. Оценка экономической эффективности электроснабжения промышленного предприятия с использованием распределенной генерации / О. В. Климовец // CyberLeninka. — 2016. — 5 с.
13. Удинцев Д. Н. Оценка потенциала выработки электроэнергии из отходов жизнедеятельности человека в системах электроснабжения городов / Д. Н. Удинцев, Г. В. Шведов, Е. С. Королева и др. // Электроэнергия: передача и распределение. — 2020. — № 3. — С. 14–18.
14. 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.

Дата поступления: 29.06.2025

Решение о публикации: 29.07.2025

Контактная информация:

РАДИ Мангалль Рияд — аспирант; manhalradi67@gmail.com

ШЕВЛЮГИН Максим Валерьевич — канд. техн. наук, доц.; mx_sh@mail.ru

Integration of Distributed Gas-Turbine Generation into the Power Supply System of Tartus (Syrian Arab Republic): Reliability and Techno-Economic Efficiency

M. V. Shevlyugin, M. R. Radi

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Shevlyugin M. V., Radi M. R. Integration of Distributed Gas-Turbine Generation into the Power Supply System of Tartus (Syrian Arab Republic): Reliability and Techno-Economic Efficiency. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 37–50. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-37-50

Summary

Purpose: To substantiate a method for enhancing the reliability and cost-effectiveness of the insufficient power supply system in the city of Tartus by deploying distributed gas-turbine generation. **Methods:** 1. Analytical calculation of the availability coefficient in accordance with GOST R 27.002-2009 for three supply scenarios: exclusively from the external grid, islanded operation, and parallel operation with distributed generation. 2. Simulation of both normal and emergency operating conditions in PowerFactory and RastrWin 3, focusing on the assessment of power losses, as well as voltage and frequency variations. 3. A techno-economic evaluation of an 18 MW gas-turbine power centre employing the net discount method. **Results:** The results obtained demonstrate that the integration of distributed generation does not compromise reliability. The overall system availability coefficient achieves a value of 0.999, which is comparable to the baseline and exceeds the regulatory requirements. In islanded operation, voltage deviation remains within $\pm 5\%$, and frequency within ± 0.2 Hz. The economic calculation indicates a payback period of approximately 9 years, with a unit cost of generation of about 5 RUB/kWh. **Practical significance:** An optimal configuration of gas-turbine distributed generation and its interconnection scheme (20 kV, double-circuit lines 2×300 mm 2) will enhance supply

resilience for the city's critical consumers and reduce dependence on the external power system. The findings of this study can serve as a methodological basis for modernization of power systems in other regions facing similar capacity deficits.

Keywords: Distributed generation, power supply reliability, availability coefficient, gas-turbine unit, renewable energy sources, cost-effectiveness, power system, Tartus.

References

1. *Elektrosnabzhenie v Tartuse v khudshikh sostoyaniyakh* [Electricity supply in Tartus is in the worst condition]. Oukat ash-Sham. Available at: <https://goo.su/fO9C2MV> (accessed: July 11, 2025). (In Russian)
2. *Sostoyanie elektrosnabzheniya v Sirii i perspektivy resheniya problemy* [The state of electricity supply in Syria and prospects for solving the problem]. Al'-Mayadin. Available at: <https://goo.su/wRp4mvY> (accessed: July 15, 2025). (In Russian)
3. Khossam E. *Otsenka proizvoditel'nosti elektroseti raspredeleniya v gorode Tartus: dis. ... kand. tekhn. nauk: 13.04.02* [Evaluation of the performance of the power distribution network in the city of Tartus: Dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 13.04.02]. Latakiya, 2019, 113 p. (In Russian)
4. Al Halabi I., Das S., Warkozek G., Misra B. Status of energy in Syria — Study on how to meet the energy shortage by means of renewable resources. IEEE Xplore, 2021, p. 6. DOI: 10.1109/IREC51415.2021.9427837.
5. Aljendy R. I., Nasyrov R. R., Tulsky V. N., Sultan H. M. Optimal Installed Capacity of Renewable Energy Sources for Active Power Shortage Minimization. IEEE Xplore, 2019, p. 6. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877659.
6. Aldzhamil A. *Otsenka vetrovykh resursov Sirii i obosnovanie ikh bolee shirokogo ispol'zovaniya: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.08* [Evaluation of wind resources in Syria and justification of their wider use: Dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.14.08]. St. Petersburg, 2020, 140 p. (In Russian)
7. Ramadan A., Elistratov V. Techno-Economic Evaluation of a Grid-Connected Solar PV Plant in Syria. Applied Solar Energy, 2019, vol. 55, Iss. 3, pp. 174–188.
8. Artem'ev I. B., Sinel'nikov A. M. Vybor generiruyushchego oborudovaniya dlya ob"ektov raspredelennoy generatsii [Selection of generating equipment for distributed generation facilities]. *Turbiny i Dizeli* [Turbines and Diesels]. 2015, March — April. (In Russian)
9. *GOSTR 27.002—2009. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [Reliability in technology. Terms and definitions]. Introduced: 2009-07-01. Moscow: Standartinform Publ., 2009. (In Russian)
10. *Transformatory. Tekhnicheskie kharakteristiki, oboznachenie transformatorov* [Transformers. Technical characteristics, transformer designation]. ElektroTekhInfo. Available at: https://eti.su/articles/spravochnik/spravochnik_1734.html (accessed: July 23, 2025). (In Russian)
11. *Gazoturbinnye elektrostantsii (GTU)* [Gas turbine power plants (GTU)]. PKF "TSK". Available at: <https://pkftsk.ru/gas-turbine.html> (accessed: July 23, 2025). (In Russian)
12. Klimovets O. V. *Otsenka ekonomiceskoy effektivnosti elektrosnabzheniya promyshlennogo predpriyatiya s ispol'zovaniem raspredelennoy generatsii* [Evaluation of the economic efficiency of industrial enterprise power supply using distributed generation]. CyberLeninka, 2016, p. 5. (In Russian)

13. Udimtsev D. N., Shvedov G. V., Koroleva E. S. et al. Otsenka potentsiala vyrabotki elektroenergii iz otkhodov zhiznedeyatel'nosti cheloveka v sistemakh elektrosnabzheniya gorodov [Assessment of the potential for generating electricity from human waste in urban power supply systems]. *Elektroenergiya: peredacha i raspredelenie* [Electric Power: Transmission and Distribution]. 2020, Iss. 3, pp. 14–18. (In Russian)
14. Udimtsev D. N., Shvedov G. V., Shonin M. E. Vybor chisla i moshchnosti generiruyushche-go oborudovaniya energotsentrov v avtonomnykh sistemakh elektrosnabzheniya i v sistemakh s raspredelennoy generatsiey [Selection of the number and capacity of generating equipment for energy centers in autonomous power supply systems and in systems with distributed generation]. *Energetik* [Power Engineer]. 2020, Iss. 2. (In Russian)

Received: June 29, 2025

Accepted: July 29, 2025

Author's information;

Mangal R. RADI — Postgraduate Student; manhalradi67@gmail.com

Maksim V. SHEVLYUGIN — PhD in Engineering, Associate Professor; mx_sh@mail.ru

УДК 629.4.023.1

Современные технологические процессы сварки и их эффективность при изготовлении кузовов высокоскоростного транспорта

Д. П. Кононов, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко

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

Для цитирования: Кононов Д. П., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г. Современные технологические процессы сварки и их эффективность при изготовлении кузовов высокоскоростного транспорта // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 51–63. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-51-63

Аннотация:

Цель: Установить, какие материалы наиболее перспективны для создания кузовов поездов ВСТ, и выбрать оптимальные способы сварки для выполнения их сборки. **Методы:** Анализ свойств применяемых и перспективных металлов, используемых при производстве кузовов скоростных поездов ведущими производителями подвижного состава в Европе, Японии и Китае. **Результаты:** Для создания кузовов ВСТ наиболее широко применяются конструкции из нержавеющей стали и алюминиевых сплавов, соединяемые различными методами сварки. Сделан вывод, что в настоящее время лазерная сварка является наиболее технологичным методом благодаря высокой степени автоматизации и превосходному качеству получаемых сварных соединений. **Практическая значимость:** Рекомендации могут быть использованы конструкторами и вагоностроителями для создания и постройки первого российского высокоскоростного поезда «Белый кречет».

Ключевые слова: Изготовление кузова ВСТ, материал для кузова, технология сварки, автоматизация сварки, применение сварочных роботов, дефект сварного шва, анализ деформации и напряжения в соединении.

Изготовление кузова — один из самых сложных процессов при производстве высокоскоростных транспортных средств (ВСТ). С одной стороны, кузов должен быть как можно легче и обладать отличными аэродинамическими свойствами; с другой стороны, факторы пассивной безопасности, обеспечиваемые жесткостью кузова, имеют большое значение для безопасности пассажиров [1]. Для удовлетворения этих требований постоянно совершенствуются технологии сборки кузовов вагонов [2].

В основном для производства кузова применяют нержавеющие стали и различные сплавы алюминия [3–5]. Конструкция кузова из нержавеющей стали позволяет снизить вес на 10–20 % по сравнению с обычной конструкцией стального кузова. Благодаря хорошей коррозионной стойкости кузов не нуждается в покраске, что значительно сокращает трудозатраты на производство. В настоящее время в кузовостроении в основном используются нержавеющие стали марки SUS304 и SUS301L (обозначение по японскому стандарту JIS), эта же сталь обозначается по американскому стандарту — AISI304 и AISI301L. Обе эти марки стали имеют

высокую коррозионную стойкость, однако сталь марки 301 несколько более склонна к ржавлению и коррозии в сложных условиях эксплуатации, чем сталь 304 (табл. 1). Это все аналоги широко применяемой отечественной стали А2.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав нержавеющих сталей марок SUS304 и SUS301L

Химический элемент и его содержание, %	Марка нержавеющей стали	
	SUS301	SUS304
Хром	16–18	18–20
Никель	6–8	8–10,5
Углерод, не более	0,15	0,08

Букву L в конце обозначения стали следует понимать как «низкоуглеродистая». Этот сплав содержит всего 0,02 % углерода вместо 0,05 %, что не оказывает влияние на качество стали, но зато увеличивает ее стойкость при горячей сварке в среде TIG или MIG.

Сталь марки SUS304 (AISI 304) пользуется самым высоким спросом из класса нержавеющих. Высокая востребованность и широкое применение связаны в первую очередь с универсальностью ее свойств. Существует множество методов сварки нержавеющей стали, таких как контактная точечная сварка, плазменная сварка, водородная дуговая сварка и т. д. [6].

Промышленные алюминиевые сплавы подразделяются на две группы: деформируемые (конструкционные) и литейные. Деформируемые сплавы служат для изготовления полуфабрикатов прокаткой, прессованием, ковкой, а литейные сплавы применяются для получения отливок.

Алюминиевые деформируемые сплавы серий 5000, 6000 и 7000 (обозначение по системе **Aluminum Association** — США и Канада) широко применяются при производстве корпусов ВСТ с применением сварочных работ, где необходимы высокие технические характеристики материалов.

Сплавы серии 5000 представляют собой сплавы Al-Mg. Так, например, алюминиевый сплав 5005, обычно содержащий 0,8 % Mg, обладает высокой прочностью, хорошей свариваемостью и коррозионной стойкостью. Этот сплав является нетермообрабатываемым, его можно укрепить методом холодной обработки.

Сплавы серии 6000 представляют собой сплавы Al-Mg-Si. Они обладают хорошей прочностью и коррозионной стойкостью и являются хорошим конструкционным материалом. Однако сварные соединения имеют низкое качество, поэтому большинство конструкций собирается с помощью небольших винтов, заклепок и болтов.

Сплавы серии 7000 представляют собой сплавы Al-Zn-Mg. В целом алюминиевые сплавы имеют множество достоинств, таких как хорошая коррозионная устойчивость, оптимальное соотношение массы и прочности. Облегченная

конструкция с использованием специальных алюминиевых сплавов и специально разработанных профилей значительно снижает нагрузку на полотно пути. В то же время они так же прочны и безопасны, как и их более тяжелые стальные аналоги.

В России недавно был создан отечественный сплав 1343 (алюминий-кремний-магний) для создания конструкций кузовов высокоскоростных поездов, являющийся аналогом зарубежного сплава 6005. Благодаря оптимизации химического состава российский сплав имеет более высокие характеристики по сравнению с зарубежными аналогами. Удалось повысить его усталостную долговечность на 12–15 %, а прочность увеличить на 5 %.

Алюминий лучше поглощает и гасит вибрации, чем сталь. Даже при сильных ударах алюминиевые компоненты поглощают не менее 50 % энергии удара, не давая ей распространяться дальше. Алюминиевые кузова более жесткие на скручивание, что обеспечивает их повышенную устойчивость.

При сварке алюминиевых сплавов, учитывая их особенности (высокую скорость окисления, неизменность цвета при нагревании и значительную усадку), могут возникать различные дефекты. Механические и физико-химические свойства алюминия определяют сложность его сварки. При сварке алюминиевого кузова правильный выбор метода сварки существенно влияет на предотвращение дефектов. Алюминий и его сплавы при плавлении и повторном затвердевании претерпевают объемные изменения (до 4 %), что приводит к значительным искажениям швов и образованию трещин.

Существует множество методов сварки кузовов из нержавеющей стали и алюминиевых сплавов. Рассмотрим наиболее распространенные из них.

Контактная сварка выполняется при низком напряжении и высоком токе для обеспечения достаточного количества энергии, необходимой для нагрева материала и устранения потенциальных источников опасности.

Существуют различные виды контактной сварки:

– *Точечная сварка* — важнейший метод в автомобильном производстве.

Современные системы электронного управления сделали возможной сварку высокопрочных сталей и сталей с покрытием. При соединении деталей возможно использование kleev для повышения прочности, твердости и устойчивости к вибрации.

– *Стыковая сварка* применяется исключительно для сборки не несущих соединений.

Преимущества сварки сопротивлением:

- высокое качество получаемых соединений;
- высокая производительность;
- отсутствие необходимости в расходных материалах;
- низкие требования к качеству сопрягаемых соединений;

– отсутствие потребности в дорогостоящем оборудовании для контроля сварного шва.

Недостатки контактной точечной сварки:

- значительная сложность используемого оборудования;
- относительно высокое энергопотребление;
- возможные утечки в местах соединений;
- необходимость изготовления большого количества перекрывающихся деталей, что ведет к повышенному расходу материала.

MIG/MAG (MetalInert/ActiveGas) — полуавтоматическая дуговая сварка плавящимся электродом. Сварка в среде инертного/нейтрального защитного газа широко распространена и является универсальным методом сварки стали для промышленного применения и иногда называется GMA (gas metal arc). Сварка MIG/MAG подходит как для автоматизированной, так и для роботизированной сварки. Можно применять смеси газов, содержащих углекислый газ, аргон, кислород, гелий и азот. Сварка MIG в основном используется для сварки деталей толщиной более 3 мм.

Сварку кузова ВСТ из нержавеющей стали лучше всего проводить по технологии TIG (argonodуговая сварка неплавящимся электродом), ее целесообразно применять для листов толщиной 0,5–8 мм. Для тонких листов (до 2,5 мм) требуется особая аккуратность и точная настройка оборудования. Данная технология обеспечивает высокое качество сварного шва, однако для толстых листов (например, 8 мм) необходима разделка кромок и выполнение нескольких проходов.

Наиболее характерным дефектом при этом виде сварки является появление трещин в сварном шве. При автоматической и полуавтоматической дуговой сварке, а также при сварке в инертном газе плавящимися и неплавящимися электродами могут возникать термические трещины и трещины напряжения. Так, алюминиевый сплав серии 6000 более подвержен образованию трещин, чем другие (рис. 1) [7].



Рис. 1. Растрескивание сварочного шва после сварки алюминиевого сплава [7]

В некоторых случаях проблема термического растрескивания при сварке алюминия может быть решена путем подбора присадочного металла, химические свойства которого менее склонны к образованию трещин в процессе сварки.

Данный метод сварки получил широкое распространение в Европе, США и Японии благодаря простоте автоматизации и высокой производительности. Сварка полуавтоматическим дуговым плавящимся электродом активно применяется и отечественными производителями, например, при проведении сварочных работ по производству кузова российского электропоезда «Финист» (рис. 2) [8].



Рис. 2. Роботизированная сварка алюминиевого корпуса в среде защитного газа на предприятии «Уральские локомотивы» [8]

Сварка трением с перемешиванием (STP) — это процесс преобразования механической энергии, возникающей при движении одного из компонентов, в тепловую энергию. В результате трения вращающегося инструмента между двумя соединенными торцами деталей возникает нагрев, и за счет пластического деформирования между соединяемыми частями устанавливаются межатомные связи. Швы, получаемые этим методом сварки, образуются без расплавления металла. Металл разогревается до пластичного состояния и перемешивается рабочим инструментом.

Фрикционная сварка является прогрессивным способом сварки. Благодаря небольшому объему нагреваемого слоя металла, сварочный цикл может быть выполнен за короткое время, зависящее от свойств материала. Сварка трением имеет высокую производительность, сравнимую с контактнойстыковой сваркой. Данная технология сварки позволяет избежать серьезных деформаций и растрескивания сварного шва.

Эффективность и энергоэффективность этого вида сварки в 5–10 раз выше, чем у стыковой сварки. Сварка трением с перемешиванием является относительно автоматизированной и может выполняться без вмешательства человека. Кроме

того, этот метод сварки требует вдвое меньше энергопотребления по сравнению со сваркой плавлением. Обычная сварка корпуса увеличивает его вес за счет сварных швов из присадочного металла. Сварка трением с перемешиванием не изменяет его веса, что особенно важно при высоких скоростях движения современных скоростных поездов.

Такая сварка может выполняться только на стационарных машинах значительных размеров, поэтому при использовании переносного оборудования по данной технологии очень трудно приварить мелкие детали к крупной конструкции.

При сварке трением алюминия и его сплавов в некоторых случаях могут возникать дефекты, связанные с образованием пор, трещин, непроваров, а также с изменением структуры металла в окколошовной зоне. Качество сварного шва может ухудшить неправильный выбор параметров сварки, загрязнение свариваемых поверхностей и недостаточная пластичность металла.

Наиболее часто встречающимся дефектом является непровар корня шва, который характеризуется отсутствием металлических связей по сечению свариваемых кромок деталей. Дефект возникает из-за невозможности расплавленного металла достичь корня шва. В конце сварного шва на выходе рабочего инструмента образуется отверстие. На поверхности неизбежно появляются дефекты в виде лунок, в которых могут оставаться твердые включения, такие как остатки поврежденного рабочего инструмента, пыль и остатки смазочного материала.

Для выявления дефектов в сваренных по технологии STP алюминиевых пластинах толщиной 3,5 мм следует применять метод неразрушающего контроля — ультразвуковую дефектоскопию. Например, современный дефектоскоп модели A1550 IntroVisor, который необходимо настроить на выявление вертикальных трещин в сварном шве. Проведение контроля позволило обнаружить дефекты в зонах 1–5, представленные на рис. 3 [9].

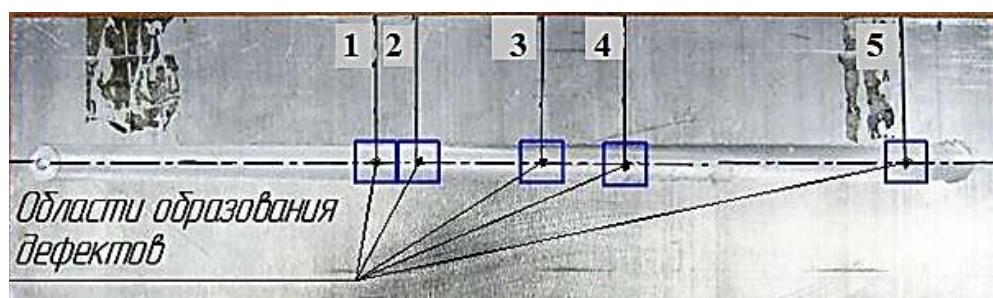


Рис. 3. Образование дефектов при сварке трением с перемешиванием [9]

Лазерная сварка — современный и технологичный метод соединения материалов. В производстве кузовов этот процесс преимущественно используется для соединения перекрывающихся деталей, то есть лист к листу, лист к отливке и отливка к экструдированному профилю [10]. Данный метод является альтернативой точечной сварке, клепке и сварке в инертном газе. По сравнению с другими

сварочными процессами лазерная сварка требует минимального объема отделочных работ.

Бесшовная сварка может быть достигнута исключительно при использовании лазерного метода. Лазерный луч расплавляет материал свариваемой панели, при необходимости добавляется сварочная проволока. Применение защитных газов предотвращает химическую реакцию металла с компонентами окружающего воздуха [11, 12].

Процесс характеризуется высокой степенью автоматизации с использованием различных систем, одной из которых является роботизированный модуль KUKA (рис. 4), широко применяемый при производстве железнодорожного подвижного состава. Благодаря роботизированной руке сварочная камера KUKA способна выполнять сложные и уникальные сварочные задачи, включая объемную сварку. Лазер обеспечивает обработку швов в труднодоступных местах с высоким качеством сварки.

Недостатки метода связаны с тем, что лазерная сварка — это чисто производственный процесс, который требует дорогостоящего оборудования, строгого соблюдения требований к сборке и тщательной подгонки компонентов перед сваркой.

Теоретически возможно расширить область применения лазерной сварки путем приобретения и установки более дорогостоящего оборудования, однако это экономически нецелесообразно. Кроме того, лазерное оборудование демонстрирует низкую устойчивость к экстремальным температурам, в то время как другое сварочное оборудование функционирует без сбоев в аналогичных условиях. Формирование сварного шва может сопровождаться квазипериодической нестабильностью поверхности, известной как хампинг-эффект (рис. 5) [13].



Рис. 4. Роботизированные комплексы KUKA для лазерной сварки [11]

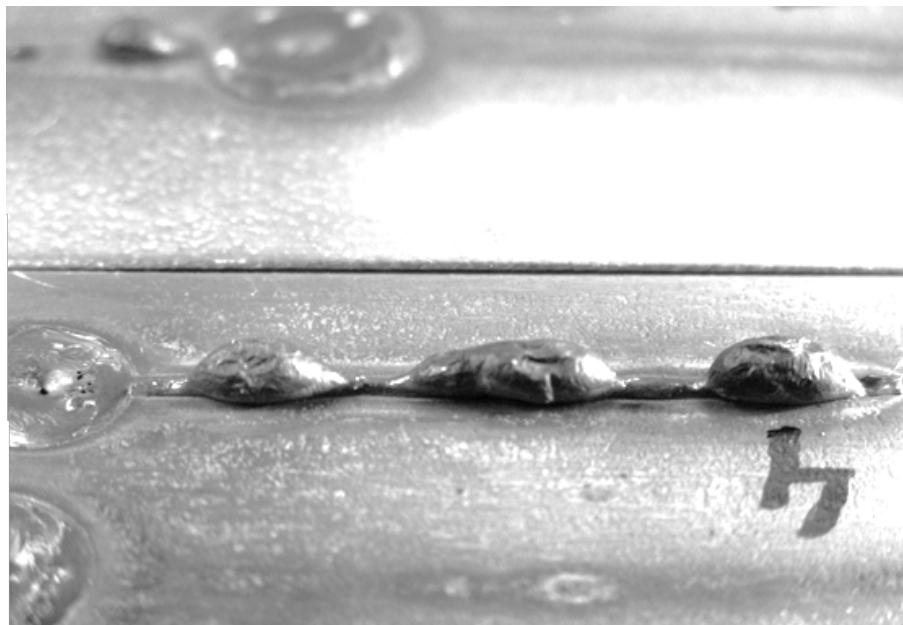


Рис. 5. Квазипериодические волны расплава на поверхности шва (хампинг-эффект) [13]

Эффект хампинга при лазерной сварке возникает при работе с присадочной проволокой, которую погружают в жидкую сварочную ванну. Если проволока погружается слишком глубоко в расплав, это может привести к выбросу металла и образованию дефектов в виде отверстий или неровностей на поверхности шва. Данный эффект считается нежелательным дефектом, который возникает под влиянием различных факторов.

Устранить этот дефект позволяют:

- правильный подбор параметров сварки
- контроль глубины погружения проволоки
- применение защитных газов
- создание стабильной сварочной среды

Применение лазера оправдано как с экономической, так и с производственной точки зрения. Преимущественно лазерная сварка используется для выполнения внутренних соединений.

При проведении любых сварочных работ необходим анализ деформаций и напряжений в соединении. В конструкции различают:

- **Временные напряжения и деформации**, которые возникают из-за изменения температуры в процессе сварки
- **Постоянные напряжения и деформации**, которые формируются после завершения сварки и остывания конструкции. Они появляются в локальной области сжатой конструкции, когда напряжение в этой области превышает предел текучести конструкционного материала

Растягивающие остаточные напряжения считаются крайне нежелательными (рис. 6).

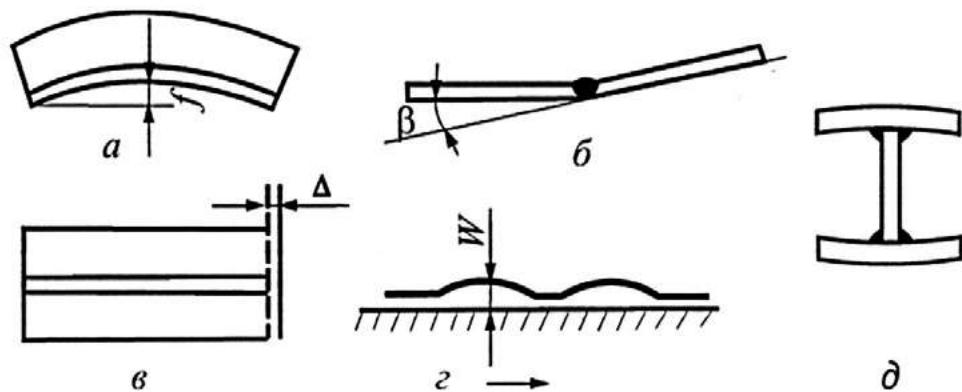


Рис. 6. Основные виды деформации сварных конструкций:
 а — прогиб; б — угол поворота; в — укорочение; г — выход из плоскости равновесия; д — грибовидность полок [14]

Для предотвращения деформации швов и напряжений в сборочных чертежах сварных конструкций должны учитываться меры, которые позволяют снизить напряжения и деформации сварного шва. К этим мероприятиям относятся: применение минимального количества сварных швов наименьшего размера, уменьшение поперечных швов и швов разной толщины, не слишком быстрое изменение поперечного сечения сварных элементов и минимизация количества наплавленного металла.

Например, использовать двусторонние сварные швы с X- и К-образными разделками кромок, если толщина металла превышает 12 мм и односторонняя сварка невозможна, не располагать сварные швы в зонах наибольшего напряжения при эксплуатации изделия и добавлять припуски на изменение размеров к номинальным размерам конструкции.

Таким образом, результаты анализа, выполненного отечественными и зарубежными учеными, свидетельствуют о том, что на данный момент именно лазерная сварка является наиболее технологичным методом сборки кузовов ВСТ благодаря высокой степени автоматизации и отличным показателям качества сварных соединений.

Для производства кузова российского высокоскоростного поезда (начало сварочных работ запланировано на осень 2025 г.) целесообразно использовать комплекс современных сварочных технологий, включающих автоматическую аргонодуговую сварку, лазерную сварку, сварку трением с перемешиванием

Список источников

- Киселев И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт: общий курс: учебное пособие в 2 томах / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, Н. С. Бушуев, А. П. Ледяев и др. — М., 2014. — Т. 1.

2. Кондратенко В. Г. Совершенствование технологии сборки кузовов железнодорожных вагонов / В. Г. Кондратенко, А. М. Будюкин, Е. Р. Жуков // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2017. — С. 98–101.
3. Жуков Е. Р. Современные материалы и конструкции, применяемые для отечественных железнодорожных вагонов / Е. Р. Жуков, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2017. — С. 95–98.
4. Костюкович Е. А. Анализ требований к материалам деталей подвижного состава, эксплуатируемых в условиях низких температур, с целью снижения хрупкого разрушения / Е. А. Костюкович, А. М. Будюкин // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2018. — С. 96–98.
5. Стефанишина А. Н. Применение современных инновационных материалов в конструкции подвижного состава / А. Н. Стефанишина, П. Е. Федорчук, А. М. Будюкин, С. В. Урушев // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2018. — С. 111–117.
6. Василенко П. Г. Оценка результатов внедрения современных методов сварки кузовов локомотивов / П. Г. Василенко, А. М. Будюкин // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2017. — С. 37–38.
7. Как предотвратить проблемы при сварке алюминия? // URL: <https://blog.svarcom.net/news/222problemy-pri-svarke-alyuminiya.html> (дата обращения: 16.08.2025).
8. «Уральские локомотивы» начали подготовку к производству высокоскоростных поездов // URL: <https://rollingstockworld.ru/passazhirskij-ps/uralskie-lokomotivy-nachali-podgotovku-k-proizvodstvu-vysokoskorostnyh-poezdov/> (дата обращения: 16.08.2025).
9. Кривонос Е. В. Анализ дефектов, возникающих при сварке трением с перемешиванием / Е. В. Кривонос, И. К. Черных, Е. Н. Матузко, Е. В. Васильев // Машиностроение и машиноисследование. Омский научный вестник. — 2017. — № 2(152). — С. 24–27.
10. Sibillano T. Spectroscopic monitoring of penetration depth in CO₂ Nd: YAG and fiber laser welding processes / T. Sibillano, D. Rizzi, A. Ancona, S. Saludes-Rodil et al. // Journal of Materials Processing Technology. — 2015. — Pp. 910–915.
11. Автоматическая сварка изделий из алюминиевых сплавов: особенности технологии, реализация в виде комплексной автоматизированной системы и роботизированного комплекса. — URL: https://www.aluminas.ru/upload/iblock/8d8/_-_-_-_.pdf (дата обращения: 16.08.2025).
12. Универсальный сварочный робототехнический комплекс KUKA. — URL: <https://automachin.com/projects/svarka/universalnyy-svarochnyy-robototekhnicheskiy-kompleks-avv/> (дата обращения: 16.08.2025).

13. Хаскин В. Ю. Возникновение хампинг-эффекта при лазер-MIG сварке высокопрочной стали АН-32 / В. Ю. Хаскин, В. Н. Коржик, И. Н. Ключков, Д. Цай и др. // TECHNICAL SCIENCE. Colloquium-journal. — 2019. — № 13(37). — С. 19–24.

14. Юхин Н. А. Дефекты сварных швов и соединений / Н. А. Юхин. — М.: СОУЭЛО, 2007. — 56 с.

Дата поступления: 05.06.2025

Решение о публикации: 31.08.2025

Контактная информация:

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — д-р техн. наук, доц.; d_kononov@mail.ru

БУДЮКИН Алексей Митрофанович — канд. техн. наук, доц.; remont_ps21@mail.ru

КОНДРАТЕНКО Владимир Григорьевич — канд. техн. наук, доц.; tehmet_pgups@mail.ru

Contemporary Welding Processes and Their Efficiency in the Manufacturing of High-Speed Railway Car Bodies

D. P. Kononov, A. M. Budyukin, V. G. Kondratenko

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

For citation: Kononov D. P., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Contemporary Welding Processes and Their Efficiency in the Manufacturing of High-Speed Railway Car Bodies. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 51–63. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-51-63

Summary

Purpose: To determine the most promising materials for creating the HSR car bodies. To select the optimal welding methods for their assembly. **Methods:** An analysis of the properties of current and prospective metals used in the manufacture of high-speed railway car bodies by leading rolling stock manufacturers in Europe, Japan and China. **Results:** In the fabrication of HST car bodies, the most prevalent structures are composed of stainless steel and aluminum alloys, which are joined by various welding methods. At present, laser welding has been found the most technologically advanced method, due to its high degree of automation and the high quality of the resulting welded joints. **Practical significance:** The recommendations stated in the paper are intended for designers and railway car body builders to create and build the first Russian high-speed train, the "White Gyrfalcon".

Keywords: HST body manufacturing, car body material, welding technology, welding automation, use of welding robots, welded joint defect, analysis of deformation and stress in the joint.

References

1. Kiselev I. P., Blazhko L. S., Bushuev N. S., Ledyayev A. P. et al. *Vysokoskorostnoy zhelezno-dorozhnyy transport: obshchiy kurs: uchebnoe posobie v 2-kh tomakh* [High-speed railway transport: general course: textbook in 2 volumes]. Moscow, 2014, vol. 1. (In Russian)
2. Kondratenko V. G., Budyukin A. M., Zhukov E. R. *Sovershenstvovanie tekhnologii sborki kuzovov zheleznodorozhnykh vagonov* [Improving the technology of assembling railway car bodies].

Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Advanced technologies applied in the repair of railway rolling stock: collection of conference proceedings of students, postgraduates and young scientists]. 2017, pp. 98–101. (In Russian)

3. Zhukov E. R., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Sovremennye materialy i konstruktsii, primenyaemye dlya otechestvennykh zheleznodorozhnykh vagonov [Modern materials and designs used for domestic railway cars]. *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Advanced technologies applied in the repair of railway rolling stock: collection of conference proceedings of students, postgraduates and young scientists]. 2017, pp. 95–98. (In Russian)

4. Kostyukovich E. A., Budyukin A. M. Analiz trebovaniy k materialam detaley podvizhnogo sostava, ekspluatiruemymkh v usloviyakh nizkikh temperatur, s tsel'yu snizheniya khrupkogo razrusheniya [Analysis of requirements for materials of rolling stock parts operated in low temperature conditions to reduce brittle fracture]. *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Advanced technologies applied in the repair of railway rolling stock: collection of conference proceedings of students, postgraduates and young scientists]. 2018, pp. 96–98. (In Russian)

5. Stefanishina A. N., Fedorchuk P. E., Budyukin A. M., Urushev S. V. Primenenie sovremennykh innovatsionnykh materialov v konstruktsii podvizhnogo sostava [Application of modern innovative materials in the design of rolling stock]. *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Advanced technologies applied in the repair of railway rolling stock: collection of conference proceedings of students, postgraduates and young scientists]. 2018, pp. 111–117. (In Russian)

6. Vasilenko P. G., Budyukin A. M. Otsenka rezul'tatov vnedreniya sovremennykh metodov svarki kuzovov lokomotivov [Evaluation of the results of implementation of modern methods of welding locomotive bodies]. *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Advanced technologies applied in the repair of railway rolling stock: collection of conference proceedings of students, postgraduates and young scientists]. 2017, pp. 37–38. (In Russian)

7. *Kak predotvratit' problemy pri svarke alyuminiya?* [How to prevent problems when welding aluminum]. Available at: <https://blog.svarcom.net/news/222problemy-pri-svarke-alyuminiya.html> (accessed: August 16, 2025). (In Russian)

8. “Ural'skie lokomotivy” nachali podgotovku k proizvodstvu vysokoskorostnykh poездов [Ural locomotives began preparation for the production of high-speed trains]. Available at: <https://rollingstock-world.ru/passazhirskij-ps/uralskie-lokomotivy-nachali-podgotovku-k-proizvodstvu-vysokoskorostnyh-poездов/> (accessed: August 16, 2025). (In Russian)

9. Krivonos E. V., Chernykh I. K., Matuzko E. N., Vasil'ev E. V. Analiz defektov, voznykayushchikh pri svarke treniem s peremeshivaniem [Analysis of defects arising during friction stir welding]. *Mashinostroenie i mashinovedenie. Omskiy nauchnyy vestnik* [Mechanical Engineering and Machine Science. Omsk Scientific Herald]. 2017, Iss. 2(152), pp. 24–27. (In Russian)

10. Sibillano T., Rizzi D., Ancona A., Saludes-Rodil S. et al. Spectroscopic monitoring of penetration depth in CO₂ Nd: YAG and fiber laser welding processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, pp. 910–915.
11. *Avtomatischeeskaya svarka izdeliy iz alyuminievykh splavov: osobennosti tekhnologii, realizatsiya v vide kompleksnoy avtomatizirovannoy sistemy i robotizirovannogo kompleksa* [Automatic welding of aluminum alloy products: technology features, implementation as a complex automated system and robotic complex]. Available at: https://www.aluminas.ru/upload/iblock/8d8/_----_.pdf (accessed: August 16, 2025). (In Russian)
12. *Universal'nyy svarochnyy robototekhnicheskiy kompleks KUKA* [Universal welding robotic complex KUKA]. Available at: <https://auto-machin.com/projects/svarka/universalnyy-svarochnyy-robototekhnicheskiy-kompleks-avv/> (accessed: August 16, 2025). (In Russian)
13. Khaskin V. Yu., Korzhik V. N., Klochkov I. N., Tsay D. et al. *Vozniknovenie khamping-efekta pri lazer-MIG svarke vysokoprochnoy stali AN-32* [Occurrence of humping effect during laser-MIG welding of high-strength steel AN-32]. *TECHNICAL SCIENCE. Colloquium-journal*, 2019, Iss. 13(37), pp. 19–24. (In Russian)
14. Yukhin N. A. *Defekty svarnykh shvov i soedineniy* [Defects of welded seams and joints]. Moscow: SOUELO Publ., 2007, 56 p. (In Russian)

Received: June 05, 2025

Accepted: August 31, 2025

Author's information:

Dmitriy P. KONONOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; d_kononov@mail.ru

Aleksey M. BUDYUKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; remont_ps21@mail.ru

Vladimir G. KONDRAHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; tehmet_pgups@mail.ru

УДК 621.315.175

Автоматизированный метод определения обледенения контактного провода на основе контроля фазового перехода воды

В. А. Бараусов

ООО «ГК ИМСАТ», Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, ул. Гражданская, 7

Для цитирования: Бараусов В. А. Автоматизированный метод определения обледенения контактного провода на основе контроля фазового перехода воды // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 64–77. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-64-77

Аннотация

Цель: Повышение надежности работы контактной сети и снижение эксплуатационных затрат за счет выявления обледенения контактного провода. Рассматривается метод обнаружения наледи, основанный на регистрации тепловых эффектов, сопровождающих фазовый переход воды из твердого состояния в жидкое и обратный ему. **Методы:** Методология базируется на теплофизическом анализе параметров данного процесса. Предложен специализированный модуль, расположенный на контактном проводе с двумя температурными датчиками и двумя разнесенными электрическими нагревателями, работающими в асинхронном режиме. Методика измерения включает вычисление разности температур между двумя удаленными друг от друга участками контактного провода и последующий анализ длительности фазового перехода воды из твердого в жидкое состояние для определения наличия наледи и измерения ее толщины. В статье приведены: конструктивная особенность и принцип работы специализированного модуля, методика определения и измерения толщины льда на основе анализа тепловых характеристик, математическая модель, сравнительный анализ эффективности предложенного решения с традиционными методами борьбы с обледенением. **Результаты:** Подтверждено, что при образовании льда формируется характерное температурное «плато» и наблюдается обнуление разности температур, что позволяет точно диагностировать обледенение и количественно оценить толщину наледи. Методика, основанная на анализе теплового процесса, принципиально нечувствительна к таким внешним факторам, как ветер и осадки, и высокочувствительна к наличию даже тонкого ледового отложения. **Практическая значимость:** Исследование подтверждает возможность оперативного и точного выявления наледи на проводе контактной сети, включая измерение ее толщины, с автоматической передачей данных в диспетчерскую систему. Предложенное решение может быть интегрировано в существующие системы антиобледенения, а также использовано при проектировании новых участков контактной сети.

Ключевые слова: Контактный провод, обледенение, автоматический мониторинг, теплофизический метод, фазовый переход, определение толщины льда.

Применяемые аббревиатуры: КП — контактный провод; ЛЭП — линия электропередачи; ЛО — ледовое отложение на контактном проводе при атмосферном обледенении.

Введение

Обледенение КП представляет собой одну из ключевых проблем эксплуатации электрифицированных железных дорог в зимний период. Образование ЛО приводит к ухудшению токосъема, повышенному износу токоприемников подвижного состава, а также создает угрозу нарушения графика движения поездов [1]. Традиционные методы борьбы с обледенением, такие как механическая очистка или химическая

обработка, зачастую оказываются недостаточно эффективными и экономически затратными [2]. В связи с этим особую актуальность приобретают технологии автоматического мониторинга [1], позволяющие в режиме реального времени фиксировать угрозу обледенения КП, основанные на современных принципах. Проблема борьбы с обледенением контактной сети имеет давнюю историю. Первые попытки механического удаления ЛО предпринимались еще в начале XX в. В 1950-х гг. появились химические методы обработки проводов, а в 1970-х — первые системы их электрического обогрева [3, 4]. Значительный прогресс был достигнут в конце 1990-х — начале 2000-х гг. с развитием микропроцессорной техники, позволившей создавать автоматизированные системы контроля и управления [5, 6]. Современные методы обнаружения обледенения на промышленных объектах, строительных конструкциях и инженерных коммуникациях включают вибрационные, оптические, акустические, тепловые и емкостные датчики, каждый из которых имеет характерные ограничения в различных условиях эксплуатации [6–9]. Анализ литературы подтверждает, что ни один из существующих подходов не является универсальным. Большинство из них либо обладают недостаточной точностью, либо сложностью технической реализации, либо требуют значительных энерго- и трудозатрат [9, 10].

Так, вибрационные методы чувствительны к ветру и шумам, требуют жесткого крепления и настройки под тип провода, а оптические подвержены ложным срабатываниям при тумане, росе и дожде, требуют чистки и стабильного освещения. Конденсаторные и акустические требуют точного контакта с поверхностью и устойчивых условий эксплуатации, уязвимы к вибрациям и загрязнениям.

В отличие от них, предлагаемый теплофизический модуль основан на контроле фазового перехода твердой воды (льда) в жидкое состояние. Это обеспечивает его надежность и универсальность, обусловленные прямым тепловым контактом с контролируемой поверхностью при полной независимости от ее электромагнитных и механических факторов.

Применение предложенной технологии позволяет снизить расходы при одновременном повышении надежности эксплуатации контактной сети в зимний период. Разработанные решения направлены не только на повышение надежности работы железнодорожной инфраструктуры, но и на оптимизацию эксплуатационных расходов за счет рационального использования энергоресурсов. Результаты исследований могут быть применены как для модернизации существующих систем антиобледенения, так и для проектирования новых участков контактной сети с учетом климатических особенностей региона.

Конструктивная особенность и принцип работы специализированного модуля для определения ледовых отложений на контактных проводах

Конструктивные особенности специализированного модуля для определения ЛО и измерения его толщины на длинномерных элементах, таких как КП и провода воздушных ЛЭП, поясняет рис. 1.

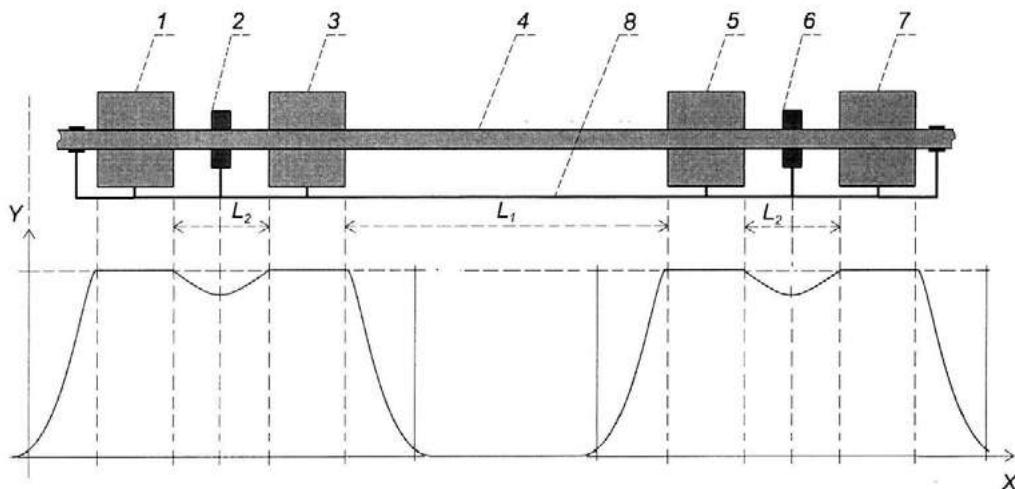


Рис. 1. Схема установки модуля с температурными датчиками и нагревателями на контактном проводе

Они заключаются в следующем: модуль содержит два датчика температуры — 2 и 6, которые жестко закреплены на КП 4 и корпусе 8 и разнесены по продольной оси контактного провода. Эти датчики предназначены для измерения температуры двух последовательных участков КП. Модуль включает два двухсекционных электрических нагревателя (1 — 3 и 5 — 7), закрепленных на корпусе КП. Нагреватели разнесены на расстояние L_1 , что исключает их взаимовлияние на тепловые процессы. Секции каждого нагревателя разнесены на расстояние, меньшее длины участков нагреваемого элемента [11].

Каждый датчик температуры установлен на равном расстоянии $L_2/2$ между соответствующими секциями нагревателей. Это обеспечивает равномерный нагрев и точное измерение температуры на контролируемых участках. Управление нагревателями, обработка данных и передача информации могут быть организованы с использованием внешнего микропроцессорного устройства, приемо-передатчика и источника питания, размещаемых, например, на опоре контактной сети. При этом первый и второй нагреватели подключаются к источнику питания через систему управления, обеспечивающую их асинхронную работу с заданной временной задержкой. **Принцип работы модуля** основан на разделенном управлении нагревателями с временной задержкой Δt , что позволяет разделить процессы нагрева и регистрации температуры на двух участках и тем самым повысить точность обнаружения наледи. Для анализа используется разность температур $\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t)$ между первым и вторым участками, вычисляемая в процессе обработки данных. Конструктив модуля выполнен таким образом, что рама или корпус остаются открытыми для воздействия атмосферных осадков на участках длиной $L_2/2$ [11]. Возможность реализации передачи данных (например, с использованием беспроводного канала), а также функций управления нагревателями и питания модуля может быть обеспечена внешними средствами или

дополнительными устройствами [5, 12]. Таким образом, конструкция модуля обеспечивает высокую точность обнаружения ЛО за счет использования разнесенных пар нагревателей (1 — 3) и (5 — 7), датчиков температуры (2) и (6), асинхронного управления их работой и последующего анализа разности температур Δt непосредственно на КП. Это делает его эффективным для мониторинга обледенения на контактном проводе и других длинномерных элементах.

Методика определения и измерения толщины наледи основана на анализе тепловых эффектов, сопровождающих плавление ЛО с использованием **специализированного модуля** [12, 13].

Реализация данной методики на практике включает следующие этапы:

1. Подготовка к измерению

Модуль 1 монтируется на контролируемую поверхность КП так, чтобы обеспечить плотный тепловой контакт нагревателей и сенсоров с объектом измерения. На этапе калибровки выполняются следующие действия:

- Определяются температурные характеристики участка L_2 , на котором осуществляются нагрев и измерение.
- Задается мощность нагревателей, достаточная для плавления льда (≥ 0 °C) в любых погодных условиях.
- Фиксируются расстояния L_1 (между нагревателями) и L_2 (между секциями одного нагревателя).

2. Проведение измерения

Первая пара нагревателей (например, (1 — 3)) включается, нагревая участок длиной L_2 до температуры плавления льда. Через время Δt включается вторая пара нагревателей (5 — 7). Датчики температуры записывают изменения $T_1(t)$ и $T_2(t)$ на своих участках. Микропроцессор вычисляет разность температур [14]:

$$\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t).$$

3. Анализ возникновения ледового отложения

Если на нагреваемом участке КП есть ЛО, то при нагреве до 0 °C температура КП перестает расти, формируя так называемую «нулевую площадку» на графике температуры, показанную на рис. 2 $T(t)$, — так как подводимая теплота тратится на плавление льда. Разность $\Delta T(t)$ временно обнуляется, когда оба участка находятся в фазе плавления. В отсутствие льда температура КП монотонно растет, а $\Delta T(t)$ остается ненулевой [10, 11].

4. Расчет толщины льда

Длительность «нулевой площадки» t_ϕ на графике рис. 2 пропорциональна массе льда. Чем толще ЛО, тем больше времени требуется для его плавления [12, 13].

Масса льда m рассчитывается через затраченную энергию нагрева Q и удельную теплоту плавления льда λ по формуле:

$$m_1 = \frac{Pt_\phi}{\lambda},$$

где m_1 — масса льда, кг;
 P — мощность нагревателя, Вт;
 t_ϕ — время фазового перехода, с;
 λ — удельная теплота плавления, Дж/кг;
 h — толщина ледяной оболочки (ЛО), вычисляется через массу льда m_1 , его плотность ρ_l и площадь поверхности S участка провода длиной L_2 по формуле:

$$h = \frac{m_1}{\rho_l S}.$$

Результаты передаются через интерфейс в диспетчерскую службу. Методика отличается высокой точностью за счет учета разности температур $\Delta T(t)$, исключающей влияние внешних помех.

Математическая модель теплового процесса в контролируемом участке контактного провода

Для количественной оценки наличия и толщины ЛО на контактном проводе используется математическая модель, основанная на анализе температурного отклика нагреваемых участков L_2 при плавлении ЛО. В модели рассматривается один контролируемый участок провода с закрепленным на нем нагревателем и температурным датчиком.

1. Баланс теплоты при плавлении ледового отложения на контактном проводе

Физической основой работы рассматриваемого устройства является уравнение теплового баланса:

$$\eta Q_{\text{вх}}(t) = Q_{\text{провод}}(t) + Q_{\text{плавление}}(m_1) + Q_{\text{потери}}(t).$$

2. Критерии фазового перехода

Температурное плато — основным признаком процесса плавления ЛО является временная задержка КП участков L_2 на уровне 0°C :

$T(t)$ — показание температурного датчика;

t_{ϕ_1} — момент начала выполнения условий плато (начало интервала измерения);

t_{ϕ_2} — момент окончания выполнения условий плато (конец интервала измерения).

$$T(t) \approx 0^\circ\text{C} \text{ при } t \in [t_1, t^2].$$

ТАБЛИЦА 1. Термины и обозначения математической модели

Обозначение	Описание	Единица измерения
Энергетические параметры		
$Q_{\text{вх}}(t) = Pt$	Энергия, подведенная к модулю за время t	Дж
$Q_{\text{провод}}$	Энергия, затраченная на нагрев провода за время t	Дж
$Q_{\text{плавление}}$	Энергия, затраченная на плавление наледи	Дж
$Q_{\text{потери}}$	Энергия теплопотерь в окружающую среду за время t	Дж
Общие параметры		
t	Время	с
P	Мощность нагревателя	Вт
η	Коэффициент эффективности (КПД) модуля, учитывающий потери при нагревании провода.	0,8–0,9
Параметры провода		
m_p	Масса участка провода в зоне нагрева	кг
c_p	Удельная теплоемкость материала провода	Дж/(кг · °C)
$T_p(t)$	Температура провода в момент времени t	°C
$T_{\text{нач}}$	Начальная температура провода	°C
ΔT_p	Изменение температуры провода ($T_p(t) - T_{\text{нач}}$)	°C
k_p	Коэффициент теплопроводности материала провода	Вт/(м · °C)
A_p	Площадь поперечного сечения провода	м ²
$T_{\text{окр}}$	Температура окружающего воздуха	°C
Параметры льда/наледи		
m_l	Масса льда	кг
h	Толщина слоя льда	м
ρ_l	Плотность льда	кг/м ³
c_l	Удельная теплоемкость льда	Дж/(кг · °C)
λ	Удельная теплота плавления льда	Дж/кг
$m_l = (dm_l/dt)$	Скорость плавления льда (d_{m_l}/d_t)	кг/с
k_l	Коэффициент теплопроводности льда	Вт/(м · °C)
A_l	Площадь поперечного сечения слоя льда для продольного теплопереноса	м ²
S	Площадь поверхности обледенения	м ²
Параметры тепловых потерь		
α	Коэффициент теплоотдачи	Вт/(м ² · °C)
A	Площадь поверхности теплообмена с окружающей средой	м ²
T	Температура поверхности модуля	°C
$T_{\text{окр}}$	Температура окружающего воздуха	°C
Временные параметры		
t_{ϕ_1}	Момент времени начала фазового перехода (начала плато)	с
t_{ϕ_2}	Момент времени окончания фазового перехода (окончания плато)	с
t_ϕ	Длительность фазового перехода (интервал плато, $t_{\phi_2} - t_{\phi_1}$)	с

Разностный сигнал — для повышения достоверности и отстройки от внешних помех используется разностный сигнал между двумя датчиками, расположенными на разных участках зоны нагрева:

$T_1(t), T_2(t)$ — показания двух температурных датчиков.

$\Delta T(t) \approx 0$ — свидетельствует о равномерном тепловом процессе в зоне контроля, характерном для плавления.

$$\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t) \approx 0.$$

Расчет продолжительности плавления ЛО является ключевым измеряемым параметром для дальнейшего расчета массы льда на КП:

$$t_\varphi = t_{\varphi 2} - t_{\varphi 1}.$$

3. Расчет толщины ледового отложения

Расчет массы ледового отложения:

Масса ЛО рассчитывается из уравнения теплового баланса для интервала плавления:

$$m_l = \frac{\eta P t_\varphi - Q_{\text{потерь}}}{\lambda}.$$

Расчет толщины ЛО

Толщина ЛО рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{m_l}{\rho_l S}.$$

Расчет площади контролируемого участка

Для КП площадь поверхности S вычисляется как сумма площади боковой поверхности:

$$2\pi r L_2 + \pi r^2.$$

Итоговая формула определения толщины ледового отложения:

$$h = \frac{\eta P t_\varphi - Q_{\text{потерь}}}{\lambda \rho_l (2\pi r L_2 + \pi r^2)}.$$

4. Дифференциальная форма записи теплового процесса

Для полного описания динамики тепловых процессов в системе «провод — наледь — окружающая среда» может быть использовано уравнение теплопроводности с учетом фазового перехода и граничных условий. Данная форма

описывает распределение мощности в системе в каждый момент времени и служит фундаментальной основой для анализа переходных процессов. Рассмотренная упрощенная модель для стадии установившегося плавления может быть получена из данной модели путем интегрирования по объему системы и введения ряда допущений о распределении температурных полей.

$$Q_{\text{вх}}(t) = m_p c_p \frac{dT_p}{dt} + m_l c_l \frac{dT_l}{dt} + m_l \lambda + \alpha A (T - T_{\text{окр}}) t_\phi + k_p A_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + k_l A_l \frac{\partial^2 T_l}{\partial x^2}.$$

Подтверждение технической эффективности моделирования

Техническая эффективность предложенного метода определения наледи на длинномерных элементах контактной сети была подтверждена путем математического и имитационного моделирования тепловых процессов, происходящих в контролируемом участке провода при асинхронном нагреве [12, 13]. Моделирование позволило оценить отклик температурных датчиков при различных сценариях обледенения и проверить работоспособность разностного алгоритма определения фазы плавления льда. Особое внимание уделялось анализу динамики температурных кривых $T_1(t)$ и $T_2(t)$ при наличии и отсутствии наледи; исследованию разностного сигнала $\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t)$, а также оценке устойчивости метода к внешним тепловым возмущениям, таким как ветер.

В модели учитывались: геометрия провода (неограниченный цилиндр с диаметром 10 мм), теплопроводность и теплоемкость металла провода и наледи, удельная теплота плавления $\lambda = 334 \text{ кДж/кг}$, коэффициент теплоотдачи α ветровому потоку, начальная толщина наледи (1–5 мм), мощность нагревателей (3,0–5,0 Вт), задержка между включениями нагревателей $\Delta t = 5 \text{ с}$, температура воздуха (от -10°C до $+2^\circ\text{C}$).

Результаты

В результате математического моделирования теплового процесса на контролируемом участке контактного провода получены температурные кривые [14] $T_1(t)$ и $T_2(t)$ для различных сценариев обледенения с начальной толщиной наледи от 1 до 5 мм. Анализ динамики температурных данных показал четкое проявление «температурного плато» при фазовом переходе «лед — вода», что подтверждает возможность точного определения времени плавления льда t_ϕ , показанного на рис. 2.

Разностный сигнал $\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t)$ продемонстрировал устойчивую зависимость возникновения и наличия ЛО: в ее отсутствии значение $\Delta T(t)$ оставалось отличным от нуля, тогда как при наличии наледи наблюдалась временная компенсация сигнала, обусловленная поглощением тепловой энергии при фазовом переходе.

Проведенное моделирование с различными ключевыми параметрами (мощность нагревателей 3,0–5,0 Вт, температура окружающей среды от -10°C до $+2^{\circ}\text{C}$) подтвердило стабильность и надежность метода в широком диапазоне условий. Задержка между включениями нагревателей $\Delta t = 5$ с была выбрана как пример для выявления фазового перехода без значительных временных потерь.

Модель учитывала влияние теплопроводности материалов, теплоотдачи в окружающую среду и воздействия ветра, что в конечном итоге позволило обеспечить высокую точность оценки толщины ЛО по формуле:

$$h = \frac{m_l}{\rho_l S} = \frac{\eta P t_{\phi}}{\lambda \rho_l (2\pi r L_2 + \pi r^2)},$$

где все параметры определены с учетом физических свойств материалов и конструктивных особенностей измерительного участка.

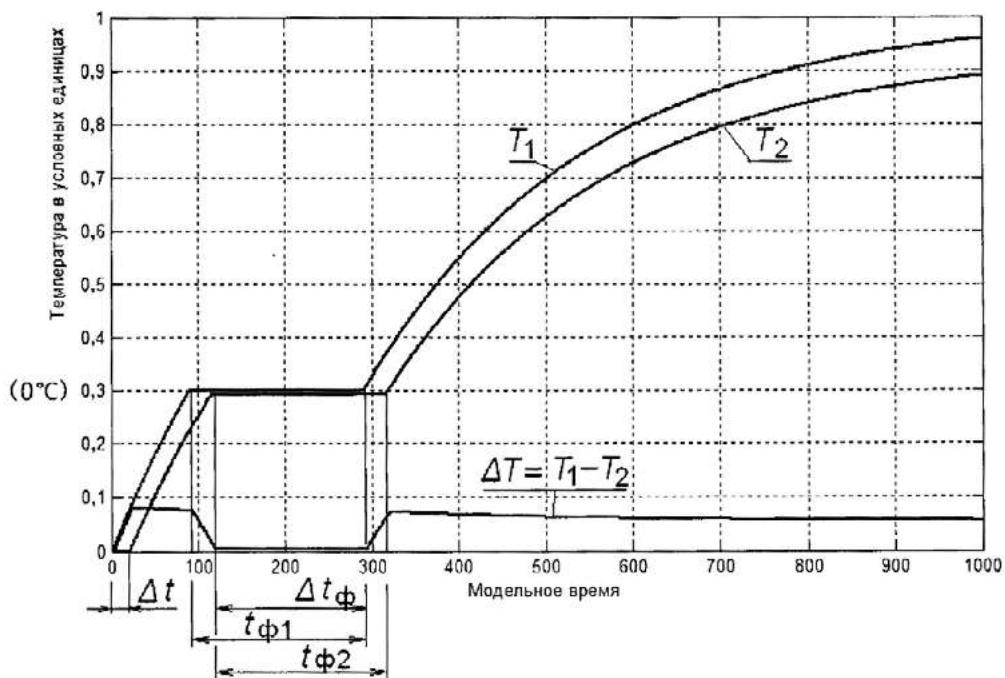


Рис. 2. Фиксация фазового перехода. График изменения температуры при таянии ледового отложения

График демонстрирует характерное плато $\Delta T(t)$ во время фазовых переходов, что служит основным критерием наличия ЛО на поверхности провода [13, 14].

Преимущества метода:

- помехоустойчивость и высокая надежность за счет разностной схемы измерения, исключающей влияние синфазных помех (ветровые нагрузки, солнечный нагрев, колебания температуры воздуха);
- высокая чувствительность к тонкому слою наледи (0,1–0,2 мм);

- количественная диагностика — прямое определение массы и толщины льда в реальном времени;
- масштабируемость и интеграция — возможность передачи данных в системы SCADA и диспетчеризации по каналам GSM/SMS, GPRS.

Таким образом, предложенный модуль существенно превосходит существующие аналоги по комплексу эксплуатационных и метрологических характеристик, особенно в условиях переменчивого климата, обеспечивая эффективный мониторинг и диагностику наледи на протяженных объектах.

Научная новизна заключается в разработке метода и специализированного модуля для количественной диагностики наледи, в котором:

1. Предложена конструкция модуля, включающего два температурных датчика и два электрических нагревателя, конструктивно размещенных по продольной оси корпуса с возможностью крепления на длинномерных объектах (на примере контактного провода).
2. Предложены принцип диагностики и математическая модель, основанные на асинхронном включении нагревателей и разностном анализе температурных кривых $\Delta T(t)$, что позволяет обеспечивать повышенную помехоустойчивость и точность фиксации фазового перехода агрегатного состояния воды.
3. Реализован энергобалансовый подход, который по продолжительности температурного плато плавления позволяет перейти от качественного обнаружения к количественному измерению — определению массы и толщины слоя наледи.
4. Доказана практическая реализуемость метода на микроконтроллерной платформе и его пригодность для верификации средствами имитационного моделирования.

Заключение

В работе представлен новый теплофизический метод обнаружения и количественной диагностики наледи, основанный на контроле фазового перехода агрегатного состояния воды. Метод реализован в виде специализированного модуля с двумя температурными датчиками и секционными нагревателями, асинхронный нагрев которых в сочетании с разностным анализом сигналов $\Delta T(t)$ обеспечивает высокую помехоустойчивость и точность.

Ключевым результатом работы является переход от качественного обнаружения обледенения к его количественному измерению — определению массы и толщины льда по продолжительности температурного плато плавления на основе энергобалансовой модели.

Внедрение предлагаемого решения позволяет:

1. Обеспечить раннее и достоверное выявление обледенения для предотвращения нарушений в работе ответственных объектов.

2. Принимать обоснованные оперативные решения на основе данных о толщине наледи.

3. Снизить эксплуатационные затраты за счет автономной работы и минимального обслуживания.

Таким образом, разработанная методика и конструкция модуля вносят вклад в повышение надежности и безопасности эксплуатации железнодорожной инфраструктуры в зимний период. Предложенный подход обладает значительным потенциалом для адаптации и применения в других отраслях, где критически важен мониторинг обледенения протяженных объектов (ЛЭП, мосты, ветрогенераторы и пр.).

Список источников

1. Горячев М. П. Система автоматизированного мониторинга силы тяжения провода воздушных линий электропередачи по параметрам кручения и провеса: дис. ... канд. техн. наук / М. П. Горячев. — Казань: КГЭУ, 2019. — 130 с.
2. Соловьев В. А. Автоматическая система удаления льда с проводов линий электропередач / В. А. Соловьев, В. М. Козин, Д. А. Орлов, С. И. Сухоруков. — Комсомольск-на-Амуре: Изд-во Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та, 2012.
3. Фадеев Г. М. История железнодорожного транспорта России / Г. М. Фадеев и др.; под общ. ред. Е. Я. Красковского, М. М. Уздина. — СПб.; М., 1994.
4. Ли И. Развитие технологии борьбы с гололедом на контактной сети железных дорог / И. Ли, И. П. Викулов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — № 1. — С. 183–200.
5. Козлов В. П. Развитие микропроцессорных систем управления в промышленности / В. П. Козлов, А. Н. Петров // Автоматизация и современные технологии. — 2001. — № 5. — С. 12–18.
6. Самарин А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП / А. Самарин, В. Масалов // Control Engineering Россия. — 2013. — Июнь.
7. Сигнализатор обледенения. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сигнализатор_обледенения (дата обращения: 30.07.2025).
8. Ратушняк В. С. Энергоэффективное предупреждение гололедообразования на основе электромеханического преобразователя: дис. ... канд. техн. наук / В. С. Ратушняк, М. В. Тимошенко. — Новосибирск: НГТУ, 2019. — 142 с.
9. Бубнов В. П. Анализ датчиков автоматической системы обогрева стрелочных переводов / В. П. Бубнов, В. А. Бараусов, Ш. Х. Султонов // Автоматика, связь, информатика. — 2022. — № 4. — С. 8–11.
10. 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).
11. Патент RU 2767246 Российская Федерация. Модуль периодического определения наледи на длинномерных элементах конструкций, в частности проводах воздушных ЛЭП / В. А. Бараусов, П. В. Григорьев, С. Г. Селянин; заявл. 04.08.2021; опубл. 18.03.2022.

12. Бараусов В. А. Имитационная модель асинхронного способа определения толщины льда на контролируемой поверхности / В. А. Бараусов // Интеллектуальные технологии на транспорте. — 2025. — № 2(42). — С. 20–28.
13. Патент RU 2763473 Российская Федерация. Способ и устройство определения толщины льда на рабочей поверхности датчика обледенения / В. А. Бараусов, П. В. Григорьев, А. Г. Семенов; заявл. 26.05.2021; опубл. 29.12.2021.
14. Султонов Ш. Х. Методика проведения эксперимента по климатическим испытаниям датчика обледенения / Ш. Х. Султонов, В. П. Бубнов, В. А. Бараусов, В. С. Забузов и др. // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Третьей Международной научно-технической конференции. — Ташкент, 2024. — С. 392–402.

Дата поступления: 24.06.2025

Решение о публикации: 20.07.2025

Контактная информация:

БАРАУСОВ Виктор Александрович — руководитель проекта; barausovv@gmail.com

An Automated Method for Detecting the Icing of a Contact Wire Based on Thermophysical Phase Transition Control

V. A. Barausov

ООО “GC IMSAT”, 7, Grazhdanskaya str., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Barausov V. A. An Automated Method for Detecting the Icing of a Contact Wire Based on Thermophysical Phase Transition Control. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 64–77. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-64-77

Summary

Purpose: To improve the reliability of the contact network operation and reduce operational costs through the detection of the icing of the contact wire, a thermophysical method is proposed. This method is based on the monitoring the thermal effect associated with the phase transition of water from solid to liquid. **Methods:** The approach involves analyzing the thermophysical parameters of the «ice-water» phase transition. A specialized module is installed on the contact wire, equipped with two temperature sensors and two electric heaters positioned at a distance from one another, functioning in asynchronous mode. The measurement technique entails calculating the temperature difference between the two spaced-apart sections of the contact wire and subsequently analyzing the duration of the phase transition to determine the thickness of the ice. The paper presents a description of the design features and operational principles of a specialized module. It also describes a method for measuring ice thickness based on the analysis of thermal characteristics. A mathematical model is presented, as well as a comparative analysis of the effectiveness of the proposed solution compared to traditional methods of ice control. **Results:** It has been confirmed that a characteristic temperature «plateau» is formed in the presence of ice, with a zero temperature difference, allowing for accurate detection of ice and quantification of its thickness. This method, based on thermal analysis, is insensitive to symmetric external disturbances such as wind and precipitation but highly sensitive to even a thin layer of ice. **Practical significance:** The study confirms the feasibility of timely and accurate detection of ice and its thickness on the contact wire, with the data being transmitted to the control system.

This solution has the potential to be applied in the modernization of existing de-icing systems and the design of new sections of the contact network.

Keywords: Contact wire, icing, automatic monitoring, thermophysical method, phase transition, ice thickness detection.

References

1. Goryachev M. P. Sistema avtomatizirovannogo monitoringa sily tyazheniya provoda voz-dushnykh liniy elektroperedachi po parametram krucheniya i provesa: dis. ... kand. tekhn. nauk [Automated monitoring system for wire tension in overhead power lines based on twisting and sag parameters: dis. ... Cand. of Engineering Sciences]. Kazan': KGEU Publ., 2019, 130 p. (In Russian)
2. Solov'ev V. A., Kozin V. M., Orlov D. A., Sukhorukov S. I. *Avtomatischeeskaya sistema udaleniya l'da s provodov liniy elektroperedach* [Automatic system for ice removal from power line wires]. Komsomol'sk-na-Amure: Izd-vo Komsomol'skogo na Amure gos. tekhn. un-ta Publ., 2012. (In Russian)
3. Fadeev G. M. et al. *Istoriya zhelezodorozhного transporta Rossii* [History of railway transport in Russia]. Ed. by E. Ya. Kraskovsky, M. M. Uzdin. St. Petersburg; Moscow, 1994. (In Russian)
4. Li I., Vikulov I. P. Razvitie tekhnologii bor'by s gololedom na kontaktnoy seti zheleznykh dorog [Development of technologies for combating ice on railway contact networks]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2025, Iss. 1, pp. 183–200. (In Russian)
5. Kozlov V. P., Petrov A. N. Razvitie mikroprotsessornykh sistem upravleniya v promyshlennosti [Development of microprocessor control systems in industry]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and Modern Technologies]. 2001, Iss. 5, pp. 12–18. (In Russian)
6. Samarin A., Masalov V. Sovremennye tekhnologii monitoringa vozдушных elektrosetey LEP [Modern technologies for monitoring overhead power lines]. *Control Engineering Rossiya* [Control Engineering Russia]. 2013, June. (In Russian)
7. *Signalizator obledeneniya* [Ice detector]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сигнализатор_обледенения (accessed: July 30, 2025). (In Russian)
8. Ratushnyak V. S., Timoshenko M. V. *Energoeffektivnoe preduprezhdenie gololedoobrazovaniya na osnove elektromekhanicheskogo preobrazovatelya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Energy-efficient prevention of ice formation based on an electromechanical converter: dis. ... Cand. of Engineering Sciences]. Novosibirsk: NGTU Publ., 2019, 142 p. (In Russian)
9. Bubnov V. P., Barausov V. A., Sultonov Sh. Kh. Analiz datchikov avtomaticheskoy sistemy obogreva strelochnykh perevodov [Analysis of sensors for an automatic heating system of switch points]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics]. 2022, Iss. 4, pp. 8–11. (In Russian)
10. Trubitsin M. A., Lukashevich O. G. *Analiz sposobov obnaruzheniya gololeda na provodakh LEP i ikh primenenie dlya kontaktnoy seti* [Analysis of methods for detecting ice on power line wires and their application to contact networks]. IVD, 2016, Iss. 4(43). (In Russian)

11. Barausov V. A., Grigor'ev P. V., Selyanin S. G. *Modul' periodicheskogo opredeleniya naledi na dlinnomernykh elementakh konstruktsiy, v chastnosti provodakh vozдушных LEP* [Module for periodic detection of ice on linear structural elements, particularly on overhead power line wires]. Patent RF, no. 2767246. (In Russian)
12. Barausov V. A. Imitatsionnaya model' asinkhronnogo sposoba opredeleniya tolshchiny l'da na kontroliruemoy poverkhnosti [Simulation model of an asynchronous method for determining ice thickness on a monitored surface]. *Intellektual'nye tekhnologii na transporte* [Intelligent Technologies in Transport]. 2025, Iss. 2(42), pp. 20–28. (In Russian)
13. Barausov V. A., Grigor'ev P. V., Semenov A. G. *Sposob i ustroystvo opredeleniya tolshchiny l'da na rabochey poverkhnosti datchika obledeneniya* [Method and device for determining ice thickness on the working surface of an ice detector]. Patent RF, no. 2763473. (In Russian)
14. Sultonov Sh. Kh., Bubnov V. P., Barausov V. A., Zabuzov V. S. et al. Metodika provedeniya eksperimenta po klimaticeskim ispytaniyam datchika obledeneniya [Methodology for conducting an experiment on climatic testing of an ice detector]. *Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy Tret'ey Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Railway Rolling Stock: Problems, Solutions, Prospects: Proceedings of the Third International Scientific and Technical Conference]. Tashkent, 2024, pp. 392–402. (In Russian)

Received: June 24, 2025

Accepted: July 20, 2025

Author's information:

Viktor Al. BARAUSOV — Project Manager; barausovv@gmail.com

УДК 625.4

Особенности эксплуатации трамвайных стрелок различной конструкции

Д. А. Басовский¹, Н. М. Панченко¹, О. В. Востриков²

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

²Петербургское унитарное предприятие «Горэлектротранс», Российская Федерация, 196105, Санкт-Петербург, Сызранская ул., 15

Для цитирования: Басовский Д. А., Панченко Н. М., Востриков О. В. Особенности эксплуатации трамвайных стрелок различной конструкции // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 78–86. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-78-86

Аннотация

Цель: Проанализировать различия в жизненном цикле трамвайных стрелок с одним и двумя перьями в ситуациях, где условия использования и установка идентичны. **Методы:** Проведен анализ объемов основных видов эксплуатационных работ для различных конструкций стрелочных переводов в течение одного эксплуатационного периода при условии соответствия их технического состояния требованиям Правил технической эксплуатации. **Результаты:** Установлено, что двухперьевая стрелочная перевод требует меньшего объема обслуживающих работ по сравнению с одноперевьевым в течение одного и того же периода наблюдения, даже при более высокой грузонапряженности на его участке. **Практическая значимость:** Учитывая широкую распространенность одноперевьевых стрелочных переводов на трамвайных путях Санкт-Петербурга и других городов, оценка экономической целесообразности их содержания определяет стоимость жизненного цикла. Это позволяет обоснованно выбирать тип стрелочного перевода при проектировании и эксплуатации трамвайных путей.

Ключевые слова: Трамвайный путь, стрелка, условия эксплуатации, обслуживание.

Трамвай занимает второе место по пассажироперевозкам в городе, уступая лишь метро. Экономическая эффективность этого вида транспорта проявляется особенно ярко при перевозке более пяти тысяч пассажиров в час: в таких условиях его эксплуатация становится выгоднее, чем у автобусов и троллейбусов.

Благодаря этим преимуществам трамвай пережил период интенсивного развития. К концу 1980-х гг. в Ленинграде (ныне — Санкт-Петербурге) протяженность трамвайных путей достигла 750 километров, что позволило внести город в Книгу рекордов Гиннеса. Однако в начале 1990-х, в период экономического кризиса, протяженность трамвайных линий в России существенно сократилась [1].

В настоящее время в Санкт-Петербурге функционирует 513 километров однопутных трамвайных путей (без учета участков, обслуживаемых по концессионным договорам). Несмотря на активное внедрение современных трамвайных путей — в том числе бесшпалльных — некоторые элементы верхнего строения пути, сформировавшиеся еще в прошлом, требуют модернизации. В частности, устарели рельсовые скрепления и шпалы: их технические характеристики не

соответствуют современным требованиям к комфорту и скорости движения трамвайных вагонов.

29 сентября 1907 г. Санкт-Петербург приветствовал появление трамвайного движения, которое к следующему году достигло протяженности в 58 километров. К 1914 г. трамвайная сеть охватила практически все ключевые магистрали города, включая набережную Обводного канала, Лиговский проспект, улицы Восстания, Захарьевскую, Кирочную, Некрасова, Шпалерную, Тверскую. Также была модернизирована и переведена на электрическую тягу линия на Большом Сампсониевском проспекте, ранее работавшая на тяге с паровым двигателем.

Петербургские трамваи, возникшие на месте конных железных дорог, сохранили некоторые черты организации путей, заложенные их предшественниками.

В начале своего развития петербургские трамвайные пути были укомплектованы стрелками с одним подвижным остриём (пером), созданными по английской технологии из особо прочной стали с высоким содержанием марганца. Их простота в производстве, высокая ремонтопригодность, надежность при работе на умеренных скоростях и износстойкость сделали этот тип стрелок популярным решением, которое до сих пор широко используется в Санкт-Петербурге (табл. 1, рис. 1).

ТАБЛИЦА 1. Ключевые сведения о стрелочных переводах, расположенных на путях

СПб ГУП «Горэлектротранс»

Тип стрелочного перевода	Количество, пар	Автоматизация		Радиус стрелочного перевода, м	
		оборудованных	необорудованных	30 м / 14 м	50 м
Одноперьевые	1091	202	889	1085	6
Двухперьевые	47	26	21	44	3
Всего	1138	228	910	1129	9



Рис. 1. Одноперевая трамвайная стрелка в Санкт-Петербурге (фото О. В. Вострикова)

Такая конструкция вполне удовлетворяла требованиям скорости, комфорта и загруженности трамвайных вагонов начала XX в., например трамвайного вагона МС-1, и оставалась приемлемой при эксплуатации моделей трамваев конца XX в., таких как ЛМ-99 (рис. 2). Далее, с развитием трамвайных перевозок, появились новые требования к подвижному составу: увеличение вместимости, скорости движения, повышение комфорта пассажиров по уровням шума и вибрации, температурного режима салона и условие последнего времени — необходимость ровного пола салона трамвайного вагона (рис. 3). Реализация всех требований к трамвайному вагону привела к увеличению его длины, массы, тяговой мощности (табл. 2).

Хотя одноперьевые стрелки имеют ряд достоинств, их эксплуатация в современных трамвайных системах сталкивается с существенными проблемами. В частности, они демонстрируют низкую стабильность при движении вагонов с увеличенной колесной базой и большим весом. Использование ударных приводов не позволяет контролировать прилегание пера к рельсу. Кроме того, прокат колес вагона на реборде по глухой части стрелочного перевода создает дополнительную ударную нагрузку, вибрацию и износ реборды [2].

ТАБЛИЦА 2. Основные сведения о подвижном составе трамвая, используемом в Санкт-Петербурге

№	Характеристика	Значения для трамвайного вагона модели		
		МС-1	71-134А5НВ (ЛМ-99)	71-931 М (Витязь)
1	Длина вагона (по кузову), мм	10 270	15 000	27 500
2	Ширина вагона (по кузову), мм	2450	2550	2550
3	Высота вагона (по кузову), мм	3270	3150	3600
4	Масса тары, не более, т	13,7	19,5	37
5	База вагона Между тележками, мм Между тележкой и сочленением, мм	2700	7500	9000 6614
6	База тележки, мм	2700	1940	1800
7	Количество мест для сидения пассажиров	32	23	60
8	Вместимость пассажиров, не менее, чел.: – номинальная (при 5 чел/м ²) – номинальная (при 8 чел/м ²)	64 101	118 162	185 260
9	Мощность тягового электродвигателя, кВт	40	55	72
10	Количество тяговых электродвигателей на вагоне, шт.	2	4	6
11	Скорость вагона конструктивная, км/ч	40	75	75
12	Одиночный вагон должен вписываться в габарит подвижного состава на кривых участках пути радиусом 20 м и проходить криволинейные участки парковых путей радиусом, м, не менее:	14	14	16
13	Диаметр нового колеса по кругу катания, мм:	850	710	620



Рис. 2. Трамвайный вагон 71-134А5НВ (ЛМ-99). Общий вид (фото О. В. Вострикова)



Рис. 3. Трамвайный вагон 71-931М «Витязь-М». Общий вид (фото О. В. Вострикова)

Все эти особенности приводят к необходимости ограничения скорости трамвайных вагонов при движении по стрелкам: до 5 км/ч при проезде стрелок в противоположном направлении и до 15 км/ч при проезде пошерстных стрелок [3]. Чтобы водитель трамвая мог выполнить визуальный контроль положения и прилегания пера стрелки, скорость ограничивается заранее — вплоть до полной остановки.

Такие требования делают укладку одноперьевых стрелочных переводов нецелесообразной на магистральных трамвайных путях. Однако удобство очистки,

обогрева в зимний период и обслуживания меньшего количества подвижных элементов стрелки обуславливают востребованность одноперьевых стрелок на веерах трамвайных парков и путях разворотных колец — там, где скорость маневрового движения не превышает 5 км/ч [4].

Установлены параметры и допуски контроля одноперевого стрелочного перевода (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Параметры контроля одноперевого стрелочного перевода и их допуски

№ п/п	Места замеров	Норма, мм	Допуски, мм
1	На расстоянии 2 м до тонких концов стрелок	1524	+12; -2
2	В тонких концах стрелок	1524	+12; -2
3	У остряка глухой стрелки (по боковому направлению)	1548	+12; -2
4	В хвостовиках стрелок (по прямому и боковому направлениям)	1524	+12; -2
		1524	+12; -2
5	В соединительных кусках между стрелками и крестовинами (по боковому и прямому направлениям)	1524	+12; -2
		1524	+12; -2
6	В одноочной крестовине (по прямому и боковому направлениям)	1524	+12; -2
		1524	+12; -2
7	В ромбовых крестовинах (по прямому и боковому направлениям)	1524	+12; -2
		1524	+12; -2
		1524	+12; -2
8	Превышение пера одноперевых стрелок над рамным рельсом	от 2 мм до 17 мм	
9	Боковой износ пера стрелки	не более 12 мм	
10	Уступ в накате желоба глухих стрелок	не более 3 мм	
11	Вертикальный люфт пятых пера	не более 6 мм	
12	Горизонтальный люфт пятых пера	не более 4 мм	

В Санкт-Петербурге, основываясь на возможностях городской инфраструктуры с учетом проектов горизонтальной планировки улично-дорожной сети, осуществляется переход на укладку двухперьевых стрелок и сварных крестовин.

С началом массового обновления подвижного состава на более тяжелые современные модели наблюдается неодинаковая скорость износа элементов одноперевых стрелочных переводов. При этом грузонапряженность участков изменяется незначительно.

Срок службы стрелочных переводов ограничивается их износом и зависит от многих эксплуатационных факторов, среди которых грузонапряженность и скорость движения трамваев являются решающими. Кроме того, необходимо учитывать характерные особенности работы: например, для стрелочных переводов попутного и встречного направлений характерен различный механизм формирования износа.

Основываясь на известных методиках определения сроков службы стрелочных переводов и данных проведенных исследований научных коллективов, износ элементов стрелок и крестовин можно определить по формуле:

$$h = a\sqrt{T} + bT,$$

где T — тоннаж млн т брутто, прошедший по стрелочному переводу;

a, b — коэффициенты, зависящие от типа рельса стрелочного перевода, типа крестовины и условий эксплуатации [5].

Характеристика эксплуатационных условий, определяющая значения коэффициентов a и b , охватывает ключевые параметры влияния на износ крестовин, за исключением тоннажа. К ним относятся: материал, конструктивные особенности, технология производства, методы укладки, величина нагрузок от колес подвижного состава, проходящего по конструкции, диаметры колес, а также дополнительные нагрузки, вызванные неровностями поверхности катания.

Выполнен сравнительный анализ периодичности и объемов работ по обслуживанию стрелок разных конструкций — одноперьевой с поворотным креплением пера и двухперьевой с поворотным креплением перьев, которые размещены в сходных условиях и расположены в разных районах города.

В связи с тем, что трамвайные пути и стрелки, расположенные в теле дороги, подвергаются дополнительному износу от воздействия автотранспорта, к рассмотрению приняты стрелки, уложенные в обособленном полотне. Характеристики рассматриваемых стрелок представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Характеристики рассматриваемых стрелок

Признак	Стрелка 1	Стрелка 2
Адрес укладки	узел 11: ул. Ярослава Гашека — Купчинская ул.	узел № 295: пр. Стачек, выезд из трамвайного парка
Направление движения от ...	от конечного пункта «Купчино» к Купчинской ул.	от трамвайного парка
Конструкция	одноперьевая	двуихперьевая
Марка стрелки, радиус	ЛГМ-126 подвижная, ЛГМ-129 глухая (Р-30)	8428.00-000-01 (Р-30)
Направление работы стрелочного перевода	встречное левое	встречное правое
Грузонапряженность, млн тонн брутто в год	5,2	7,6

Работы по обслуживанию стрелок объединены в группы:

- 1) осмотр, регулировка, смазка стрелок и замыкателя;
- 2) регулировка, снятие остроты пера;
- 3) осмотр без выполнения работ;
- 4) наплавка пятых пера, замена пятовых болтов;
- 5) замена пера стрелки;
- 6) замена элементов замыкателя.

Оценочный период установлен с 1 января 2023 г. по 1 января 2025 г. В указанный период полная замена стрелок не выполнялась, параметры стрелок находились в пределах допусков. Для удобства анализа учет выполненных работ принят по эпизодам, безотносительно к трудозатратам.

ТАБЛИЦА 5. Выполненные работы на стрелках.

Вид работ	Количество работ	
	Стрелка 1	Стрелка 2
Осмотр, регулировка, смазка стрелок и замыкателя	5	2
Регулировка, снятие остроты пера	2	2
Осмотр без выполнения работ	7	9
Наплавка пятых пера, замена пятовых болтов	6	2
Замена пера стрелки	1	0
Замена элементов замыкателя	3	0
Всего:	24	15

Оценивая полученные результаты, можно сделать вывод, что за один и тот же период эксплуатации у двухперьевой стрелки объем необходимых работ по обслуживанию меньше на 62 % по сравнению с одноперьевой — даже при большей грузонапряженности. Это подтверждает необходимость перехода на более современную конструкцию: ее применение уменьшает износ и, соответственно, увеличивает срок службы.

Список источников

1. Дудкин Е. П. Современные конструкции трамвайных путей: монография / Е. П. Дудкин, К. А. Гмыря, А. В. Колтаков, М. В. Малахов и др. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020. — 136 с.
2. Басовский Д. А. Существующие и перспективные конструкции стрелочных переводов трамвайного пути в Санкт-Петербурге / Д. А. Басовский, О. В. Востриков // Сборник материалов конференции «II Международная конференция “Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт”». — М., 2023.
3. Правила технической эксплуатации трамвая: утв. распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации от 30.11.2001 № АН-103.

4. Басовский Д. А. Возможности применения новых конструкций стрелочных переводов для путевого хозяйства рельсового городского транспорта / Д. А. Басовский, О. В. Востриков / III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. — 2021. — С. 39–42.

5. Яковлева Т. Г. Основы устройства и расчета железнодорожного пути / Т. Г. Яковлева, В. Я. Шульга, С. В. Амелин и др. — М.: Транспорт, 1990. — 367 с.

Дата поступления: 24.07.2025

Решение о публикации: 29.07.2025

Контактная информация:

БАСОВСКИЙ Дмитрий Аркадьевич — канд. техн. наук, доц.; d1976bas@rambler.ru

ПАНЧЕНКО Наталья Михайловна — канд. техн. наук, доц.; panchnat@rambler.ru

ВОСТРИКОВ Олег Владимирович — инженер, зам. начальника службы пути; vost-ol@yandex.ru

Specifics of Operating Tram Switches of Different Designs

D. A. Basovsky¹, N. M. Panchenko¹, O. V. Vostrikov²

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

²Petersburg Unitary Enterprise “Gorelektrotrans”, 15, Syzranskaya str., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

For citation: Basovsky D. A., Panchenko N. M., Vostrikov O. V. Specifics of Operating Tram Switches of Different Designs. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 78–86. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-78-86

Summary

Purpose: To examine the life cycle characteristics of single-point and double-point tram track switches under comparable operational and installation conditions. **Methods:** An analysis of the volume of fundamental maintenance tasks performed on different switch designs over an identical duration, ensuring adherence to technical operational standards. **Results:** The findings indicate a reduced maintenance requirement for double-point switches compared to single-point switches within the same observation period, even when subjected to increased operational loads. **Practical significance:** The practical implications of this research are significant, particularly given the widespread use of single-point switches in Saint Petersburg and other urban tram networks. Establishing the economic viability of maintaining a specific switch design directly influences the overall life cycle cost, thereby providing a basis for evaluating the efficacy of different switch types in the design and operation of tram systems.

Keywords: Tram track, switch, operational conditions, maintenance.

References

1. Dudkin E. P., Gmyrya K. A., Koltakov A. V., Malakhov M. V. et al. *Sovremennye konstruktsii tramvaynykh putey: monografiya* [Modern designs of tram tracks]. Moscow: FGBU DPO “Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte” Publ., 2020, 136 p. (In Russian)

2. Basovskiy D. A., Vostrikov O. V. Sushchestvuyushchie i perspektivnye konstruktsii strelochnykh perevodov tramvaynogo puti v Sankt-Peterburge [Existing and prospective designs of tramway turnouts in Saint Petersburg]. *Sbornik materialov konferentsii II Mezhdunarodnaya konferentsiya "Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont"* [Proceedings of the II International Conference "Nauka 1520 VNIIZhT: Look Beyond the Horizon"]. Moscow, 2023. (In Russian)
3. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii tramvaya: utv. rasporyazheniem Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii ot 30.11.2001 № AN-103* [Rules for technical operation of trams: approved. by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated November 30, 2001 № AN-103]. (In Russian)
4. Basovskiy D. A., Vostrikov O. V. Vozmozhnosti primeneniya novykh konstruktsiy strelochnykh perevodov dlya putevogo khozyaystva rel'sovogo gorodskogo transporta [Possibilities of applying new designs of turnouts for track facilities of rail urban transport]. *III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov* [III Betankurov International Engineering Forum: Proceedings]. 2021, pp. 39–42. (In Russian)
5. Yakovleva T. G., Shul'ga V. Ya., Amelin S. V. et al. *Osnovy ustroystva i rascheta zhelezodorozhного puti* [Fundamentals of railway track design and calculation]. Moscow: Transport, 1990, 367 p. (In Russian)

Received: July 24, 2025

Accepted: July 29, 2025

Author's information:

Dmitry A. BASOVSKY — PhD in Engineering, Associate Professor; d1976bas@rambler.ru

Natalia M. PANCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; panchnat@rambler.ru

Oleg V. VOSTRIKOV — Engineer, Deputy Head of Track Service; vost-ol@yandex.ru

УДК 629.421(045)

Регулятор тягового усилия локомотива на основе алгоритма с нечеткой логикой

Ю. В. Бабков¹, К. С. Перфильев¹, С. Н. Журавлев¹, И. А. Уколов^{1,2}

¹Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКТИ»), Российской Федерации, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

²Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета, Российской Федерации, 140400, ул. Октябрьской революции, 408

Для цитирования: Бабков Ю. В., Перфильев К. С., Журавлев С. Н., Уколов И. А. Регулятор тягового усилия локомотива на основе алгоритма с нечеткой логикой // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 87–99. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-87-99

Аннотация

Цель: Разработать алгоритм управления тяговым усилием локомотива для максимизации тяговых свойств при переменном сцеплении и минимизации проскальзывания в системе «колесо — рельс». **Методы:** Использование аппарата нечеткой логики, теории нечетких множеств и нечетких логических функций, элементов искусственного интеллекта, теории автоматического управления, методов математического моделирования. **Результаты:** Представлена структурная схема системы регулирования тягового усилия локомотива, реализованная на базе регулятора с нечеткой логикой. Регулятор оптимизирует параметры скольжения колесных пар для обеспечения максимальной силы тяги локомотива в условиях изменяющегося сцепления. Правила нечеткого управления сформированы на основе экспертных лингвистических оценок положения рабочей точки на кривой зависимости коэффициента сцепления. При этом отсутствует необходимость в точной математической модели, описывающей процессы в системе «колесо — рельс». Алгоритм нечеткого управления разработан в среде MATLAB с применением инструментария Fuzzy Logic Toolbox. Проведено математическое моделирование функционирования нечеткого регулятора с использованием ранее разработанной полномасштабной продольно-вертикальной динамической модели тепловоза 2ТЭ25А. **Практическая значимость:** Результаты моделирования доказывают эффективность предложенной системы управления на основе нечеткой логики, показывают высокие тяговые свойства тепловоза при изменении состояния рельсов во всем скоростном диапазоне. Разработанный алгоритм управления тягой локомотива может быть использован при проектировании и внедрении в эксплуатацию перспективных высокоеффективных систем защиты от боксования и юза, позволяющих существенно повысить тяговые свойства локомотивов при оптимальном износе в системе «колесо — рельс».

Ключевые слова: Тепловоз, колесная пара, боксование, сцепление, тяговое усилие, коэффициент сцепления, модель Полаха, условия контакта, нечеткое управление, управление скольжением локомотива.

Введение

Сцепление между колесом и рельсом является решающим фактором для реализации заявленных тяговых качеств любого локомотива. Используемый в настоящее время в технической литературе термин «защита от боксования» в связи с широким внедрением микропроцессорных, высокоинтеллектуальных систем управления тягой, совершенствования силовой части электроприводов, по нашему

мнению, несколько устарел. Более точный термин — «регулируемое скольжение» подразумевает не просто защиту от боксования, а обеспечивает поддержание тяговых свойств локомотива на максимально возможном уровне, при этом не допуская чрезмерного износа в системе «колесо — рельс» [1, 2].

Увеличение тягового усилия представляет собой чрезвычайно сложную проблему из-за различного рода процессов, происходящих в системе «колесо — рельс», их стохастического характера вследствие большого количества эксплуатационных факторов с нелинейными и изменяемыми во времени зависимостями. Для изучения влияния указанных эксплуатационных факторов и синтеза алгоритма управления проскальзыванием локомотива ранее была разработана полномасштабная динамическая модель тепловоза, учитывающая все его основные динамические компоненты [3]. Указанная математическая модель представляет собой динамику локомотива в продольном и вертикальном направлениях, а также модель механики контакта «колесо — рельс», в качестве которой используется модель Полаха [4–6]. Данная модель максимально точно учитывает физические процессы в контакте «колесо — рельс», поскольку была проверена как относительно точная для анализа силы тяги локомотивов и верифицирована путем сравнения с экспериментальными данными [5]. В отличие от традиционно используемых моделей подобного рода [7], данная модель позволяет описать всю доступную в эксплуатации область коэффициентов сцепления и смоделировать величину тягового усилия, создаваемого благодаря такому контакту в зависимости от относительного скольжения колес, скорости локомотива, состояния пути, материала колеса и рельса, геометрии контакта.

Цель данной работы — с помощью нечеткого регулятора (Fuzzy-регулятор) достичь максимально возможной силы тяги локомотива в конкретных условиях эксплуатации при минимально возможном проскальзывании колесных пар.

Структурная схема системы управления тяговым усилием тепловоза с нечеткими регуляторами

На рис. 1. представлена структура системы управления тягой тепловоза с использованием нечетких регуляторов. Задание на момент каждого тягового электродвигателя Мз1–6 поступает на вход сумматора, где к нему добавляется корректирующий момент dM_{k1-6} с выхода нечетких регуляторов. На вход нечетких регуляторов поступают сигналы о текущих значениях скорости относительного скольжения каждой колесной пары и коэффициенте сцепления. В данной работе нечеткие регуляторы работают на основе значений указанных параметров, поступающих из моделей Полаха для каждой колесной пары. На практике для получения информации о коэффициенте сцепления потребуются специальные решения по его идентификации. Один из возможных алгоритмов его идентификации

с использованием информации о значении текущей силы тяги F_t представлен в [8]. Параметр относительного скольжения при этом легко измеряется посредством штатных датчиков частоты вращения колесных пар.

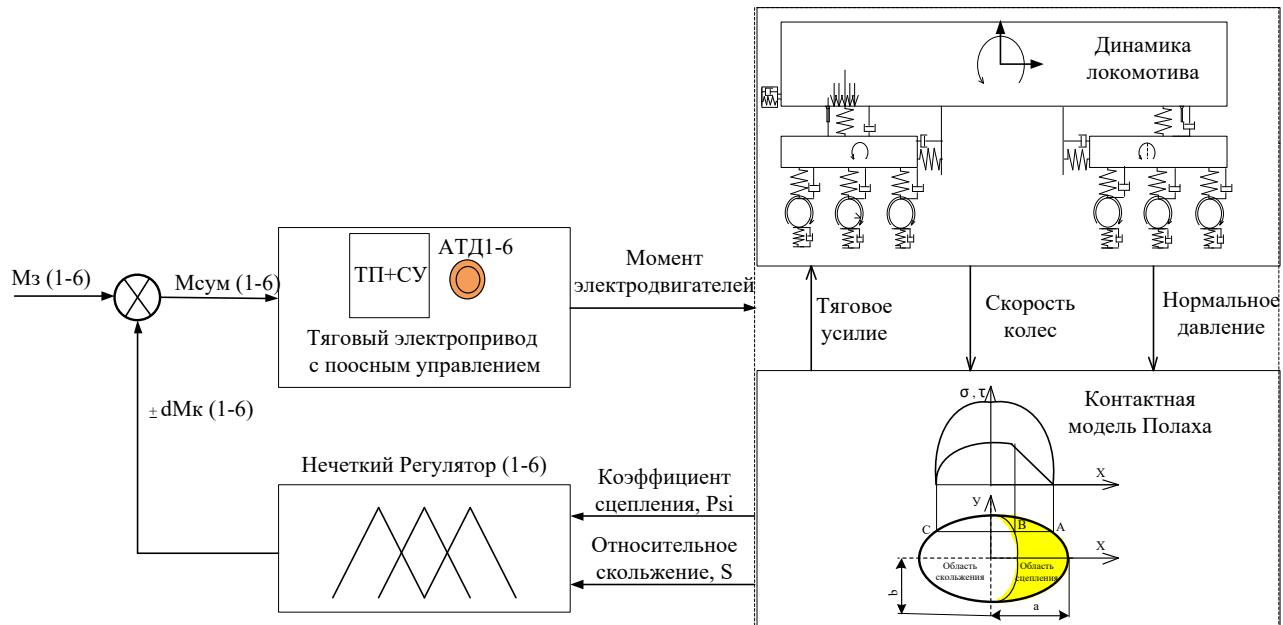


Рис. 1. Структура модели управления тягой тепловоза с использованием нечетких регуляторов

Нечеткие контроллеры имеют множество преимуществ, учитывая, что они разрабатываются с использованием нечетких лингвистических правил, основанных на экспертных знаниях и конкретных числовых данных, без существования подходящей математической модели. Нечеткая логика и теория нечетких множеств лежат в основе многих методов исследования и моделирования систем, относящихся к области искусственного интеллекта. Алгоритмы с нечеткой логикой часто используются для управления сложными процессами в тех случаях, когда с помощью других методов трудно определить существующие зависимости между переменными. По отношению к классическому подходу с четким контролем нечеткое управление представляет собой естественную методологию использования человеческих (эвристических) знаний, поскольку эксперты могут применять свои знания, формируя стратегию управления с использованием лингвистических правил. Кроме того, нечеткие регуляторы более гибкие по сравнению с классическими, так как управляющие переменные можно легко модифицировать по принципу «ошибки и проба». Нечеткая логика представляет собой расширение общепринятой логики (логики Булла), применяемой для работы с точными значениями, существующими между предельными значениями «истина» и «ложь». В ее основе лежит теория нечетких множеств, основные принципы которой были сформулированы американским профессором Лотфи Заде. По сути, нечеткую систему управления следует рассматривать как объект в сфере искусственного

интеллекта, функционирующий в контуре обратной связи регулятора и принимающий решения в режиме реального времени. Нечеткий регулятор воздействует на электромагнитный момент тягового привода, изменяя его величину в соответствии с условиями сцепления.

Описание структуры и правил работы нечеткого регулятора

Предложенный контроллер нечеткой логики использует информацию о скорости изменения относительного проскальзывания и коэффициента сцепления каждой оси. В данной статье нечеткие регуляторы работают строго по выходу модели Полаха. Каждый из нечетких входов производной относительного проскальзывания dS/dt и производной коэффициента сцепления $dPsi/dt$ выражается как пять нечетких функций принадлежности, например положительная большая (P_b), положительная малая (P_s), ноль (0), отрицательная малая (N_s) и отрицательная большая (N_b). Выходом нечеткого логического контроллера является команда на компенсацию (с целью увеличения или уменьшения) крутящего момента для каждого из электродвигателей. Зависимости силы сцепления для типичных сухих и влажных условий по модели Полаха для 2ТЭ25А показаны на рис. 2.

Нечеткие правила разработаны на основе деления кривой коэффициента сцепления на четыре различных зоны в соответствии со значениями производных dS/dt и $dPsi/dt$ (зоны 1–4 представляют кривую состояния сухого контакта, зоны 1^*-4^* представляют кривую состояния влажного контакта). Характеристики описанных выше процессов в терминах dS/dt и $dPsi/dt$ подробно описаны ниже. В процессах 1 и 1^* dS/dt положительна и $dPsi/dt$ положительна. В 2 и 2^* dS/dt положительна и $dPsi/dt$ отрицательна. В 3 и 3^* dS/dt отрицательна и $dPsi/dt$ положительна. В 4 и 4^* dS/dt отрицательна и $dPsi/dt$ отрицательна. Кроме того, учитывается переходное состояние, вызванное изменением состояния контакта колеса с рельсом. Таким образом, были добавлены два дополнительных процесса. Процесс 5 представляет собой переходный процесс от сухой кривой к мокрой кривой с положительным dS/dt и очень большим отрицательным $dPsi/dt$. Процесс 6 представляет собой переход от мокрой кривой к сухой кривой с отрицательным dS/dt и очень большим положительным $dPsi/dt$. Принцип нечеткой логики заключается в поддержании коэффициента сцепления на максимальном значении «Опт» для условий сухого контакта или на «Опт*» для условий влажного контакта путем уменьшения команды крутящего момента, когда значение относительного скольжения находится на правой стороне от максимального значения, и увеличения команды крутящего момента, когда оно находится на левой стороне от максимального значения.

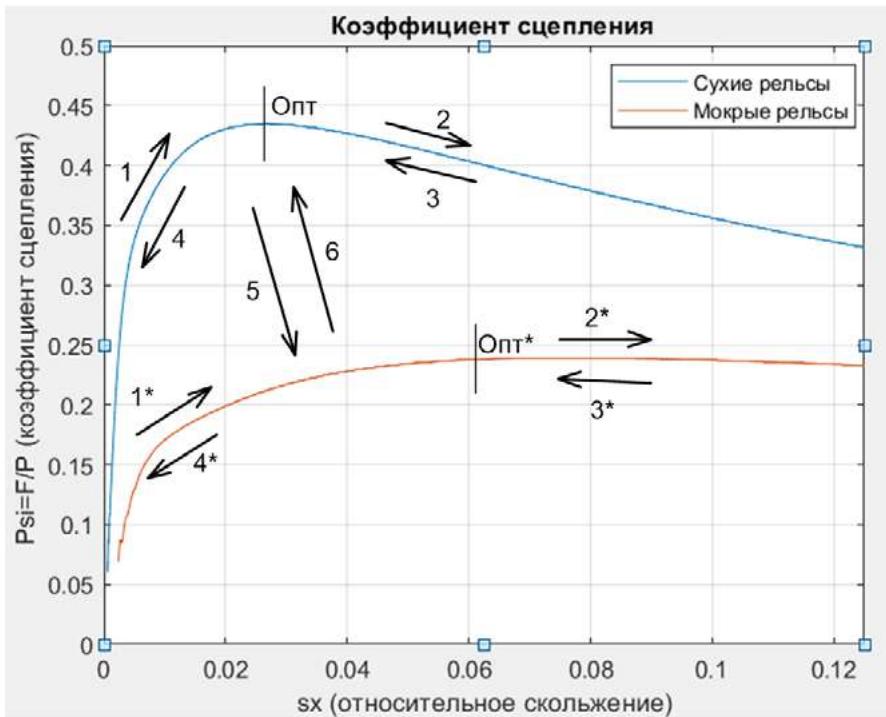


Рис. 2. Иллюстративный график коэффициентов сцепления при сухих и влажных рельсах для нечетких правил

Функции принадлежности входных и выходной переменных представлены на рис. 3, 4. Нечеткие правила управления входов и выхода представлены в таблице.

Нечеткие правила управления входов и выходов

dS/dt	$d\Psi/dt$				
	P_b	P_s	0	N_s	N_b
P_b	P_b	P_s	N_s	N_s	N_s
P_s	P_s	P_s	0	N_s	N_s
0	P_s	0	0	P_s	P_s
N_s	N_s	N_s	P_s	P_s	P_b
N_b	N_s	N_s	P_s	P_s	P_b

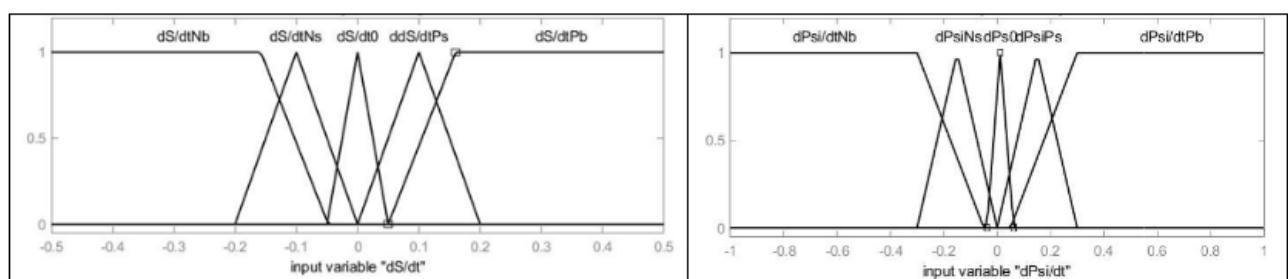


Рис. 3. Функции принадлежности входных переменных

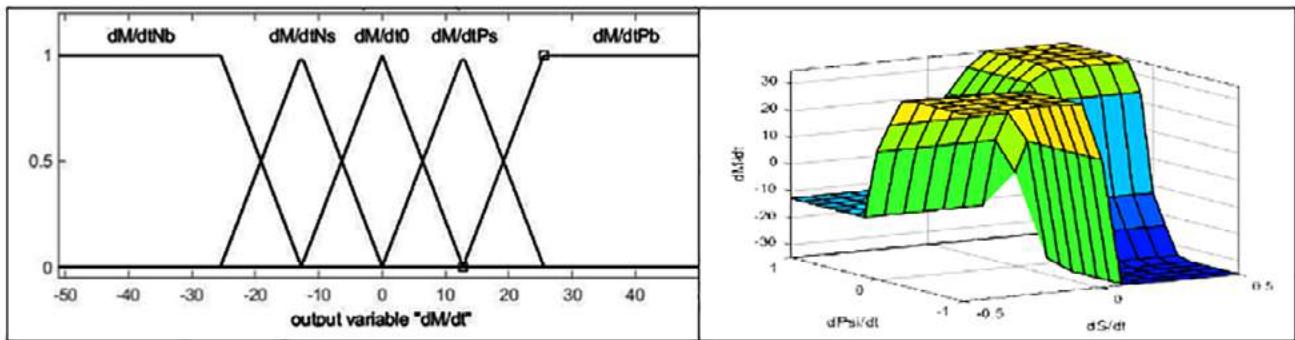


Рис. 4. Функции принадлежности выходной переменной

Реализация нечеткого регулятора

Для реализации процесса нечеткого моделирования в среде MATLAB пред назначен специальный пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox [8]. В рамках этого пакета пользователь может выполнять необходимые действия по разработке и использованию нечетких моделей в интерактивном режиме с помощью графических средств редактирования и визуализации всех компонентов систем нечеткого вывода.

Редактор FIS систем нечеткого вывода является основным средством, которое используется для создания или редактирования систем нечеткого вывода в графическом режиме. Редактор FIS может быть открыт с помощью ввода функции `fuzzy` в командной строке (рис. 5). Эта функция предоставляет пользователю возможность задавать и редактировать на высоком уровне свойства системы нечеткого вывода, такие как число входных и выходных переменных, тип системы нечеткого вывода, используемый метод дефазификации и т. д.

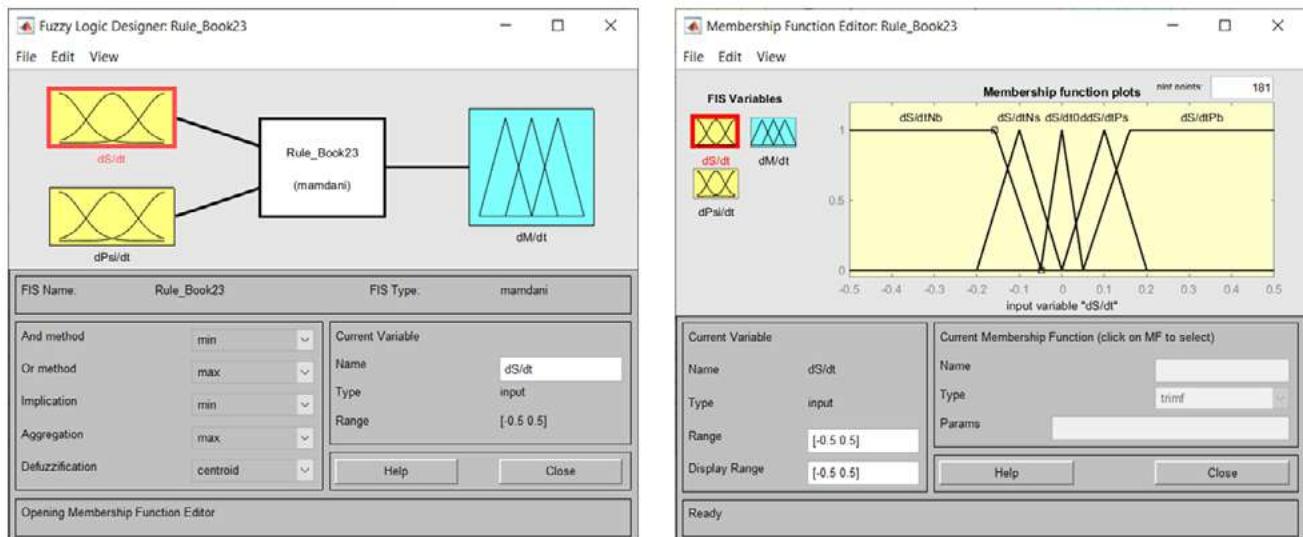


Рис. 5. Графический интерфейс редактора FIS

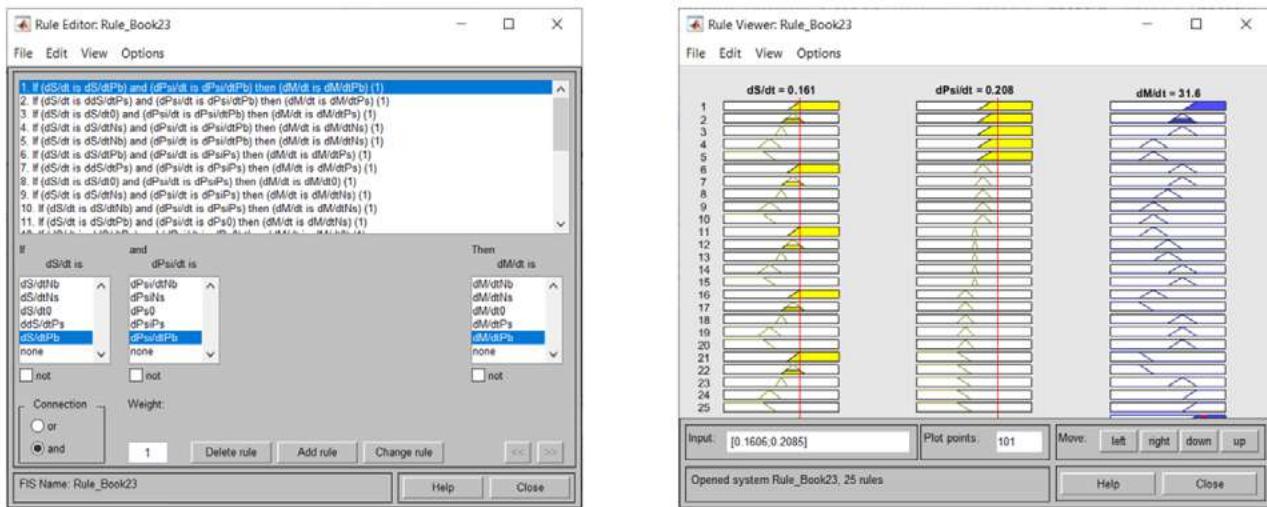


Рис. 6. Графический редактор нечетких правил управления и контроль входов/выходов

После того как с помощью данного редактора сформированы входные и выходные функции нечеткого регулятора (рис. 3), определяются правила обработки входов и получения соответствующих выходов (табл., рис. 6), полученный файл (в нашем случае Rule_Book23.fis) с соответствующим блоком вставляется в моделируемую систему управления проскальзыванием. В реальной системе управления реализация нечетких регуляторов выполняется с использованием стандартного программируемого логического контроллера.

Описание модели тепловоза с управлением на основе нечетких регуляторов

На рис. 7 представлена модель тепловоза, тяговое усилие которого регулируется с использованием разработанного нечеткого регулятора. Общая модель включает в себя динамическую модель тепловоза, шесть моделей механики контакта «колесо — рельс» Полаха, модель автосцепки, модель поезда, упрощенную модель задания тягового усилия для 2–6 колесных пар и модель регулирования тяги с помощью нечеткого регулятора для первой колесной пары, а также саму модель нечеткого регулятора. Кроме того, модель содержит осциллографы для наблюдения за параметрами и имеет блок сохранения моделируемой информации в специальном файле для последующей его обработки. Ввиду ограниченной вычислительной мощности в модели регулированию подвергается только первая колесная пара локомотива. На остальные пять осей поступает плавно нарастающий и затем ограниченный на заданном уровне тяговый момент.

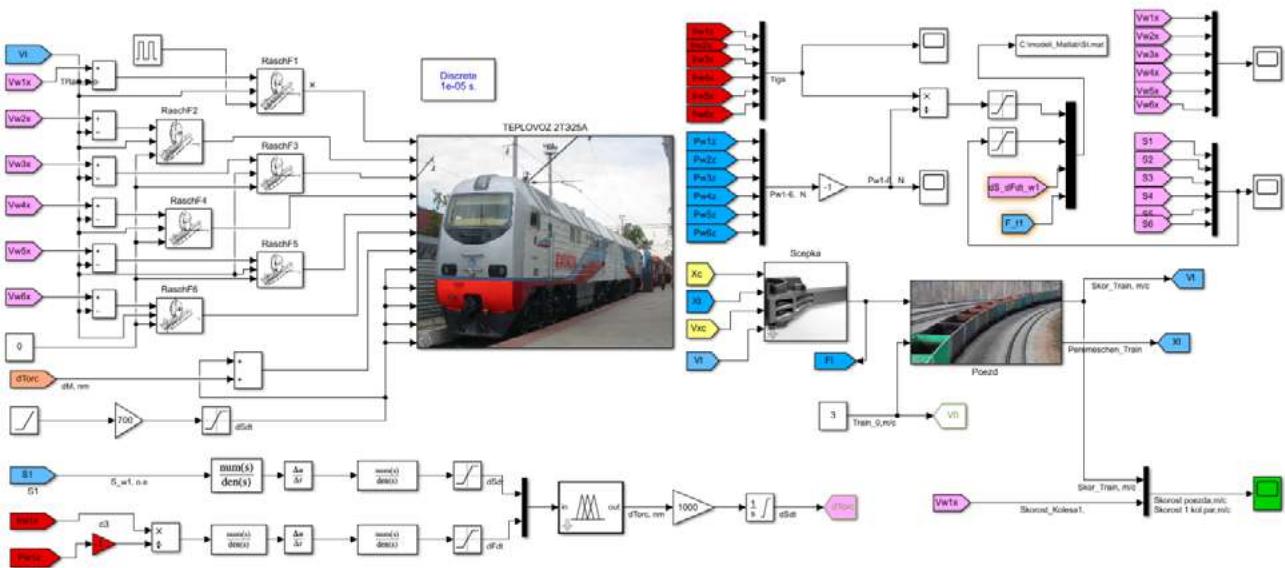


Рис. 7. Модель тепловоза 2ТЭ25А с регулятором проскальзывания первой колесной пары на нечеткой логике

Результаты моделирования

На рис. 8 приведены результаты переходной реакции тепловоза 2ТЭ25А при работе на сухих и мокрых рельсах с предложенным нечетким логическим контроллером, а именно скорость вращения первой колесной пары и скорость поезда. Начальная рабочая скорость была установлена на уровне 10 км/ч. Движение начинается на сухих рельсах, затем на 20-й секунде первая колесная пара наезжает на мокрые рельсы. На 40-й секунде выполняется обратный переход из влажного состояния в состояние сухого контакта, но уже со скорости 16 км/ч. Далее переходы выполняются на 60-й и 80-й секунде при скоростях 20,5 и 23 км/ч.

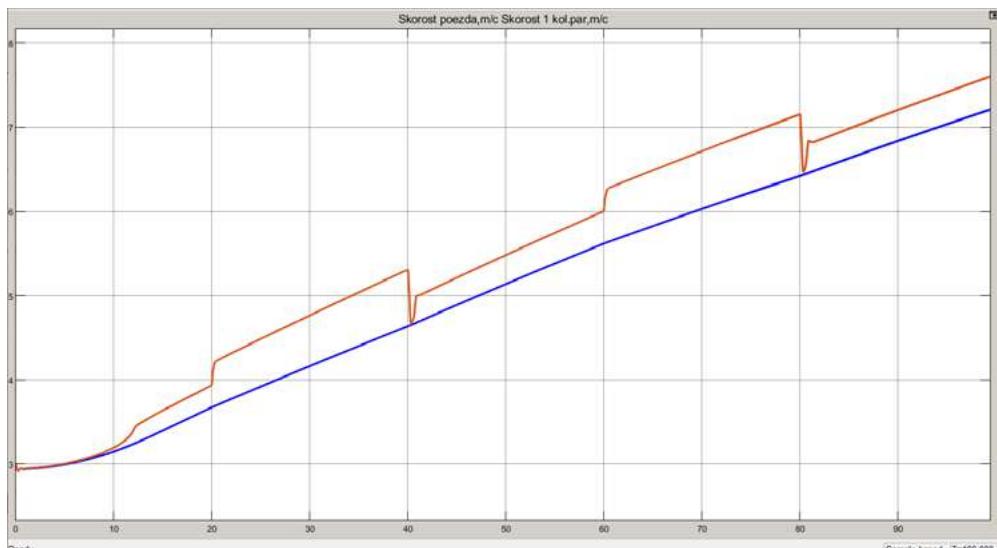


Рис. 8. Скорость вращения первой колесной пары (красный), скорость поезда (синий)

Соответствующая работа нечеткого регулятора представлена на рис. 9, на котором показан реализованный коэффициент сцепления первой колесной пары и соответствующее ему скольжение при переходах с сухих рельсов на мокрые и наоборот. Порядок движения по кривой сцепления от начала движения и до конца обозначен стрелками. Как видно, в установившихся режимах (точки 2–11, 4–9) нечеткий регулятор устанавливает управляющее усилие в соответствии с условиями эксплуатации и достигает максимально доступной тяговой силы, реализуя максимально возможный (оптимальный) коэффициент сцепления колес с рельсами как на сухих, так и на мокрых рельсах. С помощью корректировки нечетких правил, представленных в табл., установившееся положение рабочей точки на кривой сцепления возле оптимума можно слегка сдвигать влево или вправо (кривая «б» на рис. 9). В этом случае можно добиться минимального скольжения при близком к оптимуму коэффициенте сцепления на восходящей, а значит, и более устойчивой части кривой сцепления и при меньшем проскальзывании.

На рис. 10 показано реализованное тяговое усилие по всем осям тепловоза. Видно, что первая (лимитирующая) колесная пара, находящаяся под контролем нечеткого регулятора, реализует на сухих рельсах тяговое усилие на 22 % больше, чем колесные пары 2–6. На осях 2–6 тяговое усилие не изменяется в связи с тем, что в данном численном эксперименте изменение условий сцепления с сухих на мокрые выполняется только для первой колесной пары. Остальные едут непрерывно по сухим рельсам.

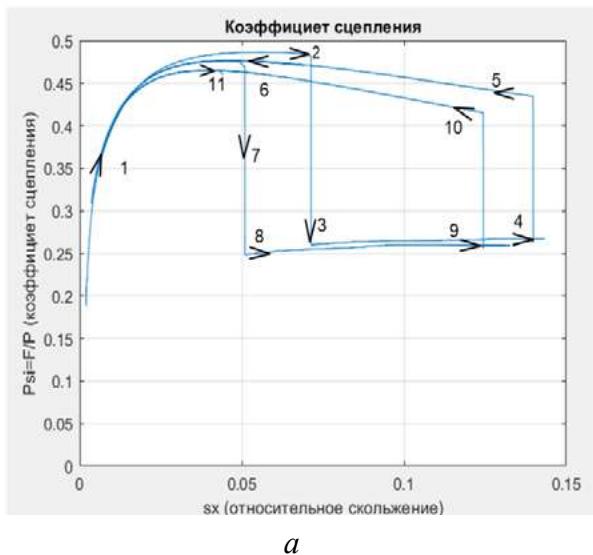
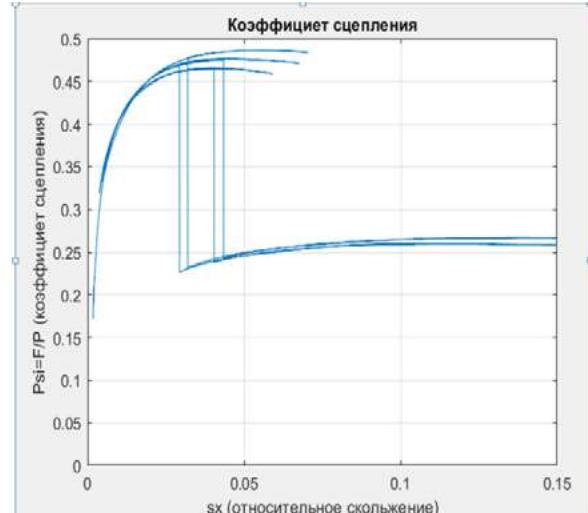
*a**б*

Рис. 9. Реализованный коэффициент сцепления:
нечеткие правила в соответствии с таблицей (*а*) и скорректированные правила (*б*)

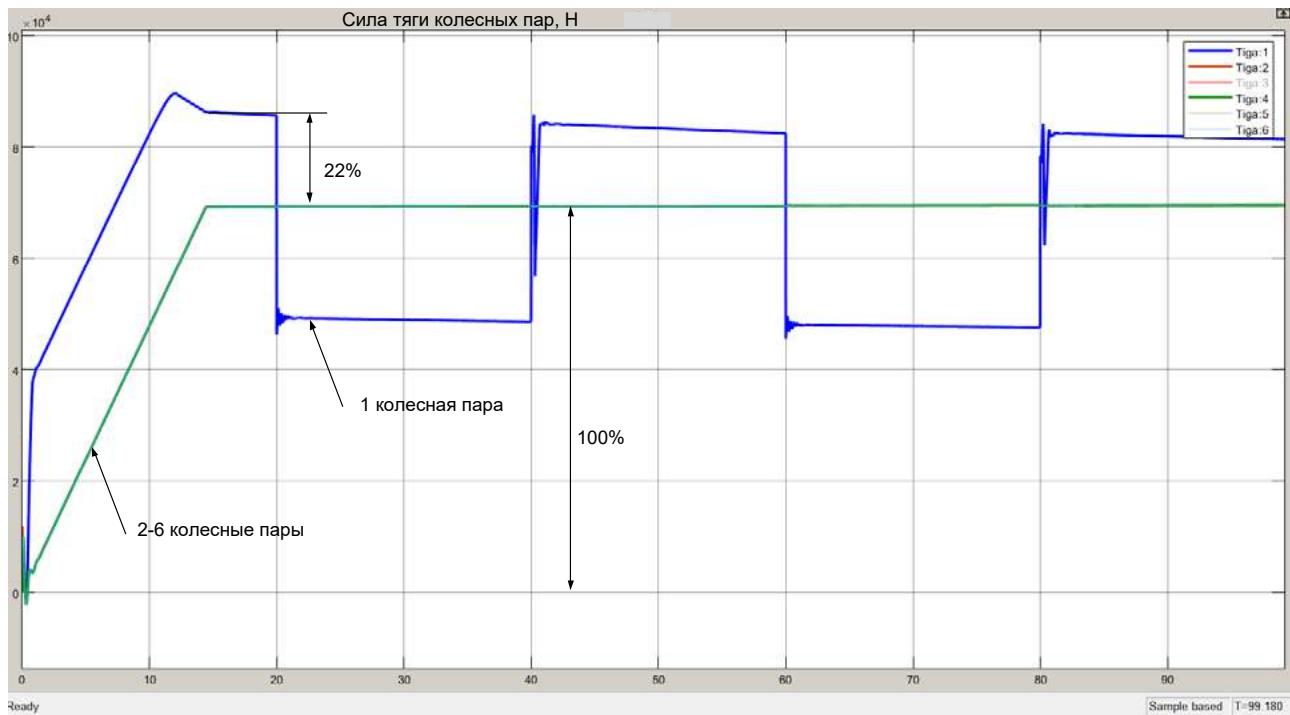


Рис. 10. Реализованные силы тяги колесных пар по шести осям тепловоза

Выводы

1. Выполнена разработка нечеткого регулятора, позволяющего оптимизировать величину силы тяги локомотива и проскальзывания колес в соответствии с изменяющимися условиями сцепления. Преимущество использования нечеткой логики заключается в том, что управляющий регулятор может быть спроектирован с использованием лингвистических знаний, а это означает, что точная математическая модель, описывающая процессы в системе «колесо — рельс», не требуется. Нечеткий регулятор также обеспечивает нелинейное действие управления и может быть легко модифицирован и настроен.

2. Работа нечеткого регулятора была проверена с использованием интегрированной динамической 2D-модели тепловоза 2ТЭ25А. Результаты моделирования подтверждают высокую эффективность предложенного нечеткого регулятора. Сила тяги лимитирующей колесной пары превышает силу тяги, развиваемую остальными колесными парами, не менее чем на 22 %. При этом скольжение колесной пары находится в оптимальной точке характеристики сцепления.

3. Представленная модель нечеткого регулятора может быть эффективно использована в качестве основы для проектирования систем управления с увеличением силы тяги локомотивов и одновременным снижением износа колес и рельсов.

Список источников

1. Космодамианский А. С. Новые методы предотвращения боксования локомотивов и возможность их реализации / А. С. Космодамианский, О. В. Измеров, С. О. Копылов, В. О. Корчагин // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием. — Омск, 2016. — С. 182–189.
2. Патент RU 2845291 Российская Федерация. Способ обнаружения боксования и юза колес транспортного средства с электрической передачей: заявл. 03.02.2025: опубл. 15.08.2025 / К. С. Перфильев, В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский и др. — 17 с.
3. Волохов Г. М. Разработка двухмерной динамической модели шестиосного тепловоза с учетом условий сцепления в контакте «колесо — рельс» / Г. М. Волохов, К. С. Перфильев // Вестник ВНИКТИ. — 2025. — Вып. 108. — С. 110–128.
4. Polach O. A Fast Wheel — Rail Forces Calculation Computer Code / O. Polach // Vehicle System Dynamics. — 1999. — Vol. 33. — Pp. 728–739.
5. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit / O. Polach // Wear. — 2005. — Vol. 258. — Pp. 992–1000.
6. Polach O. Influence of Locomotive Tractive Effort on the Forces Between Wheel and Rail / O. Polach // Vehicle System Dynamics. — 2001. — Vol. 35. — Pp. 7–22.
7. Меншутин Н. Н. Зависимость между силой сцепления и скоростью скольжения колесной пары локомотива / Н. Н. Меншутин // Вестник ВНИИЖТ. — 1960. — № 7. — С. 12–16.
8. Djukic M. A fuzzy model for an increase in locomotive traction force / M. Djukic, S. Rusov, Z. Mitrović // Transport. — 2010. — Vol. 25. — Pp. 36–45.

Дата поступления: 04.06.2025

Решение о публикации: 11.07.2025

Контактная информация:

БАБКОВ Юрий Валерьевич — канд. техн. наук, генеральный директор; babkov@bk.ru

ПЕРФИЛЬЕВ Константин Степанович — канд. техн. наук, вед. науч. сотр.; perfiliev@vnikti.com

ЖУРАВЛЕВ Сергей Николаевич — канд. техн. наук, зав. НИ КБ ЭМСУ, заместитель главного инженера по перспективным проектам; zuravlev_sn@vnikti.com

УКОЛОВ Иван Александрович — ведущий программист, старший преподаватель;
ukolov-ia@vnikti.com

Controlling the Locomotive Traction Effort Using Fuzzy Logic Algorithm

Yu. V. Babkov¹, K. S. Perfil'yev¹, S. N. Zhuravlev¹, I. A. Ukolov^{1,2}

¹Research and Design and Technological Institute of Rolling Stock (JSC "VNIKTI"), 410, Oktyabrskoy Revolyutsii str., Kolomna, 140402, Russian Federation

²Kolomna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University, 408, Oktyabrskoy Revolyutsii str., Kolomna, 140400, Russian Federation

For citation: Babkov Yu. V., Perfil'yev K. S., Zhuravlev S. N., Ukolov I. A. Controlling the Locomotive Traction Effort Using Fuzzy Logic Algorithm. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 87–99. (In Russian)
DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-87-99

Summary

Purpose: To create an algorithm for controlling locomotive traction effort that maximizes locomotive traction performance under varying adhesion conditions while minimizing wheel-rail slip forces. **Methods:** Fuzzy logic systems, fuzzy set and fuzzy logic theory, elements of artificial intelligence, automatic control theory, and numerical modelling techniques. **Results:** The presented flowchart for controlling locomotive traction effort with a fuzzy logic controller enables effectively to maximize locomotive traction effort through optimizing wheel slip control in response to changing adhesion conditions. Fuzzy control rules have been developed based on a linguistic evaluation of setpoint behaviour along the adhesion coefficient curve, eliminating the need for precise numerical modelling of wheel-rail contact. A fuzzy logic-based algorithm has been developed using a specialized MATLAB extension from the Fuzzy Logic Toolbox. Numerical simulations of the fuzzy controller's performance have been conducted using the established full-scale longitudinal/vertical dynamic model of the 2TE25A diesel locomotive. **Practical significance:** The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed fuzzy logic-based controller, highlighting enhanced traction performance of the diesel locomotive across the entire range of speeds and various railway track conditions. The traction control algorithm can be used to design and implement advanced, high-efficiency wheel slip/slide protection systems, thereby significantly enhancing locomotive traction and optimizing wheel-rail wear.

Keywords: Diesel locomotive, wheelset, slippage, adhesion, traction effort, adhesion coefficient, Polach model, contact conditions, fuzzy control, locomotive slide control.

References

1. Kosmodamianskiy A. S., Izmerov O. V., Kopylov S. O., Korchagin V. O. Novye metody predotvratshcheniya boksovaniya lokomotivov i vozmozhnost' ikh realizatsii [New methods for preventing locomotive slipping and the possibility of their implementation]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: materialy tret'ey vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhunarodnym uchastiem* [Operational reliability of the locomotive fleet and improving train traction efficiency: proceedings of the Third All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation]. Omsk, 2016, pp. 182–189. (In Russian)
2. Perfil'ev K. S., Grachev V. V., Grishchenko A. V., Bazilevskiy F. Yu. et al. *Sposob obnaruzheniya boksovaniya i yuza koles transportnogo sredstva s elektricheskoy peredachey* [Method for detecting slipping and skidding of vehicle wheels with electric transmission]. Patent RF, no. 2845291, 2025. (In Russian)
3. Volokhov G. M., Perfil'ev K. S. Razrabotka dvukhmernoy dinamicheskoy modeli shestiosnogo teplovozoa s uchetom usloviy stsepleniya v kontakte "koleso — rel's" [Development of

a two-dimensional dynamic model of a six-axle diesel locomotive considering adhesion conditions in the “wheel — rail” contact]. *Vestnik VNIKTI* [Bulletin of VNIKTI]. 2025, Iss. 108, pp. 110–128. (In Russian)

4. Polach O. A Fast Wheel — Rail Forces Calculation Computer Code. Vehicle System Dynamics. 1999, vol. 33, pp. 728–739.

5. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. Wear, 2005, vol. 258, pp. 992–1000.

6. Polach O. Influence of Locomotive Tractive Effort on the Forces Between Wheel and Rail. Vehicle System Dynamics. 2001, vol. 35, pp. 7–22.

7. Menshutin N. N. Zavisimost' mezhdu siloy stsepleniya i skorost'yu skol'zheniya kolesnoy pary lokomotiva [Dependence between adhesion force and sliding speed of a locomotive wheelset]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT]. 1960, Iss. 7, pp. 12–16. (In Russian)

8. Djukic M., Rusov S., Mitrović Z. A fuzzy model for an increase in locomotive traction force. Transport, 2010, vol. 25, pp. 36–45.

Received: June 04, 2025

Accepted: July 11, 2025

Author's information:

Yuri V. BABKOV — PhD in Engineering, General Director; babkov@bk.ru

Konstantin S. PERFILIEV — PhD in Engineering, Leading Researcher; perfiliev@vnikti.com

Sergei N. ZHURAVLEV — PhD in Engineering, Head of Research and Design Bureau for Electrical Equipment and Microprocessor Control Systems, Deputy Chief Engineer for Advanced Research Projects; zuravlev_sn@vnikti.com

Ivan A. UKOLOV — Leading Programmer; Senior Lecturer at the Kolomna Institute (Branch) of the Moscow Polytechnic University; ukolov-ia@vnikti.com

УДК 625.03

Разработка и обоснование математической модели исследования колебаний трамвая

Е. П. Дудкин, Я. С. Хомяков, А. А. Зайцев

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

Для цитирования: Дудкин Е. П., Хомяков Я. С., Зайцев А. А. Разработка и обоснование математической модели исследования колебаний трамвая // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 100–116. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-100-116

Аннотация

Цель: Разработать и обосновать математическую (компьютерную) модель взаимодействия многосекционного трамвайного экипажа с рельсовым путем, предназначенную для анализа поперечной устойчивости (виляния), вертикальной динамики и влияния параметров пути (ширина колеи, подуклонка, неровности и волнообразный износ) на безопасность и комфорт движения. **Методы:** Описана методика динамического моделирования движения трамвая в программном комплексе «Универсальный механизм» в виде сложной механической системы в постановке с инерционной моделью пути, детализированной шарнирно-силовой схемой экипажа и нелинейным контактом «колесо — рельс». **Результаты:** Приведены верификационные тесты и адаптация модели по данным натурного эксперимента, подтвердившие сходимость на уровне от 3 до 12,5 % по величине среднеквадратичных ускорений кузова. Результаты исследования подтвердили пригодность модели для обоснования норм по устройству и содержанию трамвайных путей на прямых участках. **Практическая значимость:** Разработанная модель может быть пригодна для обоснования выбора ширины колеи и подуклонки, допусков отклонений рельсовой колеи в плане и профиле, параметров допускаемого волнообразного износа, а также для оценки допустимых скоростей при заданном состоянии колес и пути. Работа дополняет существующие исследования взаимодействия экипажа и пути на рельсовом транспорте, характеризуя трамвайную кинематику, и демонстрирует воспроизводимую процедуру верификации и адаптации модели на натурных данных.

Ключевые слова: Трамвай, колесо — рельс, виляние, ширина колеи, динамика экипажа, универсальный механизм.

Внедрение скоростного трамвая является приоритетом в развитии городского рельсового транспорта современных городов-миллионников, поскольку сокращает время поездки и повышает привлекательность общественного транспорта, снижает использование личного транспорта и разгружает улично-дорожную сеть. Однако повышение скорости обостряет проблемы динамического взаимодействия подвижного состава и рельсового пути, в частности поперечной устойчивости (виляния), уровней непогашенных ускорений в салоне и контактных сил «колесо — рельс», влияющих на безопасность и комфорт движения.

Основное влияние на горизонтальную динамику рельсовых экипажей со стороны рельсового пути оказывает зазор между колесом и рельсом, который определяется шириной колеи. Действующая нормативная база для трамвайного пути устанавливает номинальную ширину колеи 1524 мм в прямых и задает допуски

в эксплуатации [1], сама методика измерения ширины была уточнена недавно, в изменении 3 к СП 98.13330.2018 в п. 5.44 с 01.03.2025, где установлено, что:

«Ширину колеи измеряют между внутренними гранями головок рельсов на уровне ниже плоскости, соединяющей верхние точки поверхностей катания рельсов:

- при рельсах РТ62 на 8 мм;
- при рельсах Р65 на 13 мм» [2].

Динамический характер взаимодействия колеса и рельса описывает поперечное непогашенное ускорение. В СП 98.13330.2018 зафиксировано, что конструкция пути «должна сводить к минимуму непогашенные поперечные ускорения, возникающие при допустимых скоростях движения, и величину их изменения за единицу времени» [2], однако конкретные значения этих величин не устанавливается, в других нормативных документах городского рельсового транспорта данные значения также не установлены. На магистральных железных дорогах норма непогашенного ускорения для пассажирских поездов регламентирована требованиями СП 119.13330.2024 и составляет 0,7 м/с² [3].

Применительно к городскому рельсовому транспорту действуют санитарные нормы СП 2.5.3650—20 [4], которые ограничивают уровни вибраций в салоне в 1/3-октавных полосах (от 1 до 80 Гц) и являются дополнительным критерием приемлемости динамического взаимодействия подвижного состава и пути.

Основной эксплуатант городского рельсового транспорта Санкт-Петербурга — СПб ГУП «Горэлектротранс», имеющий в своем парке современные сочененные трамвайные вагоны семейства «Витязь», обозначил практическую проблему: при движении на повышенных скоростях на прямых участках пути наблюдается значительное виляние экипажа, сопровождающееся ростом виброускорений и ухудшением комфорта пассажиров. Для выявления первопричин появления раскачки и количественной оценки влияния параметров пути и ходовых частей подвижного состава кафедрой «Строительство дорог транспортного комплекса» ПГУПС были выполнены натурные испытания взаимодействия «путь — экипаж» на трамваях «Витязь» с регистрацией виброускорений по трем осям на различных скоростях. Методика, условия проведения и ключевые результаты этих испытаний детально изложены в статье [5].

В натурных испытаниях на вагонах 71-931М «Витязь-М» на прямых участках, при скорости порядка 50 км/ч, обнаружен резкий рост амплитуды поперечных ускорений кузова на частотах 1–2 Гц до уровня ≈ 0,7 м/с², что значительно превышает предельное значение 0,2 м/с², установленное санитарными правилами [4] для горизонтального направления.

Эксплуатационные исследования СПб ГУП «Горэлектротранс» показывают, что это явление чаще всего проявляется на крайних тележках после пробега 15–20 тыс. км, при том что ширина колеи на «проблемных» участках движения соответствует нормативным значениям.

Аналогичную проблему исследовали ранее на магистральных железных дорогах. В результате этих исследований в 1980-х годах ширина колеи на магистральных дорогах СССР была унифицирована и уменьшена с 1524 до 1520 мм.

В работе [6] описаны исследования ширины колеи на прямых участках Московского метрополитена, где были выполнены испытания на участках с шириной колеи 1516, 1520, 1524 мм. Сужение колеи с 1524 до 1520 мм привело к снижению поперечных ускорений на 22–24 %, а до 1516 мм — на 31–35 %.

В конце 1990-х гг. Днепропетровский институт инженеров транспорта провел исследования движения четырехосных полувагонов на тележках модели 18-100 и зафиксировал рост амплитуд колебаний виляния и поперечных ускорений при увеличении зазора в колее вплоть до 0,55g при 80 км/ч [7]. Эти данные подтверждают, что эксплуатационный зазор, определяемый не только шириной колеи, но также насадкой колес на ось, профилями и износом, является определяющим параметром устойчивости.

Обоснования унификации колеи опирались на многолетние исследования ВНИИЖТ, МИИТ и др., где было показано, что уменьшение ширины колеи и, соответственно, эксплуатационного зазора снижает боковые ускорения и рамные силы, а также повышает устойчивость движения [6, 8], что подтверждается и современными исследованиями [7].

В хозяйстве городского рельсового транспорта влияние ширины колеи на эксплуатационное поведение пути отражено в работе О. Н. Садикова [9], где на основе опыта службы пути Ленинградского трамвая приведен эмпирический график изменения колеи в эксплуатации при различных значениях начальной ширины колеи (рис. 1).



Рис. 1. Зависимость эксплуатационного изменения ширины колеи от начального шаблона

Минимальные изменения колеи фиксировались при величине $\approx 1520\text{--}1521$ мм, при дальнейшем сужении появлялось частичное заклинивание колесной пары с динамическим отжатием рельсов и остаточным уширением, тогда как при ширине больше 1521 мм увеличение зазора приводило к росту угла набега колеса и ускорению эксплуатационных изменений ширины колеи, что также указывает на оптимальную ширину колеи 1520 мм. Таким образом, выполненные экспериментальные и эксплуатационные исследования в области рельсового транспорта убедительно показывают влияние ширины колеи на устойчивость движения экипажей в прямых участках пути. Однако обоснование ширины колеи и допусков на ее изменение в зависимости от скорости движения, типа экипажа и других условий эксплуатации требует проведения комплексных теоретических исследований. Это невозможно без разработки специализированной модели трамвайного экипажа и пути, верифицированной по натурным данным.

Проблема динамического взаимодействия подвижного состава и рельсового пути является комплексной и требует системного подхода. Современные международные исследования, в частности работы Чжай Ваньмина [10], демонстрируют эффективность рассмотрения системы «экипаж — путь» как единого целого (*vehicle-track coupled dynamics*) для прогнозирования виляния, вертикальной динамики и оценки устойчивости.

Разрабатываемая в настоящем исследовании модель также реализует указанный интегральный подход, адаптируя его к специфике сочлененной конструкции трамвайного экипажа и параметрам городского пути.

При разработке модели за основу взят сочлененный трамвайный вагон 71-931М «Витязь-М», масса тары которого 37 т по паспортным данным производителя [11]. Для исследования разработана модель системы с применением современного программного комплекса «Универсальный механизм», который реализует методы многотельной динамики для механических систем с кинематическими связями, нелинейными элементами и контактами.

Рельсовый путь

Исходя из задач работы — исследование взаимодействия «колесо — рельс», оценка устойчивости, отклика на неровности и критической скорости — в качестве расчетной принята инерционная модель пути. Она представляет собой компромисс по уровню сложности и обеспечивает физически достаточную точность.

Данная модель описывает путь заданной геометрии рельсом в виде абсолютно твердого тела с тремя степенями свободы (рис. 2):

- вертикальное перемещение (1 — Z);
- поперечное перемещение (2 — Y);
- вращение вокруг продольной оси (3 — R_x).

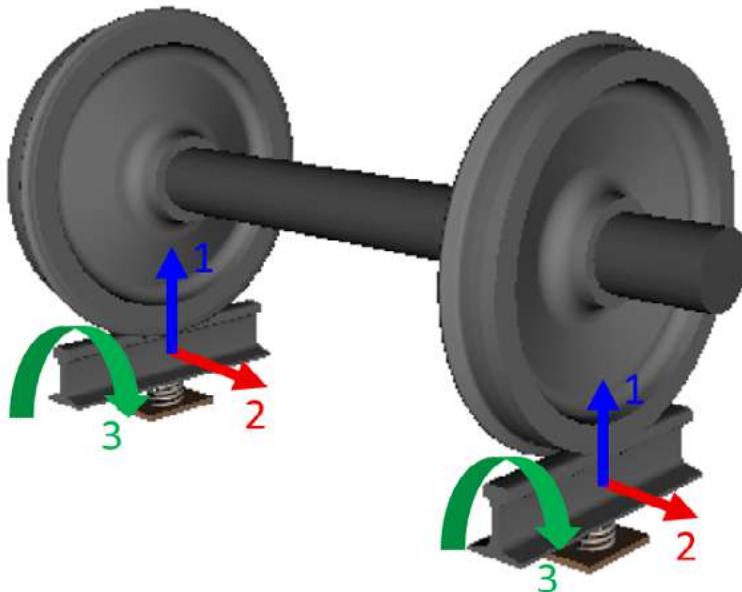


Рис. 2. Степени свободы инерционной модели пути

Подрельсовое основание в данном описании задается эквивалентными упругодемпфирующими связями, обеспечивающими достоверность в частотном диапазоне до ~ 100 Гц и корректную работу при контактной нелинейности (включая возможную кратковременную потерю контакта колеса с рельсом). Распределенная гибкость рельса и волновые эффекты, значимые для высокочастотных задач, в данной постановке не моделируются, для них требуется упругая модель пути [12].

Модель экипажа

Экипаж в разработанной модели представлен как система из 27 абсолютно твердых тел:

- 6 колесных пар;
- 12 корпусов букс;
- 3 рамы тележек;
- 3 шкворневых балки;
- 3 секции кузова.

Массо-инерционные параметры заданы на основании данных, рассчитанных в CAD-системе, а также паспортных характеристик.

Конструкция тележки трамвая «Витязь» имеет двухступенчатую систему подвешивания. Первая ступень связывает буксы с рамой тележки и обеспечивает вертикальную податливость для гашения вертикальных колебаний. Букса фиксируется на раме через поворотный шарнир, при этом нагрузка воспринимается наклонными пружинно-демпфирующими элементами.

В модели данный узел описывается поворотным шарниром с одной степенью свободы вокруг оси Y . Силовая модель пружин задается силой, определяемой следующим выражением:

$$F = F_0 - c(x - x_0) - d \cdot v,$$

где F_0 — сила в положении равновесия;
 c — приведенный коэффициент жесткости;
 d — приведенный коэффициент диссипации;
 x_0 — свободная длина (в положении равновесия).

Характеристики пружины, люфты и податливость резинометаллических элементов конструкции учитываются эквивалентно в c и d , а силы трения в шарнире не моделируются.

Таким образом, характеристика первой ступени подвешивания задается тремя параметрами:

1. Коэффициент жесткости — определяет перемещения и частоты колебаний.
2. Коэффициент диссипации — определяет затухание колебаний и устойчивость к резонансам.
3. Свободная длина — задает геометрию в положении покоя и величину предварительного сжатия.

Вторая ступень реализована между рамой тележки шкворневой балкой. Узел задает передачу вертикальных нагрузок от кузова, ограничение крена кузова и направляющую способность тележки. Вторая ступень подвешивания допускает поперечные и вертикальные перемещения шкворневой балки (и кузова), а также вращение вокруг оси X .

Упругая составляющая второй ступени моделируется эквивалентными жесткостями — вертикальной, поперечной и изгибной. Демпфирующая составляющая описывается характеристиками гасителя колебаний в вертикальном направлении Z , а также линейными диссипативными связями по осям X и Y для согласования уровней затухания.

Таким образом, характеристика второй ступени подвешивания задается шестью параметрами:

1. Эквивалентный коэффициент вертикальной жесткости — определяет статическую осадку кузова, перемещения и собственные частоты в паре «кузов — тележка».
2. Эквивалентный коэффициент поперечной жесткости — влияет на рамные силы, поперечные и продольные колебания кузова.
3. Эквивалентный коэффициент изгибной жесткости — формирует крен кузова.

4. Вертикальный показатель диссипации — отражает работу гасителей колебаний при сжатии и отбое подвешивания.

5. Продольный коэффициент диссипации — учитывает гашение энергии в продольном направлении при взаимодействии реальных элементов конструкции экипажа, не моделируемых явно.

6. Поперечный коэффициент диссипации — учитывает гашение энергии в поперечном направлении при взаимодействии реальных элементов конструкции экипажа, не моделируемых явно.

Отличительным элементом рассматриваемого экипажа является буксовый узел со сферическим самоустанавливающимся роликовым подшипником. Промежуточные исследования его моделирования показали, что чисто вращательное описание (3 степени свободы) переоценивает связь колес в оси при проходе вертикальных неровностей. Кроме того, такой подход не учитывает наличие люфтов:

- в соединении корпуса буксы с рамой;
- в посадке подшипника на корпусе буксы.

Добавление дополнительной поступательной степени свободы по Y с ограничителями (± 3 мм как половина люфта) адекватно воспроизводит кинематику и снижает паразитное вовлечение второго колеса в колебания, что видно при сравнении графиков на рис. 3 и 4.

Передача нагрузок от кузова экипажа на тележки выполняется через шкворневой узел.

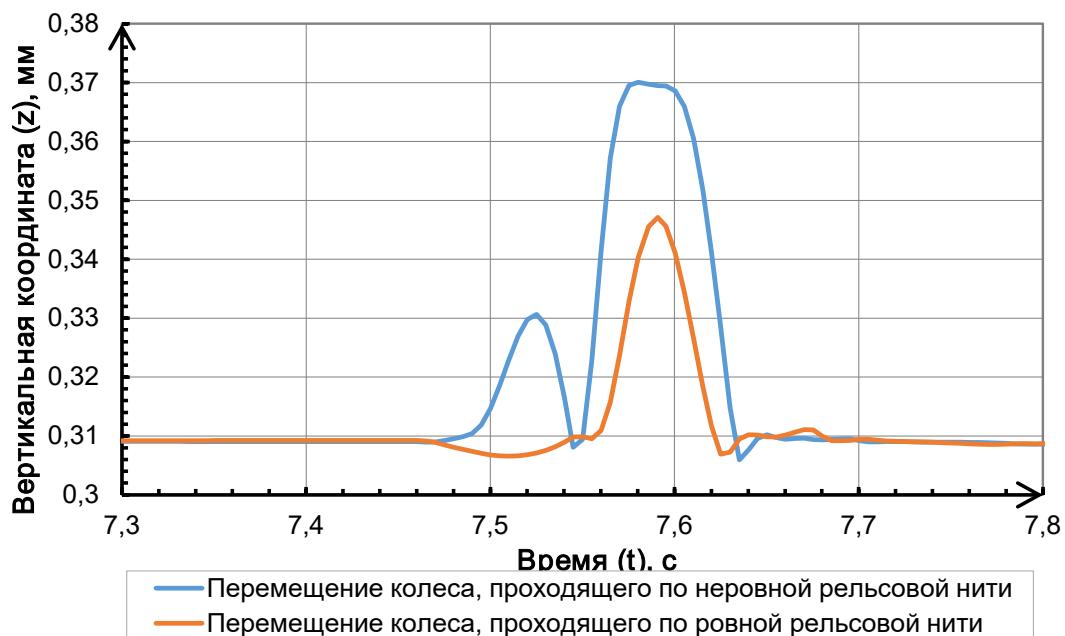


Рис. 3. Реакция колес на прохождение одиночной вертикальной неровности при описании буксового подшипника тремя степенями свободы

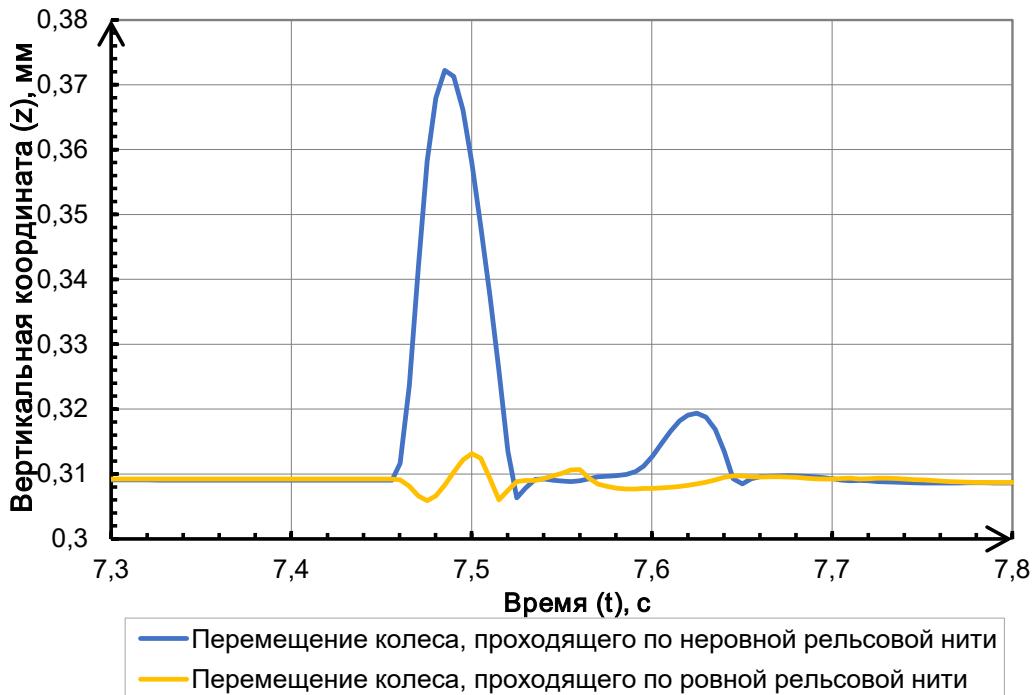


Рис. 4. Реакция колес на прохождение одиночной вертикальной неровности при описании буксового подшипника четырьмя степенями свободы

Передняя и задняя тележки трамвая «Витязь» — поворотные; они обеспечивают прохождение экипажем кривых участков пути. Соответственно, передняя и задняя кузовные секции передают нагрузки на тележку через шкворневой узел, смоделированный в виде поворотного шарнира.

Промежуточные результаты моделирования показали, что пренебрежение фрикционными моментами в шкворневом узле поворотных тележек занижает запас устойчивости и снижает критическую скорость трамвайного экипажа, провоцируя неестественный рост поперечных колебаний кузова. Поэтому необходим учет трения в шкворне для поворотных тележек; он описывается через момент трения с переходом «сцепление — скольжение».

Средняя секция опирается на неповоротную тележку. Однако для описания этого сочленения в модель необходимо ввести квазиповоротную степень свободы с малым пределом (0,001 рад) и жесткими ограничителями — во избежание численной «раскрутки» колебаний экипажа.

Таким образом, характеристика сочленения поворотных тележек с крайними секциями кузова задается совокупностью из четырех фрикционно-упругих параметров шкворня:

- предельный момент трения в шкворневом узле;
- отношение коэффициента трения сцепления к коэффициенту трения скольжения;
- коэффициент контактной жесткости при сцеплении (определяет сопротивление упругому повороту тележки относительно секции);

- коэффициент контактной диссипации при сцеплении (определяет затухание угловых колебаний).

Характеристика сочленения неповоротной тележки с центральной секцией кузова, помимо совокупности из четырех фрикционно-упругих параметров шкворня, дополняется параметрами на условную поворотную координату (ограничением поворота):

- допустимый угол поворота (люфта) в шкворне (предельно малый);
- коэффициент контактной жесткости в зоне люфта, предотвращающий значительные угловые перемещения;
- коэффициент контактной диссипации в зоне люфта, исключающий высокочастотные колебания.

Секции кузова соединены двумя отличными узлами сочленений и наравне с поворотными тележками обеспечивают прохождение кривых участков пути. Переднее сочленение (между первой и средней секциями) представляет собой плоский шарнир с одной степенью свободы: поворот вокруг вертикальной оси с трением, но дополнительно вводится поперечная поступательная координата с малым зазором для имитации неабсолютной жесткости и подавления численной «раскрутки» колебаний. Для описания данного узла задаются 7 параметров:

- предельный момент трения по вертикальной оси;
- отношение коэффициентов трения сцепления/скольжения;
- коэффициент контактной жесткости при сцеплении;
- коэффициент контактной диссипации при сцеплении;
- допустимый поперечный зазор;
- жесткость в зоне люфта;
- диссипация в зоне люфта.

Заднее сочленение (между средней и задней секциями) использует те же параметры по вертикальной оси и дополнительно имеет степень свободы вокруг поперечной оси (складывание), что обеспечивает работу на переломах профиля, но силовыми ограничениями в ней пренебрегается.

Инструментарий программного комплекса «Универсальный механизм» позволяет смоделировать контакт «колесо — рельс» нелинейно с возможностью перехода «контакт — разрыв» и описывает это взаимодействие моделью В. Кика и И. Пиотровского.

Геометрия колес и рельсов задается профилями; ширина колеи и подуклонка выступают как варьируемые параметры.

Входные переменные включают:

- отклонения пути в плане и профиле (в том числе неровности по ПНСТ 511—2020 [13]);
- длины и амплитуды волн волнообразного износа;
- скорость движения.

Реализация описанной модели позволяет получать вертикальные и горизонтальные контактные силы взаимодействия «колесо — рельс», рамные силы, среднеквадратичные значения (СКЗ) амплитуд и ускорений кузова, собственные частоты подсистем, коэффициенты вертикальной динамики, показатели устойчивости и критическую скорость.

Перед динамическими «прогонками» модели вычисляется равновесие системы методом «численного успокоения». Постпроцессор программы используется для статистической обработки полученных результатов и многовариантных расчетов.

Разработанная модель верифицируется в соответствии с существующей теорией и адаптируется по результатам натурных испытаний.

Верификация включает:

- статический анализ (согласование суммарных вертикальных реакций с массой тары, проверка поперечной симметрии реакций в контакте колес с рельсами);
- анализ движения по идеальному прямому пути (оценка малости колебаний, рамных сил, коэффициента динамики);
- анализ прохождения левосторонних и правосторонних кривых одинаковых параметров (проверка поперечной симметрии отклика модели на изменение геометрии пути);
- оценку реакции на одиночные синусоидальные неровности профиля и плана (анализ формы отклика, затухания, непрерывности контакта);
- определение критической скорости по росту среднеквадратичного отклонения поперечных перемещений колесной пары при дискретном варьировании скорости.

Результаты верификационных проверок показали, что суммарные вертикальные реакции в контактах «колесо — рельс» составили 363 кН, что соответствует массе тары 37 т. При этом левые и правые реакции в каждой колесной паре совпадали, что подтверждает корректность заданных масс и центров масс, а также поперечную симметрию модели.

При равномерном движении на скорости 75 км/ч по «идеальному пути» среднеквадратичные значения амплитуд и ускорений кузова по осям близки к нулю, рамные силы (не более 295 Н) существенно ниже значений, характерных для неровного пути, коэффициенты вертикальной динамики принимают значения от 1,9 до 2,1, а коэффициент запаса устойчивости 5,0. Небольшие остаточные колебания объясняются дискретизацией и остаточными силами после «успокоения».

При моделировании движения экипажа в разносторонних кривых с одинаковыми параметрами ($R = 600$ м, возвышение 100 мм, скорость 70 км/ч) получены симметричные по модулю численные ряды поперечных перемещений кузова для левых и правых кривых (рис. 5).

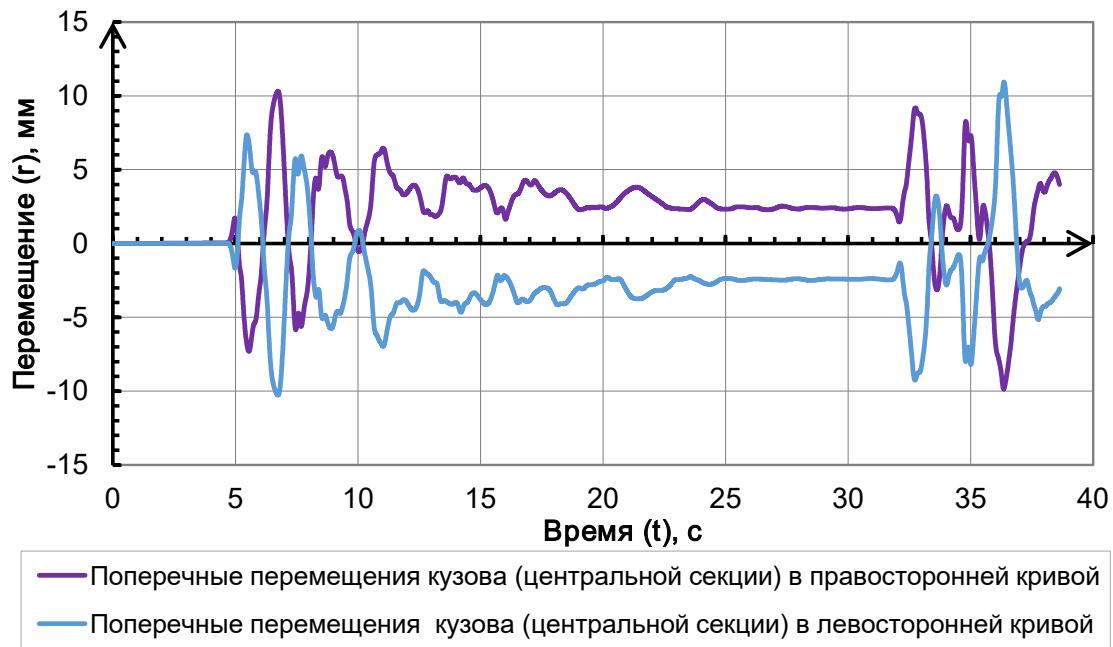


Рис. 5. Реакция кузова (средней секции) при движении в кривых разного направления

При моделировании прохода вертикальной синусоидальной «просадки» (высота 20 мм, длина 10 м) в отклике кузова фиксируется одиночный пик, затем затухающая серия колебаний, контакт колеса с рельсом сохраняется, коэффициент вертикальной динамики остается в пределах допустимого. Аналогичный характер наблюдается для синусоидальной поперечной «рихтовки», но после затухающего переходного процесса устанавливаются малые гармонические колебания, обусловленные криволинейной траекторией движения колесной пары по гармоническому закону, что соответствует общей теории движения колесной пары с коничностью бандажей. Отклики трех секций сопоставимы по амплитуде и форме, что согласуется с симметрией постановки.

Многовариантный расчет модели с шагом изменения скорости в 1 м/с выявил начало устойчивого роста среднеквадратичных отклонений поперечных перемещений первой колесной пары при 94 км/ч, согласованное с увеличением амплитуд на других колесных парах и в поперечных ускорениях кузова. Полученное значение определяет критическую скорость разработанной модели экипажа, которая превышает конструкционную скорость трамвая «Витязь», и согласуется с реальным экипажем.

Введение спектральных неровностей пути по ПНСТ 511—2020 [13], подбор коэффициента их усиления, а также задание эквивалентных жесткостей и демпфирований подвесок и трения параметров обеспечивают соответствие модели реальным условиям и позволяют адаптировать ее по данным натурного эксперимента.

С целью оценки адекватности модели проведено моделирование движения трамвайного экипажа по прямому участку пути для расчета ускорений кузова в поперечном (Y) и вертикальном (Z) направлениях на скоростях 20, 30, 40, 50 км/ч, соответствующих скоростям в натурном эксперименте. Основная оценка модели выполняется по сравнению сходимости среднеквадратичных значений ускорений кузова (табл.) [5].

Сходимость адаптированной модели

Направление колебаний	Показатель ($\text{м}/\text{с}^2$)	Скорость движения, км/ч			
		20	30	40	50
поперечное — y	СКЗ ускорений в эксперименте	0,415	0,576	0,785	1,354
	СКЗ ускорений при моделировании	0,377	0,532	0,821	1,435
	расхождение	9,1 %	7,5 %	4,6 %	6,0 %
вертикальное — z	СКЗ ускорений в эксперименте	1,305	1,818	2,524	4,323
	СКЗ ускорений при моделировании	1,350	1,875	2,491	3,784
	расхождение	3,5 %	3,1 %	1,3 %	12,5 %

Модель сходится с натурными данными не только численно, но и по характеру колебаний: в расчетах воспроизводятся тот же характер колебаний и идентичные частоты, что зафиксированы в эксперименте (рис. 6).

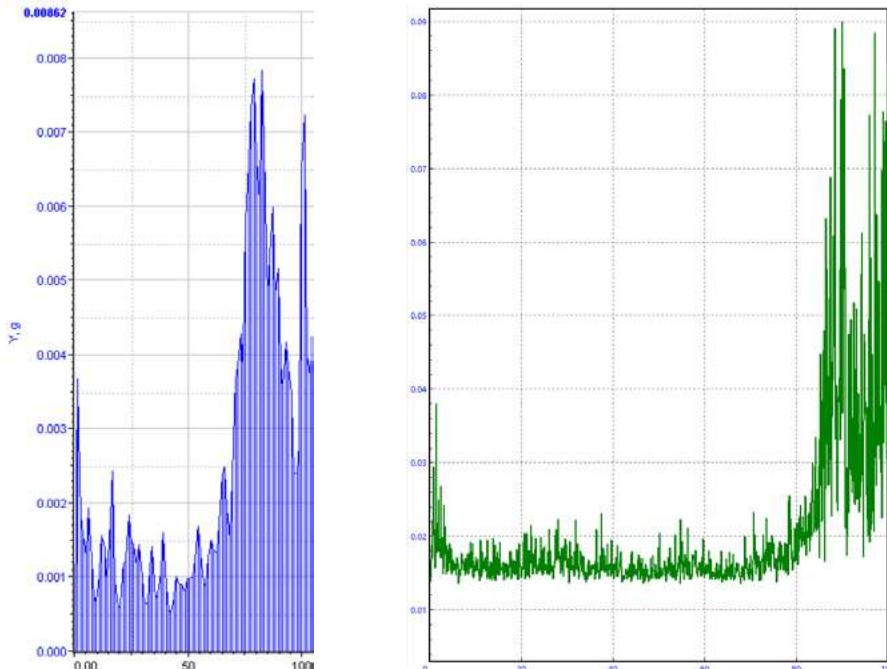


Рис. 6. Частотный характер поперечных колебаний кузова в натурном эксперименте (слева) и в разработанной модели (справа)

Колебания, полученные в натурном эксперименте и рассчитанные с помощью модели, согласуются по форме и положению максимумов, а среднеквадратичные значения ускорений по осям Y и Z различаются не более чем на 12,5 %, что является хорошим результатом для имитационной модели. Такое согласие по форме отклика и по интегральным метрикам подтверждает адекватность принятых допущений и параметров модели для анализа устойчивости и оценки комфорта.

Ключевым параметром, определяющим склонность трамвая к колебаниям виляния, выступает зазор между гребнем колеса и рабочей гранью рельса. Он зависит от ширины колеи и допусков, насадки колес на ось, профилей рельса и колеса и их износа, а также от подуклонки и упругого отжатия нитей под нагрузкой.

В рамках модели увеличение зазора приводит к росту амплитуд поперечных перемещений колесных пар и рамных сил, что согласуется с результатами железнодорожных испытаний [6, 7] и соответствует общим закономерностям динамики экипажей. Влияние зазора в колее на поперечные колебания подтверждается и зарубежными исследованиями [14, 15].

С точки зрения воспроизведения модели значимым фактором оказалось моделирование буксового сферического подшипника с одной дополнительной поступательной степенью свободы по Y (с ограничителями), что уменьшило паразитную связь между колесами оси при вертикальных возмущениях и улучшило соответствие натуральному отклику. Вклад фрикционных сил в шкворневых узлах поворотных тележек также критичен, пренебрежение ими занижает запас устойчивости и ускоряет рост поперечных колебаний, тогда как реалистичная модель сухого трения со стадией сцепления стабилизирует поведение экипажа. Эти наблюдения подчеркивают необходимость специализированной модели трамвая, а не прямого переноса железнодорожных параметров.

Ограничения исследования связаны с принятием инерционной, а не упругой модели пути, волновые процессы в рельсовой нити и детальная совместная работа узлов «рельс — скрепление — шпала — балласт» не воспроизводятся. Для задач высокочастотной динамики и акустики, а также для анализа дефектов с короткими волнами требуется переход к упругой модели пути. Отдельной задачей является более точное описание контакта с учетом эволюции профилей колеса и рельса из-за их износа.

Заключение

Разработанная модель взаимодействия трамвайного экипажа и рельсового пути в программном комплексе «Универсальный механизм» адекватна и достаточно для анализа устойчивости движения трамвая и оценки возможностей повышения скоростей движения на прямых участках пути. Модель включает инерционное описание пути, детализированную кинематическую схему экипажа с двумя

ступенями подвешивания, специализированное описание буксового сферического подшипника и фрикционные связи в шкворневых узлах. Верификация подтвердила корректность статических реакций, устойчивость на идеальном пути, симметричный отклик в кривых и реалистичную реакцию на одиночные неровности. Адаптация модели показала хорошую сходимость с натурными данным. Результаты демонстрируют, что учет трамвайной кинематики и эксплуатационного зазора между гребнем и рельсом критичен для обоснования норм (в том числе по ширине колеи и допускам) и допускаемых скоростей. Модель может применяться для подготовки рекомендаций по корректировке норм устройства и содержания трамвайных путей, выбора параметров подуклонки рельсов и оценивания воздействия волнообразного износа рельсов на устойчивость, безопасность и комфортность пассажиров. Предложенные принципы построения модели могут быть применены для других существующих и перспективных трамваев, а текущая модель достаточно легко может быть изменена под родственные трамваи на идентичных тележках.

Список источников

1. Правила технической эксплуатации трамвая. Распоряжение Минтранса России от 30.11.2001 № АН-103-р.
2. СП 98.13330.2018. Трамвайные и троллейбусные линии. СНиП 2.05.09—90 (с Изменениями № 1, 2, 3).
3. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм. СНиП 32-01—95 (с Изменением № 1).
4. СП 2.5.3650—20. Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры.
5. Дудкин Е. П. Экспериментальные исследования колебаний трамвая «Витязь-М» / Е. П. Дудкин, Д. В. Козлов, Я. С. Хомяков // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 775–782. — DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-775-782.
6. Рябонович Е. С. Опыт эксплуатации пути с суженой колеей / Е. С. Рябонович. // Метрострой. — 1963. — Вып. 1-2.
7. Савчук О. М. Об интенсивном вилянии тележек / О. М. Савчук, А. В. Шатунов, Н. А. Гричаный // Ж.-д. транспорт (РФ). — 2003. — № 3. — С. 44–45.
8. Певзнер В. О. Унификация ширины колеи на Российских железных дорогах: история и результаты / В. О. Певзнер, И. Б. Петропавловская // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2010. — № 2. — С. 15–19.
9. Садиков О. Н. Трамвайные пути: устройство, ремонт и содержание / О. Н. Садиков. — Москва: Транспорт, 1976. — 176 с.

10. Zhai W. Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics / W. Zhai, K. Wang, C. Cai // Vehicle System Dynamics. — 2009. — Vol. 47. — Iss. 11. — Pp. 1349–1376.
11. Вагон трамвайный модели 71-931М: руководство по эксплуатации / ООО «ПК Транспортные системы». — М., 2017. — 128 с.
12. Универсальный механизм 10: руководство пользователя. Моделирование динамики железнодорожных экипажей / Лаборатория вычислительной механики Брянского государственного технического университета. — 2024. — 277 с.
13. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. ПНСТ 511—2020. Вагоны грузовые. Расчетные неровности железнодорожного пути для оценки показателей динамических качеств грузовых вагонов расчетными методами.
14. Li J. Numerical simulations and experimental analysis of high-speed turnout rails wear models / J. Li, M. Hu, H. Wu, H. Zhong // Scientific Reports. — 2025. — Vol. 15. — Iss. 1. — Art. No. 22680. — DOI: 10.1038/s41598-025-08065-4.
15. Polach O. Wheel/rail contact geometry parameters in regard to vehicle behaviour and their alteration with wear / O. Polach, D. Nicklisch // Wear. — 2016. — Vol. 366–367. — Pp. 200–208. — DOI: 10.1016/j.wear.2016.03.029.

Дата поступления: 29.10.2025

Решение о публикации: 26.11.2025

Контактная информация:

ДУДКИН Евгений Павлович — д-р техн. наук, проф.; ed@pgups-tempus.ru

ЗАЙЦЕВ Андрей Александрович — доц.; aazaicev@gmail.com

ХОМЯКОВ Ярослав Сергеевич — аспирант, jaro97@mail.ru

Development and Justification of a Mathematical Model for Tram Vibration Analysis

E. P. Dudkin, Ya. S. Khomyakov, A. A. Zaitsev

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

For citation: Dudkin E. P., Khomyakov Ya. S., Zaitsev A. A. Development and Justification of a Mathematical Model for Tram Vibration Analysis. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 100–116. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-100-116

Summary

Purpose: To develop and validate a mathematical model that describes the interaction between a multi-section tram and the track, focusing on the analysis of lateral stability (swaying), vertical dynamics, as well as the effects of track parameters, such as gauge, cant, irregularities, and wear due corrugation, on safety and ride comfort. **Methods:** A dynamic simulation of tram motion was conducted using the “Universal Mechanism” software package, which is articulated as a sophisticated mechanical system. This system includes an inertial track model, a comprehensive joint–force scheme for the vehicle, and a nonlinear contact between the wheel

and the rail. **Results:** Verification tests and the adaptation of the model based on data from full-scale field experiments, demonstrating a convergence of vehicle body root-mean-square accelerations within a range of 3% to 12.5%. The results of the study have confirmed the model's appropriateness for establishing standards related to the design and maintenance of tram tracks along straight segments. **Practical significance:** The proposed model can be utilized to justify the choice of track gauge and cant, determine tolerances for deviations in both horizontal and vertical track alignment and profile, set parameters for acceptable rail corrugation, and evaluate permissible speeds given the current conditions of wheels and tracks. The study complements the existing research on vehicle–track interaction in rail transportation by characterizing tram kinematics and presenting a reliable method for the verification and adaptation of the model using empirical data.

Keywords: Tram, wheel–rail, swaying, track gauge, vehicle dynamics, Universal Mechanism.

References

1. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii tramvaya. Rasporyazhenie Mintransa Rossii ot 30.11.2001 № AN-103-r* [Tram Operation Rules. Order of the Ministry of Transport of Russia dated November 30, 2001, No. AN-103-r]. (In Russian)
2. *SP 98.13330.2018. Tramvaynye i trolleybusnye linii. SNiP 2.05.09—90 (s Izmeneniyami № 1, 2, 3)* [SP 98.13330.2018. Tram and Trolleybus Lines. SNiP 2.05.09—90 (with Amendments Nos. 1, 2, 3)]. (In Russian)
3. *SP 119.13330.2024. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm. SNiP 32-01—95 (s Izmeneniem № 1)* [SP 119.13330.2024. 1520 mm Gauge Railways. SNiP 32-01—95 (with Amendment No. 1)]. (In Russian)
4. *SP 2.5.3650—20. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k otdel'nym vidam transporta i ob"ektam transportnoy infrastruktury* [SP 2.5.3650—20. Sanitary and epidemiological requirements for certain types of transport and transport infrastructure facilities]. (In Russian)
5. Dudkin E. P., Kozlov D. V., Khomyakov Ya. S. Eksperimental'nye issledovaniya kolebaniy tramvaya "Vityaz'-M" [Experimental studies of vibrations of the tram "Vityaz'-M"]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, vol. 19, Iss. 4, pp. 775–782. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-775-782. (In Russian)
6. Ryabonovich E. S. Opyt ekspluatatsii puti s suzhenoy koleey [Experience of operating track with narrow gauge]. *Metrostroy* [Metrostroy]. 1963, Iss. 1–2. (In Russian)
7. Savchuk O. M., Shatunov A. V., Grichany N. A. Ob intensivnom vilyanii telezhek [On intensive hunting of bogies]. *Zh.-d. transport (RF)* [Railway Transport (RF)]. 2003, Iss. 3, pp. 44–45. (In Russian)
8. Pevzner V. O., Petropavlovskaya I. B. Unifikatsiya shiriny kolei na Rossiyskikh zheleznykh dorogakh: istoriya i rezul'taty [Unification of track gauge on Russian railways: history and results]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhного transporta* [Bulletin of the Railway Research Institute]. 2010, Iss. 2, pp. 15–19. (In Russian)
9. Sadikov O. N. *Tramvaynye puti: ustroystvo, remont i soderzhanie* [Tramway tracks: structure, repair and maintenance]. Moscow: Transport Publ., 1976, 176 p. (In Russian)
10. Zhai W., Wang K., Cai C. Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 2009, vol. 47, Iss. 11, pp. 1349–1376.

11. Vagon tramvaynyy modeli 71-931M: rukovodstvo po ekspluatatsii [Tram car model 71-931M: operation manual]. *OOO “PK Transportnye sistemy”* [LLC “PK Transport Systems”]. Moscow, 2017, 128 p. (In Russian)
12. Universal’nyy mekhanizm 10: rukovodstvo pol’zovatelya. Modelirovanie dinamiki zhelezno-dorozhnykh ekipazhey [Universal Mechanism 10: user manual. Modelling of railway vehicle dynamics]. *Laboratoriya vychislitel’noy mekhaniki Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Laboratory of Computational Mechanics, Bryansk State Technical University]. 2024, 277 p. (In Russian)
13. *Predvaritel’nyy natsional’nyy standart Rossiyskoy Federatsii. PNST 511—2020. Vagony gruzovye. Raschetnye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya otsenki pokazateley dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov raschetnymi metodami* [Preliminary National Standard of the Russian Federation. PNST 511—2020. Freight cars. Calculated irregularities of railway track for assessing dynamic qualities of freight cars by calculation methods]. (In Russian)
14. Li J., Hu M., Wu H., Zhong H. Numerical simulations and experimental analysis of high-speed turnout rails wear models. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, Iss. 1, Art. No. 22680. DOI: 10.1038/s41598-025-08065-4.
15. Polach O., Nicklisch D. Wheel/rail contact geometry parameters in regard to vehicle behaviour and their alteration with wear. *Wear*, 2016, vol. 366–367, pp. 200–208. DOI: 10.1016/j.wear.2016.03.029.

Received: October 29, 2025

Accepted: November 26, 2025

Author’s information:

Evgeny P. DUDKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ed@pgups-tempus.ru

Andrey A. ZAITSEV — Associate Professor; aazaicev@gmail.com

Yaroslav S. KHOMYAKOV — Postgraduate Student; jaro97@mail.ru

УДК 629.463

Разработка теоретико-математической модели для оптимизации распределения тормозного усилия грузовых вагонов при неоднородном износе тормозных колодок в условиях потележечного торможения

Е. А. Коченов, Д. Г. Евсеев

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

Для цитирования: Коченов Е. А., Евсеев Д. Г. Разработка теоретико-математической модели для оптимизации распределения тормозного усилия грузовых вагонов при неоднородном износе тормозных колодок в условиях потележечного торможения // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 117–126. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-117-126

Аннотация

Цель: Разработка математической модели для оптимизации распределения тормозного усилия при потележечном торможении с учетом неоднородного износа тормозных колодок грузовых вагонов, что является одной из основных причин снижения эффективности тормозной системы и безопасности движения. **Методы:** Проведен анализ недостатков традиционной тормозной рычажной передачи, характеризующейся сложностью регулировки и неравномерным износом колодок. Разработана математическая модель, связывающая износ тормозных колодок с силой торможения, коэффициентом трения, скоростью движения и геометрией рычажной передачи. Модель учитывает динамику смещения центра тяжести колодки при неравномерном износе, что является критическим фактором для предотвращения локальных перегрузок. Проведена параметрическая оптимизация конструкции тормозной системы, включающая корректный подбор длины плеч рычагов и управление давлением в тормозных цилиндрах. **Результаты:** Предложена система потележечного торможения с тормозными цилиндрами, расположенными непосредственно у колесных пар и оснащенными автоматическими регуляторами выхода штока. Экспериментальные данные показывают, что предложенная система позволяет снизить дисперсию нормальных сил, действующих на поверхности тормозных колодок, по сравнению с традиционной системой. Разработанная модель обеспечивает более равномерный износ колодок и повышает безопасность эксплуатации за счет минимизации риска блокировки колес. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют внедрить разработанную модель в проектирование новых и модернизацию существующих тормозных систем грузовых вагонов. Применение предложенной системы потележечного торможения обеспечивает повышение срока службы тормозных колодок и снижение количества аварийных ситуаций, связанных с тормозной системой, что в конечном итоге повышает безопасность движения и снижает эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: Грузовой вагон, тормозная система, неравномерный износ колодок, математическая модель, оптимизация тормозного усилия, центр тяжести колодки, потележечное торможение, автоматический регулятор штока, равномерный износ.

Актуальность совершенствования тормозных систем грузовых вагонов обусловлена необходимостью повышения безопасности эксплуатации. Традиционная тормозная рычажная передача (ТРП) имеет недостатки: сложность регулировки, неравномерный износ колодок, риск блокировки колес [1, 2]. Переход на потележечное торможение с использованием тормозных цилиндров со встроенными

регуляторами [3, 4] позволяет оптимизировать распределение усилий. Цель работы — разработка математической модели для управления тормозным усилием с учетом износа колодок.

Наиболее распространенные причины выхода из строя рычажной передачи: обрыв тормозной тяги, неправильная регулировка тормозной рычажной передачи (ТРП) и прочие неисправности [4–7].

Неправильно выполненный ремонт или устаревшая технология, применяемая в процессе ремонта, могут стать причиной выхода из строя деталей.

Помимо некачественно проведенного ремонта и влияния человеческого фактора [8], тормозная рычажная передача имеет следующие слабые места:

1. Большое количество подвижных элементов системы в виде рычагов, подвесок и тяг и высокая сложность их регулировки.

2. Малая эффективность системы равномерного износа колодок.

Добавление тормозных цилиндров со встроенным устройством контроля параметров выхода штока, а также переход на потележечное торможение могут являться вариантами улучшения данной конструкции.

На рис. 1 отображена тормозная система грузового вагона с потележечным торможением с одной главной, отличающей ее от других, особенностью — цилиндры, порождающие тормозное усилие, оснащены устройством регуляции выхода штока без вмешательства человека, близко расположены к колесным парам [2, 9–11].

Рис. 2 представляет собой схематическое отображение совокупности рычагов и тяг — результат научных изысканий в границах статьи.

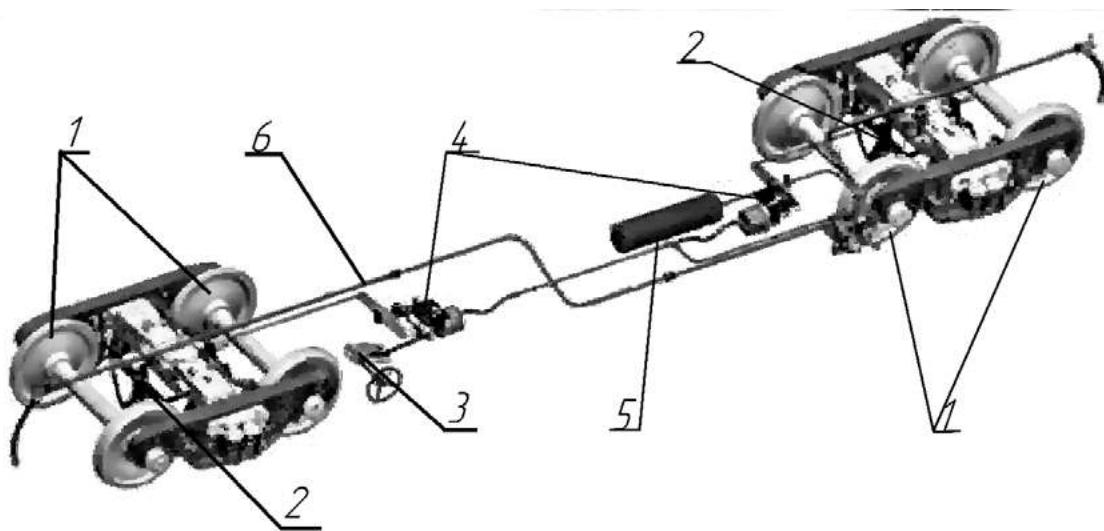


Рис. 1. Визуальное отображение системы, осуществляющей торможение грузовых вагонов с помощью потележечного торможения [9]:

1 — колесная пара; 2 — триангуль, оснащенный колодками; 3 — стояночный тормоз; 4 — тормозной цилиндр со встроенным автоматическим регулятором выхода штока; 5 — запасной резервуар; 6 — тормозная магистраль

Ко всему прочему имеются рекомендации в дополнение к указанному улучшению применить пересчитанные параметры плеч рычагов для обеспечения равномерного распределения износа тормозных колодок.

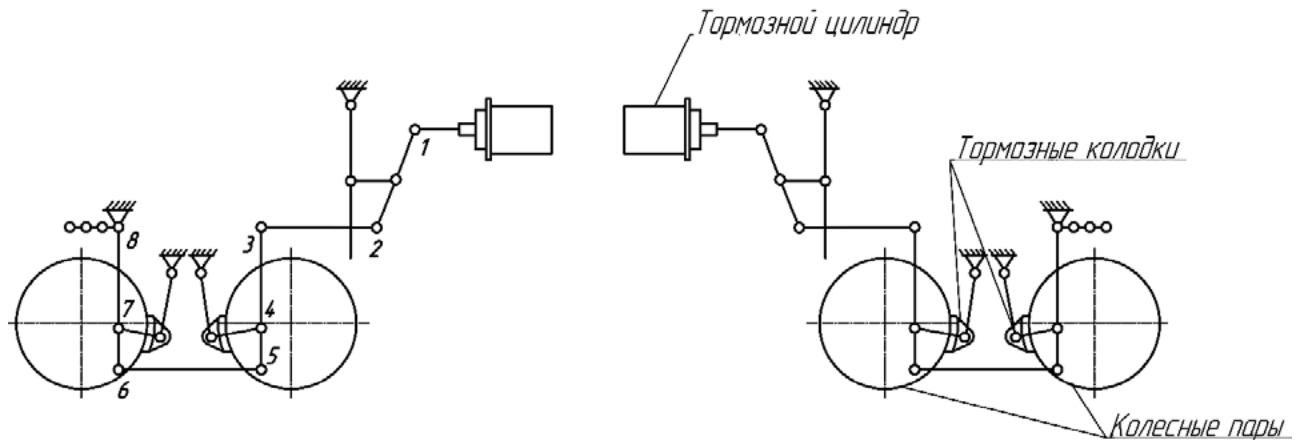


Рис. 2. Схема рычажной передачи для потележечного торможения,
где 1–8 — точки соединения рычагов

В ранних научных изысканиях [1, 2] с помощью математической модели, описывающей усилия рычагов системы и обеспечивающей качественное торможение (рис. 3), был проведен анализ функционирования тормозной рычажной передачи, используемой при потележечном торможении.

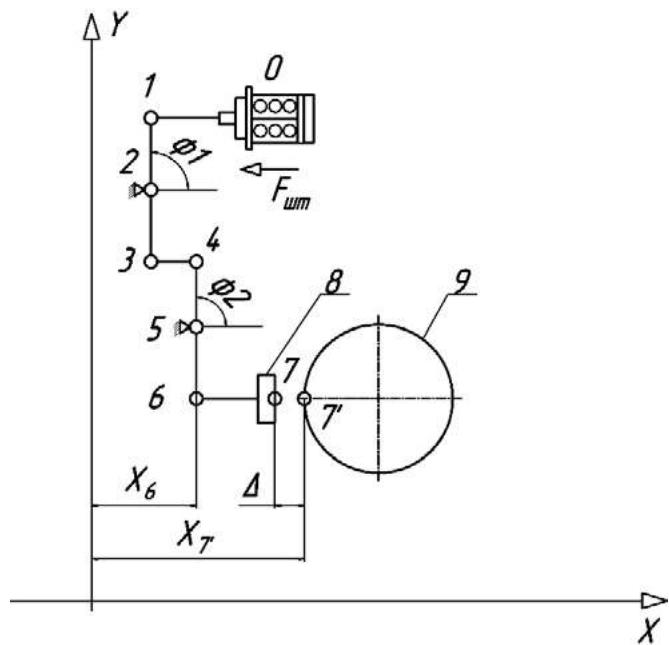


Рис. 3. Схема передаточного механизма рычажной передачи,
где 0 — тормозной цилиндр; 1–7 — точки сопряжения рычагов; 8 — колодка;
9 — колесо; $X7$ — позиция колодки без контакта с колесом;
 $X7'$ — позиция колодки в контакте с колесом; Δ — расстояние между
колесом и тормозной колодкой; $\phi 1, \phi 2$ — угол поворота.

В рамках данной статьи составлена математическая модель для расчета величины изношенности тормозных колодок, при проектировании которой в основу легли такие параметры, как сила торможения, коэффициент трения, скорость движения, давление в тормозном цилиндре и длина рычагов триангуляции.

Определив силу торможения, площадь контакта тормозной колодки с колесом и тормозной путь, имеется возможность для расчета величины изнашивания тормозных колодок:

$$W = k_i \frac{F_t}{A_{\text{конт}}} S, \quad (1)$$

где W — износ тормозных колодок;

k_i — коэффициент износа тормозных колодок;

$A_{\text{конт}}$ — площадь контакта тормозной колодки с колесом;

S — тормозной путь;

F_t — сила торможения.

$$S = \frac{V^2}{2a}, \quad (2)$$

где V — скорость движения до начала торможения;

a — тормозное ускорение.

$$a = \frac{F_t}{m}, \quad (3)$$

где m — масса грузового вагона.

На основе параметрических данных указанных зависимостей можно сделать следующее предположение: при заданном соотношении длин рычагов положение центра тяжести тормозной колодки может изменяться — главным образом в зависимости от степени их износа.

Для проверки жизнеспособности выдвинутой гипотезы необходимо получить математическую зависимость, отражающую влияние следующих параметров:

- тормозной силы;
- коэффициента трения тормозных колодок;
- скорости движения грузового вагона;
- давления в тормозном цилиндре;
- длины рычагов.

Эти параметры воздействуют на положение центра тяжести колодки, что позволяет провести развернутый анализ гипотезы.

Центр тяжести колодки можно определить как точку, вокруг которой уравновешиваются суммарные моменты действующих сил. Величина силы, действующей на колодки, включает:

$$F_{\text{сумм}} = \mu F_t, \quad (4)$$

где μ — коэффициент трения тормозных колодок.

Предположим, длина рычагов триангуля определяет расстояние от оси вращения колеса до точки, где прикладывается сила торможения. Центр тяжести можно оценить по моменту:

$$M = F_{\text{сумм}} d, \quad (5)$$

где d — расстояние от центра тяжести до точки приложения силы.

Используя значения коэффициентов трения тормозных колодок, установленных в предыдущих изысканиях [1, 2], имеется возможность отобразить зависимость момента сил от приложенной тормозной силы для чугунных и композиционных колодок (рис. 4).

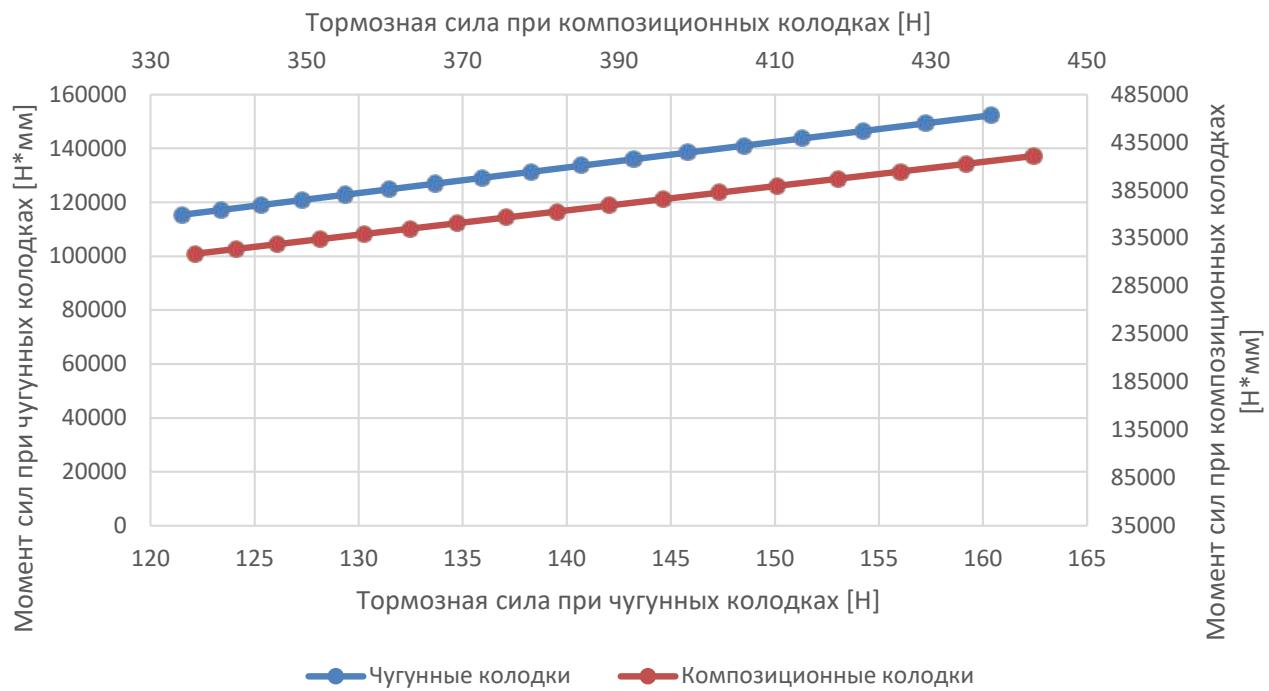


Рис. 4. Зависимости момента сил от приложенной тормозной силы для чугунных и композиционных колодок

Установлено, что распределение веса колодки происходит неравномерно при ее износе, из чего следует, что центр тяжести будет уравновешиваться к более изношенной стороне, что можно учесть с использованием следующей формулы:

$$X(t) = \frac{w_{\text{прав}}(t) - w_{\text{лев}}(t)}{w_{\text{лев}}(t) + w_{\text{прав}}(t)}, \quad (6)$$

где $X(t)$ — исходный центр тяжести в момент времени t ;
 $w_{\text{прав}}(t)$, $w_{\text{лев}}(t)$ — величины износа правой и левой рабочих поверхностей колодки соответственно.

Величина изнашивания колодок имеет прямую зависимость от силы торможения, коэффициента трения, скорости движения, давления в цилиндре, длины рычагов и текущего износа. Следующим образом имеется возможность записать дифференциальные уравнения износа рабочих поверхностей тормозных колодок во времени:

$$\frac{dw_{\text{лев}}}{dt} = \frac{F_t \mu VP}{L} (1 + ax(t)); \quad (7)$$

$$\frac{dw_{\text{прав}}}{dt} = \frac{F_t \mu VP}{L} (1 - ax(t)), \quad (8)$$

где a отражает неравномерность износа между левой и правой поверхностями.

Находя применение вышеуказанных уравнений, получим дифференциальное уравнение для изменения положения центра тяжести:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\frac{dw_{\text{прав}}}{dt} - \frac{dw_{\text{лев}}}{dt}}{w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}}} - x(t) \frac{\frac{dw_{\text{лев}}}{dt} - \frac{dw_{\text{прав}}}{dt}}{w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}}}. \quad (9)$$

Подставляя выражения для $\frac{dw_{\text{лев}}}{dt}$ и $\frac{dw_{\text{прав}}}{dt}$ из выражений (7) и (8) соответственно:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\frac{F_t \mu VP}{L} (1 - ax(t)) - \frac{F_t \mu VP}{L} (1 + ax(t))}{w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}}} - x(t) \frac{\frac{F_t \mu VP}{L} (1 + ax(t)) - \frac{F_t \mu VP}{L} (1 - ax(t))}{w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}}}. \quad (10)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{-2ax(t)F_t \mu VP}{L(w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}})} - x(t) \frac{2F_t \mu VP}{L(w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}})}. \quad (11)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{2F_t \mu VPx(t)(a+1)}{L(w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}})}. \quad (12)$$

На основании анализа ранее опубликованных исследований [3, 5, 9, 10] и собственных разработок [1, 2], а также математического моделирования работы тормозной рычажной передачи (с учетом влияния на центр тяжести тормозных колодок таких параметров, как тормозная сила, коэффициент трения тормозных колодок, скорость движения грузового вагона, давление в тормозном цилиндре и длина рычагов), сформулированы следующие выводы:

1. Разработанная математическая модель, основанная на механико-динамических уравнениях распределения нормальных сил и коэффициентов трения, количественно демонстрирует, что переход от традиционной рычажной тормозной системы к потележечному торможению позволяет снизить дисперсию нормальных сил, действующих на поверхности тормозных колодок.
2. Параметрическая оптимизация конструкции тормозной системы — в том числе подбор оптимальной длины плеч рычагов для каждого случая и регулирование давления в тормозных цилиндрах на основе полученной модели — позволяет снизить локальные перегрузки и исключить блокировку колес в критических режимах торможения.

Список источников

1. Евсеев Д. Г. Оценка эффективности работы тормозных колодок грузовых вагонов / Д. Г. Евсеев, Е. А. Коченов // Наука и техника транспорта. — 2024. — № 1. — С. 7.
2. Евсеев Д. Г. Усовершенствование тормозной рычажной передачи на основе использования потележечного торможения и новой системы обеспечения равномерного износа тормозных колодок грузовых вагонов / Д. Г. Евсеев, Е. А. Коченов // Наука и техника транспорта. — 2024. — № 4. — С. 14.
3. Кобищанов В. В. Тормозная система для потележечного торможения грузовых вагонов / В. В. Кобищанов, В. В. Синицын // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2020. — № 3. — С. 21–28.
4. Шамонова Н. И. Анализ неисправностей тормозного оборудования вагонов / Н. И. Шамонова // Молодой ученый. — 2017. — № 15(149). — С. 91–95.
5. Каниев Н. К. Пути повышения эффективности работы тормозной системы грузовых вагонов / Н. К. Каниев, Б. К. Кайролла // Наука и техника Казахстана. — 2020. — № 3. — С. 6–11.
6. Иванов А. А. Анализ контролепригодности тормозной системы грузового вагона / А. А. Иванов, М. А. Козарезова // Мир транспорта. — 2017. — № 2. — С. 82–96.
7. Лаптев С. И. Анализ свойств автоматичности тормозов грузовых поездов / С. И. Лаптев, Е. В. Федоров // Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационный

транспорт — 2016», посвященная 60-летию основания Уральского государственного университета путей сообщения. — 2017. — С. 291–297.

8. Мышьяков Д. С. Анализ конструкции вагона с раздельным потележечным торможением / Д. С. Мышьяков, А. А. Криворотов, Н. П. Рычков // Молодые науки Сибири. — 2021. — № 1. — С. 5.

9. Сипягин Е. С. Новые подходы к проектированию инновационных тормозных систем грузовых вагонов / Е. С. Сипягин, С. С. Старостин // Транспорт Российской Федерации. — 2014. — № 3(52). — С. 36–39.

10. Инагамов С. Г. Совершенствование рычажной передачи для потележечной тормозной системы грузового вагона // Материалы XI международной научно-практической конференции. В 2 частях. — 2021. — Т. 1.

11. Крылов В. И. Тормозное оборудование железнодорожного подвижного состава / В. И. Крылов, В. В. Крылов, В. Н. Ефремов, П. Т. Демушкин. — М.: Транспорт, 1989. — 487 с.

Дата поступления: 15.06.2025

Решение о публикации: 12.08.2025

Контактная информация:

КОЧЕНОВ Егор Александрович — аспирант; egoriko00@yandex.ru

ЕВСЕЕВ Дмитрий Геннадьевич — д-р техн. наук, проф.; evseevdg@gmail.com

A Mathematical Model for Optimized Brake Force Distribution in Freight Wagons with Non-Uniform Brake Shoe Wear in the Bogie-Wise Brake System

E. A. Kochenov, D. G. Evseev

Russian University of Transport (RUT), 9, Obraztsova St., bldg. 9, GSP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Kochenov E. A., Evseev D. G. A Mathematical Model for Optimized Brake Force Distribution in Freight Wagons with Non-Uniform Brake Shoe Wear in the Bogie-Wise Brake System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 117–126. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-117-126

Summary

Purpose: To create a mathematical model for optimizing the distribution of brake force in railway wagons during bogie-based braking, specifically addressing the issue of non-uniform wear of freight wagon brake shoes, which is one of the main factors impairing braking efficiency and operational safety. **Methods:** An evaluation of the limitations of traditional brake lever transmissions was performed, highlighting their intricate adjustment mechanisms and the uneven brake shoe wear. A mathematical model was created to correlate brake shoe wear with brake force, friction coefficient, vehicle speed, and the geometry of the lever transmission. The model accounts for the dynamic shift of the brake shoe's center of gravity due to uneven wear, which is critical for preventing localized overloads. A parametric optimization of the brake system design was performed, focusing on the appropriate selection of lever arm lengths and the regulation of pressure in the brake cylinders. **Results:** The proposed solution introduces an innovative bogie-wise braking system, featuring brake cylinders positioned directly at wheelsets and equipped with automatic stroke regulators. The

experimental data have demonstrated that the system under investigation significantly reduces the dispersion of normal forces acting on brake shoe surfaces compared to conventional systems. The developed model will ensure more uniform shoe wear and enhance operational safety by minimizing the risk of wheel lockup. **Practical significance:** The research results obtained will enable the integration of the developed model in the design of new freight wagon brake systems and the modernisation of existing ones. Implementing the proposed bogie-wise braking system will extend brake shoe lifespan and reduce the frequency of incidents associated with braking systems, thereby enhancing operational safety while diminishing maintenance costs.

Keywords: Freight wagon, braking system, uneven shoe wear, mathematical model, brake force optimisation, shoe center of gravity, bogie-wise braking, automatic stroke regulator, uniform wear.

References

1. Evseev D. G., Kochenov E. A. Otsenka effektivnosti raboty tormoznykh kolodok gruzovykh vagonov [Evaluation of the efficiency of freight car brake pads]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology in Transport]. 2024, Iss. 1, p. 7. (In Russian)
2. Evseev D. G., Kochenov E. A. Usovershenstvovanie tormoznoy rychazhnay peredachi na osnove ispol'zovaniya potelezhechnogo tormozheniya i novoy sistemy obespecheniya ravnomernogo iznosa tormoznykh kolodok gruzovykh vagonov [Improvement of the brake lever transmission based on bogie-by-bogie braking and a new system for uniform wear of freight car brake pads]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology in Transport]. 2024, Iss. 4, p. 14. (In Russian)
3. Kobishchanov V. V., Sinitzin V. V. Tormoznaya sistema dlya potelezhechnogo tormozheniya gruzovykh vagonov [Brake system for bogie-by-bogie braking of freight cars]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2020, Iss. 3, pp. 21–28. (In Russian)
4. Shamonova N. I. Analiz neispravnostey tormoznogo oborudovaniya vagonov [Analysis of malfunctions of car braking equipment]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist]. 2017, Iss. 15(149), pp. 91–95. (In Russian)
5. Kaniev N. K., Kayrolla B. K. Puti povysheniya effektivnosti raboty tormoznoy sistemy gruzovykh vagonov [Ways to improve the efficiency of the freight car brake system]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and Technology of Kazakhstan]. 2020, Iss. 3, pp. 6–11. (In Russian)
6. Ivanov A. A., Kozarezova M. A. Analiz kontroleprigodnosti tormoznoy sistemy gruzovogo vagona [Analysis of the testability of the freight car brake system]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2017, Iss. 2, pp. 82–96. (In Russian)
7. Laptev S. I., Fedorov E. V. Analiz svoystv avtomatichnosti tormozov gruzovykh poездов [Analysis of automatic properties of freight train brakes]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii “Innovatsionnyy transport — 2016”, posvyashchennaya 60-letiyu osnovaniya Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Innovative Transport — 2016”, dedicated to the 60th anniversary of the Ural State University of Railway Transport]. 2017, pp. 291–297. (In Russian)
8. Mysh'yakov D. S., Krivorotov A. A., Rychkov N. P. Analiz konstruktsii vagona s razdel'nym potelezhechnym tormozheniem [Analysis of the design of a car with separate bogie-by-bogie braking]. *Molodye nauki Sibiri* [Young Sciences of Siberia]. 2021, Iss. 1, p. 5. (In Russian)

9. Sipyagin E. S., Starostin S. S. Novye podkhody k proektirovaniyu innovatsionnykh tormoznykh sistem gruzovykh vagonov [New approaches to designing innovative brake systems for freight cars]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2014, Iss. 3(52), pp. 36–39. (In Russian)
10. Inagamov S. G. Sovrshennstvovanie rychazhnay peredachi dlya potelezhechnoy tormoznoy sistemy gruzovogo vagona [Improvement of the lever transmission for the bogie-by-bogie brake system of a freight car]. *Materialy XI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 2 chastyakh* [Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. In 2 parts]. 202, vol. 1. (In Russian)
11. Krylov V. I., Krylov V. V., Efremov V. N., Demushkin P. T. *Tormoznoe oborudovanie zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Braking equipment of railway rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1989, 487 p. (In Russian)

Received: June 15, 2025

Accepted: August 12, 2025

Author's information:

Egor A. KOCHENOV — Postgraduate Student; egorikooo@yandex.ru

Dmitry G. EVSEEV — PhD in Engineering, Associate Professor; evseevdg@gmail.com

УДК 629.423.2

Организация эксплуатации электропоездов метрополитена «НеВа» с учетом возможности импортозамещения системы управления

И. И. Лапсарь, А. Е. Цаплин

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

Для цитирования: Лапсарь И. И., Цаплин А. Е. Организация эксплуатации электропоездов метрополитена «НеВа» с учетом возможности импортозамещения системы управления // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 127–134. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-127-134

Аннотация

Цель: Произвести анализ отказов вагонного оборудования состава проекта «НеВа» по данным электродепо метрополитена «Невское»; обосновать преимущества метода векторного управления двигателями над частотным управлением; выявить импортное оборудование электропоезда «НеВа» и на основе анализа эксплуатационных отказов вагонного оборудования разработать рекомендации по импортозамещению системы управления электропоезда метрополитена «НеВа» для обеспечения бесперебойных и безопасных перевозок пассажиров Петербургского метрополитена; провести сравнительный анализ импортных и отечественных компонентов для реализации системы управления тяговыми двигателями электропоезда метрополитена «НеВа». **Методы:** Анализ отказов вагонного оборудования состава проекта «НеВа» на основе эксплуатации по данным электродепо метрополитена «Невское». Выявление проблемных узлов на основе анализа отказов вагонного оборудования. Поиск отечественного аналога импортного оборудования. Проведение сравнения характеристик отечественных и импортных микроконтроллеров. **Результаты:** Обоснованы преимущества метода векторного управления тяговыми двигателями над традиционным методом частотного регулирования. Разработаны рекомендации по выбору отечественных аналогов импортного оборудования системы управления электропоезда метрополитена «НеВа». **Практическая значимость:** Приведенные отечественные аналоги импортного оборудования позволяют организовать бесперебойный процесс эксплуатации электропоездов метрополитена «НеВа», а микроконтроллер K1921ВК01Т может стать основой в вопросе импортозамещения компонентов вагонов «НеВа».

Ключевые слова: Импортозамещение, электропоезд «НеВа», система управления, анализ, микроконтроллер, векторное управление.

Введение

Обеспечение безопасных перевозок пассажиров является главной задачей ГУП «Петербургский метрополитен».

Появление составов «НеВа» неслучайно называют новой, очень значимой вехой в развитии ГУП «Петербургский метрополитен».

В 2012 г. дан старт переходу от подвижного состава с реостатно-контакторной системой управления (проекты и разработки середины XX в.) к абсолютно новым поездам, на которых применен современный принцип управления тяговыми электродвигателями. Главными отличиями новых составов стали значительная экономия электроэнергии на тягу поездов и повышенный уровень комфорта пассажиров, в том числе маломобильных, и машинистов, а также серьезные преимущества в эксплуатации и содержании оборудования [1].

Сегодня доля поездов с асинхронным тяговым приводом в парке подвижного состава Петербургского метрополитена составляет 908 вагонов, из которых 144 вагона (24 шестивагонных поезда) — «НеВа».

В настоящий момент в инвентарном парке электродепо «Невское» насчитывается 24 состава 6-вагонного формирования проекта «НеВа»:

- 9 составов 81-556/557/558;
- 8 составов 81-556.1/557.1/558.1;
- 7 составов 81-556.2/557.2/558.2 [2].

Производителем составов является ООО «ВАГОНМАШ» (РФ, Санкт-Петербург), партнером при производстве данных составов являлась чешская кампания Škoda Transportation, в связи с чем до 70 % основных компонентов, оборудования и узлов данного состава являются импортными. Основные фирмы — поставщики оборудования представлены в табл. 1 [3].

ТАБЛИЦА 1. Импортное оборудование на вагонах проекта «НеВа»

№ п/п	Наименование (модель)	Производитель	Страна	Модификации вагона
1	Тяговый двигатель MLU 3839 K/4	Škoda Eelectric	Чехия	Все модификации
2	Токоприемник SG112	Stemann-Technik GmbH	Германия	Все модификации
3	Тяговый контейнер 8МКМ-1,2	Škoda Eelectric	Чехия	81-556/557/558
4	Тяговый контейнер 8МКМ-3,4	Škoda Eelectric	Чехия	81-556.1/557.1/558.1, 81-556.2/557.2/558.2
5	Кондиционер кабины HVAC 3404	Konvekta AG	Германия	Все модификации
6	Система вентиляции вагонов MET-HV-SP	Thermo Kong	Бельгия	Все модификации
7	Аккумуляторные батареи MRX	SAFT	Франция	Все модификации
8	Замки торцевых дверей	ABLOY	Финляндия	81-556/557/558, 81-556.1/557.1/558.1
9	Замки торцевых дверей	S&S	Германия	81-556.2/557.2/558.2
10	Пневморессора	GMT	Германия	81-556.1/557.1/558.1, 81-556.2/557.2/558.2
11	Пневморессора	SEK	Германия	81-556/557/558
12	Гасители колебаний	KONI	Голландия	81-556.1/557.1/558.1, 81-556.2/557.2/558.2
13	Муфта пластинчатая	KWD	Германия	Все модификации
14	Тормозное оборудование	Knorr-Bremse	Германия	Все модификации
15	Реле пневматическое (панели автостопа)	SMC Corporation	Япония	Все модификации
16	Система управления	UniControls (Škoda)	Чехия	81-556/557/558
17	Система управления	Lokel	Чехия	81-556.1/557.1/558.1, 81-556.2/557.2/558.2
18	Система автоведения АТО-100	UniControls (Škoda)	Чехия	81-556.1/557.1/558.1, 81-556.2/557.2/558.2

В условиях санкционной политики недружественных государств поставки большинства импортных компонентов для подвижного состава проекта «НеВа» в Россию прекращены. Это делает невозможным как ремонт составов при отказах оборудования, так и проведение планово-предупредительных ремонтов по достижении максимально допустимых межремонтных пробегов [4].

Для обеспечения устойчивого функционирования в условиях санкций Петербургскому метрополитену, как и любому предприятию, необходимо снизить зависимость от иностранных поставок [5]. Решением становится импортозамещение — замена зарубежной продукции отечественными аналогами. Это позволит:

- обслуживать и ремонтировать составы проекта «НеВа» в соответствии с установленными требованиями;
 - обеспечить независимость от поставок из недружественных государств.
- С 2022 г. по этому направлению ведется активная работа.

Анализ отказов

Для подготовки предложений по проведению импортозамещения составов проекта «НеВа» необходимо изначально провести анализ отказов вагонного оборудования.

По результатам выявлены следующие «проблемные узлы»:

- тяговый привод;
- торцевые двери;
- механическое оборудование раздвижных дверей;
- система верхнего уровня.

По результатам анализа отказов выявлено, что торцевые двери, напрямую подключенные к системе управления (обеспечивающие выдачу сигналов на разблокировку/блокировку, а также передачу диагностических сообщений), являются критическим оборудованием для поддержания работоспособности вагонов проекта «НеВа». В связи с этим в дальнейшем будет рассмотрена модернизация системы управления.

Система управления представляет собой совокупность технических средств, предназначенных для изменения режимов работы объекта регулирования с целью обеспечения заданных параметров функционирования.

В контексте подвижного состава система управления позволяет автоматизировать ключевые процессы ведения поезда, включая:

- начало движения;
- выбор режима хода на перегоне;
- выполнение торможения [6].

Особенности и преимущества метода векторного управления

Сравнение традиционного метода частотного регулирования и векторного регулирования представлено в табл. 2. **Ключевое преимущество** векторного управления — существенно более быстрый отклик на изменение момента: как

ТАБЛИЦА 2. Сравнение векторного управления и частотного регулирования

Параметр	Частотное регулирование	Векторное управление
Управление напряжением	Величина, частота	Величина, частота, фаза
Управлением током	Управление действующим значением	Независимое регулирование током момента и током возбуждения
Реакция на изменение момента	Несколько сотен мс	Несколько десятков мс
Объем вычисления ЦП	Небольшой	Большой

минимум в 10 раз выше по сравнению с частотным методом. Векторное управление контролирует не только значение и частоту напряжения (регулируемые в методе частотного регулирования), но и фазу. При этом возникает возможность независимого регулирования тока возбуждения и тока момента, более того, ток момента регулируется быстро и с высокой точностью [7].

Использование метода векторного управления для железнодорожного подвижного состава позволит достичь:

- следящего управление восстановлением сцепления при юзе/боксованиях;
- увеличения рекуперируемой энергии при снижении нагрузки сети питания;
- повышения комфортности движения за счет снижения резких изменений момента;
- высокой точности поддержания постоянной скорости движения при использовании систем автovedения поезда.

Техническая реализация

Анализ рынка радиоэлектронных элементов показал, что развитие современных систем векторного управления получило существенный импульс благодаря применению специализированного оборудования — в частности, интегральных схем. Первые системы управления асинхронными машинами работали на принципах жесткой логики. Также широкое применение получили программируемые логические интегральные схемы.

Принципы жесткой логики в векторном управлении были реализованы на аппаратном уровне управляющего устройства и адаптированы под конкретный тип привода. Отсутствие собственных вычислительных мощностей требовало от системы управления электроприводом наличия дополнительных устройств для вычислений и контроля работы привода. Один из лидеров по производству подобной продукции — американская компания International Rectifier (IR), известная благодаря своей линейке микроконтроллеров IRMCK.

Новое поколение микроконтроллеров для управления асинхронными электрическими приводами представляет собой комбинацию управляющего микропроцессора и аппаратного устройства для векторного управления. Такие устройства представлены на рынке и чаще всего изготавливаются на базе ядра MSC51 [8].

Одним из ключевых преимуществ данного технического решения в области векторного управления является отсутствие необходимости во внешних вычислительных мощностях: расчеты выполняются аппаратно под управлением микроконтроллера. Однако стоит отметить, что данный тип микроконтроллеров обладает низкой адаптивностью, то есть применение продукции, разработанной под определенный тип двигателей, для других машин не представляется возможным. Подобные устройства выпускаются компанией IR в серии IRMCF 312, а также представлены в ряде линеек продукции Toshiba.

До 2013 г. были предприняты попытки создать универсальное устройство, но существующие возможности не позволяли добиться желаемого результата. Однако в 2013 г. американской компанией Texas Instruments (TI) было предложено инновационное решение — отказ от аппаратной логики в пользу полностью программного алгоритма управления на базе микроконтроллера общего назначения [9].

Ниже представлен сравнительный анализ технических характеристик отечественного микроконтроллера K1921BK01T (производство — АО «НИИЭТ») и зарубежных аналогов (табл. 3).

По результатам проведенного сравнительного анализа можно сделать следующий вывод: с учетом характеристик продукции производства АО «НИИЭТ» не уступает импортным аналогам, а в некоторых параметрах и превосходит их.

ТАБЛИЦА 3. Сравнительный анализ характеристик микроконтроллеров

	K1921BK01T НИИЭТ (Россия)	STM32F423VH SMT	TMS320F28335 TI
Производительность	100 МГц	100 МГц	150 МГц
ШИМ (широко-импульсная модуляция)	18 каналов	6 каналов + 12 доп.	12 каналов
АЦП (аналого-цифровой преобразователь)	23 канала, 12 «медленных»	16 каналов, 1 «быстрый»	12 каналов, 1 «быстрый»
QEP (квадратур. блок)	2	1 (совмещен с ШИМ)	2
Блок захвата САР	6	N (совмещен с ШИМ)	6
SPI/12C/UART/CAN	4 / 2 / 4 / 2	5 / 4 / 10 / 3	3 / 1 / 3 / 2
ЦАП	нет	2	нет
ОЗУ	192 Кбайт	320 Кбайт	68 Кбайт
Flash	1024 Кбайт	1,5 Мб	512 Кбайт
Польз. память	64 Кбайт	нет	нет
USB	1	1	нет
Ethernet	1	нет	нет
Часы	1	1	нет

Заключение

На основании проведенного анализа технических характеристик импортных и отечественных микроконтроллеров, а также с учетом действующих санкционных ограничений, можно сделать вывод о реальной возможности разработки полностью отечественной системы управления на базе рассмотренных технических компонентов.

Особую значимость в контексте импортозамещения имеет микроконтроллер K1921BK01T (производство АО «НИИЭТ»). Его технические характеристики и функциональные возможности позволяют рассматривать данное изделие в качестве ключевой элементной базы для модернизации компонентов вагонов «НеВа».

Список источников

1. Шлендов И. А. «НеВа» отметила 10летний юбилей / И. А. Шлендов, М. Макалатия, Ю. Румянцев // Газета «Петербургский метрополитен». 21.06.2023. № 10(1755).
2. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/НеВа> (дата обращения: 15.09.2025).
3. Перечень производителей оборудования вагонов состава «Нева» моделей 81-556/557/558. 556.00.00.000 ПП. ООО «Вагонмаш». — СПб., 2014. — 11 с.
4. Правила текущего содержания и ремонта подвижного состава Петербургского метрополитена, введенные в действие приказом начальника метрополитена от 28.02.2022 № 253. — 62 с.
5. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Импортозамещение> (дата обращения: 15.09.2025)
6. Вагоны метрополитена моделей 81-556, 81-557, 81-558. Руководство по эксплуатации. Общая часть 556.00.00.000-01 РЭ. 2014. — 85 с.
7. Векторное управление тягового инвертора. Система тяги для метрополитена Санкт-Петербурга. Hitachi, ltd. — 2015. — 16 с.
8. URL: http://www.compel.ru/lib/ne/2008/18/4-konfiguriruemye_kontrolleryi-elektroprivoda-serii-irmck/ (дата обращения: 22.09.2025).
9. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=148398> (дата обращения: 01.10.2025)

Дата поступления: 14.07.2025

Решение о публикации: 04.08.2025

Контактная информация:

ЛАПСАРЬ Ирина Игоревна — магистрант; irisha-zaichena@yandex.ru

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

Management of the “NeVa” Metro Train Operation, with the Potential of Import Substitution of the Control System

I. I. Lapsar¹, A. E. Tsaplin

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

For citation: Lapsar' I. I., Tsaplin A. E. Management of the “NeVa” Metro Train Operation, with the Potential of Import Substitution of the Control System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 127–134. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-127-134

Summary

Purpose: To analyse the equipment failures of the “NeVa” train cars utilizing data from the Nevskoye Metro depot. To establish the benefits of vector motor control in comparison to frequency control. To identify the imported equipment of the “NeVa” electric train, and to develop recommendations for substituting these imports in the train’s control system based on an analysis of the failures that occurred during operation, aiming to ensure the uninterrupted and safe transportation of passengers within the St. Petersburg Metro system. Additionally, a comparative analysis of imported components versus domestic ones will be conducted to facilitate the implementation of the traction motor control system for the “NeVa” electric train. **Methods:** Analysis of the “NeVa” train equipment failures utilizing operational data from the Nevskoye Metro depot. Identification of faulty elements by reviewing of train equipment malfunctions. Investigation of domestic alternatives to imported equipment. A comparison of the specifications for both domestic and imported microcontrollers. **Results:** The benefits of vector control for traction motors compared to conventional frequency control have been clearly established. Guidelines for choosing domestic alternatives to imported control system equipment for the “NeVa” electric train have been formulated. **Practical significance:** The domestic substitutes for imported equipment outlined in this paper will facilitate the efficient operation of the “NeVa” Metro electric trains, and the K1921VK01T microcontroller has the potential to serve as a foundation for import substitution of the “NeVa” train components.

Keywords: Import substitution, “NeVa” electric train, control system, analysis, microcontroller, vector control.

References

1. Shlendov I. A., Makalatiya M., Rumyantsev Yu. “NeVa” otmetila 10letniy yubilej [“NeVa” Celebrated Its 10th Anniversary]. *Gazeta “Peterburgskiy metropolitana”* [Petersburg Metro Newspaper]. June 21, 2023, № 10(1755).
2. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/NeVa> (accessed: September 15, 2025).
3. Perechen’ proizvoditeley oborudovaniya vagonov sostava “Neva” modeley 81-556/557/558. 556.00.00.000 III. OOO “Vagonmash” [List of manufacturers of equipment for Neva train cars, models 81-556/557/558. 556.00.00.000 PP. Vagonmash LLC]. St. Petersburg, 2014, 11 p.
4. Pravila tekushchego soderzhaniya i remonta podvizhnogo sostava Peterburgskogo metropolitena, vvedennye v deystvie prikazom nachal’nika metropolitena ot 28.02.2022 № 253 [Rules for the Routine Maintenance and Repair of Rolling Stock of the St. Petersburg Metro, put into effect by Order № 253 of the Head of the Metro dated February 28, 2022]. 62 p.
5. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Importozameshchenie> (accessed: September 15, 2025).

6. *Vagonny metropolitena modeley 81-556, 81-557, 81-558. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Obshchaya chast' 556.00.00.000-01 RE. 2014* [Metro Cars Models 81-556, 81-557, and 81-558. Operating Manual. General Part 556.00.00.000-01 RE. 2014]. 85 p.
7. *Vektornoe upravlenie tyagovogo invertora. Sistema tyagi dlya metropolitena Sankt-Peterburga. Hitachi, ltd* [Vector Control of the Traction Inverter. Traction System for the St. Petersburg Metro. Hitachi, Ltd]. 2015, 16 p.
8. Available at: http://www.compel.ru/lib/ne/2008/18/4-konfiguriruemye_kontrolleryi-elektroprivoda-serii-irmck/ (accessed: September 15, 2025).
9. Available at: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=148398> (accessed: October 1, 2025).

Received: July 14, 2025

Accepted: August 04, 2025

Author's information:

Irina I. LAPSAR' — Master's Degree Student; irisha-zaichena@yandex.ru

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

УДК 656.073

Методика взаимодействия припортовых станций и портов

Д. С. Ломакина, А. В. Новицхин

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

Для цитирования: Ломакина Д. С., Новицхин А. В. Методика взаимодействия припортовых станций и портов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 135–147. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-135-147

Аннотация

Цель: Повышение пропускной способности припортовых станций за счет разработки методики взаимодействия припортовых станций и портов. **Методы:** Для конкретизации работы в сфере контейнерных перевозок рассмотрены лучшие практики и ведущие направления в 2025 г. Проведен анализ цифровых сервисов, используемых в железнодорожной сети. Рассмотрены автоматизированные системы управления в сфере контейнерных перевозок на припортовых станциях и в портах. Выполнена комплексная оценка взаимодействия припортовых станций и портов. Выявлены недостатки существующей технологии их работы. **Результаты:** Разработана методика взаимодействия припортовых станций и портов, позволяющая сократить простоя вагонов с контейнерами на станции, повысить пропускную способность за счет прогнозирования прибытия судна в режиме реального времени и выбора оптимального сценария обработки состава. Составлена концептуальная структура методики взаимодействия припортовых станций и портов, включающая в себя: эмпирические основы и предпосылки, теоретические основы, реализацию и критерии достоверности. Разработан алгоритм к данной методике; рассмотрен пример типовой технологической ситуации с использованием алгоритма методики взаимодействия портов и припортовых станций. **Практическая значимость:** Методика позволяет обеспечить эффективное и слаженное функционирование портов и припортовых станций, оперативно принимать управленические решения, повышать конкурентоспособность транспортной отрасли за счет выбора оптимального сценария обработки состава на основе прогноза прибытия судна. Перевозчик обеспечит повышение пропускной способности за счет равномерного распределения вагонов на припортовых станциях, а грузоотправитель — сокращение затрат на плату за занятость инфраструктуры.

Ключевые слова: Контейнерные перевозки, порт, припортовая станция, железнодорожные перевозки, управление процессами перевозок.

Введение

В настоящее время сфера контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте активно развивается. За 2024 г. было перевезено 7,81 млн контейнеров в двадцатифутовом эквиваленте (далее — ДФЭ), это на 0,38 млн ДФЭ больше, чем за 2023 г., а в первом полугодии 2025 г. перевозки составили 3,1 млн ДФЭ [1]. На рис. 1 представлены показатели объемов перевозок контейнеров железнодорожным транспортом за 2023 и 2024 гг.

В 2025 г. на железнодорожном транспорте контейнерные перевозки активно развиваются, подстраиваясь к геополитической обстановке и техническим инновациям. Рассматривая лучшие практики и ведущие направления [1], в этом году на рынке контейнерных перевозок можно выделить шесть тенденций развития, представленных на рис. 2.

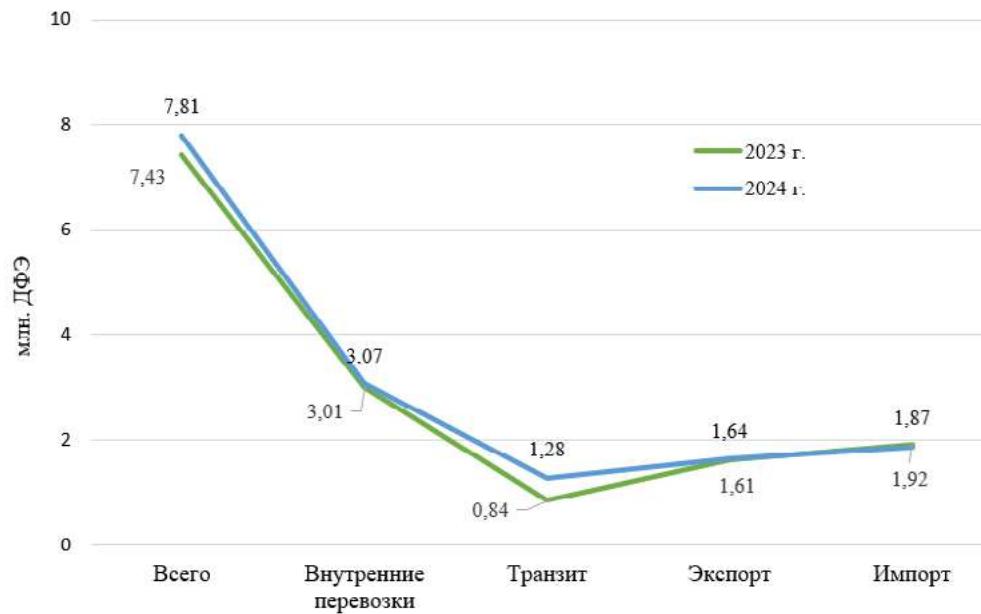


Рис. 1. Объем контейнерных перевозок за 2023 и 2024 гг., млн ДФЭ



Рис. 2. Лучшие практики в сфере контейнерных перевозок

Ведущим фактором оптимизации контейнерных перевозок является цифровая трансформация. Логистические компании внедряют на предприятиях технологии с применением искусственного интеллекта для планирования маршрутов, облачные платформы для систематизации цепей поставок, системы интернета вещей и блокчейна — для упрощения работы и мониторинга в режиме реального времени.

Развитие мультимодальных перевозок играет значимую роль. Повышенное внимание уделяется:

- укреплению взаимодействия операторов водного и железнодорожного транспорта;
- увеличению объема контейнерных перевозок по коридору «Север — Юг»;
- активному взаимодействию автомобильного, водного и железнодорожного транспорта.

ОАО «РЖД» и логистические компании активно работают над вопросом повышения экологичности перевозок. Проводится оптимизация транспортировки для снижения выбросов углекислого газа в окружающую среду.

Рассматриваются вопросы модернизации специализированных контейнеров для перевозки скоропортящихся и опасных грузов — для поддержания качества продукции и предотвращения угроз безопасности движения.

Без квалифицированных сотрудников повышение качества перевозок не представляется возможным. Поэтому ОАО «РЖД», логистические и операторские компании проводят:

- обучение по повышению квалификации;
- тренинги;
- корпоративную учебу — для повышения кадрового потенциала [1].

На рис. 2 представлены лучшие практики в сфере контейнерных перевозок.

На данный момент чаще всего контейнерные перевозки на железнодорожном транспорте совершаются в смешанном сообщении, перевалка производится на автомобильный, водный, воздушный виды транспорта. Доля экспортных перевозок с каждым годом показывает положительную динамику. В связи с геополитической обстановкой и закрытием некоторых сухопутных границ особое внимание уделяется контейнерным перевозкам в адрес припортовых регионов для последующей перевалки на водный транспорт (морские суда).

Но в ряде случаев из-за отсутствия прогноза прибытия судна в режиме реального времени, минимального взаимодействия с железнодорожной станцией и отсутствия общей автоматизированной системы возникают простой вагонов с контейнерами на станции в ожидании судна.

Следовательно, актуальной научной задачей исследования является разработка концепции взаимодействия работы портов и припортовых станций для повышения пропускной способности и сокращения простоев вагонов с контейнерами.

Для расширенного представления цифровизации на сети железных дорог проведен анализ цифровых сервисов, применяемых в сфере контейнерных перевозок [1].

На текущий момент работа железнодорожных станций на сети железных дорог ведется в автоматизированной системе управления станциями нового поколения (далее — АСУ СТ НП) [2]. В функционал системы входит:

- просмотр подхода поездов к станциям;

- оформление первичной коммерческой документации;
- проведение операций с составами и вагонами.

Кроме того, справочная информация о местной работе и взаимодействии с портами представлена в Единой модели данных перевозочного процесса управления эксплуатационной работой (далее — ЕМД ПП УЭР) [3]. В данной модели реализованы следующие функции:

- статистика работы с местным грузом;
- погрузка и выгрузка;
- прогноз прибытия судов;
- анализ работы с разной номенклатурой грузов;
- логистические цепочки;
- отслеживание местонахождения вагонов.

На терминалах, работающих с судами, используется Terminal Operating System (далее — TOS). В функционал системы входят:

- предоставление информации о перемещениях груза и транспорта в порту;
- оформление документов между клиентами, судовыми линиями и таможенными органами;
- хранение информации о клиентах, перевозимом грузе и используемом транспорте.

Для определения местонахождения судов применяется Automatic Identification System (далее — AIS) [4].

Кроме приведенных выше автоматизированных систем, используются или находятся на стадии внедрения следующие группы цифровых сервисов:

Предиктивная аналитика и интеллектуальные системы планирования

В сфере железнодорожного транспорта активно используются системы с машинным зрением и искусственным интеллектом, в частности:

1. Для проведения коммерческого осмотра поездов и вагонов в целях снижения влияния человеческого фактора на крупных станциях установлены:
 - автоматизированные системы коммерческого осмотра поездов и вагонов (далее — АСКО ПВ);
 - автоматизированные системы коммерческого осмотра — смотровая вышка (далее — АСКО СВ) [5].

2. Для оптимизации документооборота реализована автоматизированная система «Электронная транспортная накладная» (далее — АС «ЭТРАН»). Она позволяет:

- осуществлять контроль за всеми перевозочными документами;
- сокращать время на таможенное оформление;
- рассчитывать провозную плату [6].

3. Для предоставления грузовых услуг операторам подвижного состава, грузоотправителям/грузополучателям и экспедиторам разработана электронная торговая площадка «Грузовые перевозки» (далее — ЭТП ГП). На ней возможно:

- оформлять заказы на перевозку;
- предоставлять вагоны;
- участвовать в торгах с лотами подвижного состава и груза [7].

Платформы для управления жизненным циклом вагона

Для хранения и использования данных о состоянии грузовых вагонов в настоящее время используют сервис контроля жизненного цикла грузовых вагонов на платформе «Распределенный реестр данных» (далее — РРД ГВ). Он предоставляет актуальную информацию об грузовом вагоне на любом жизненном цикле, позволяет сменить собственника комплектующих вагона [8].

Ведутся разработки единой цифровой платформы управления жизненным циклом составных частей грузовых вагонов. В основу работы платформы будут положены «цифровые двойники» частей грузовых вагонов. Система интегрируется с другими существующими программами ОАО «РЖД» для усиленного контроля за состоянием вагонов на всех этапах жизненного цикла. Это позволит: снизить угрозы безопасности движения и повысить эффективность перевозок [9].

LoT программы и умные вагоны и контейнеры

На сети железных дорог все чаще практикуется использование технологий интернета вещей; они позволяют грузоотправителям и грузополучателям, экспедиторам:

- отслеживать местонахождение грузов;
- систематизировать работу на складах;
- повышать безопасность перевозок [10].

Например, активно используются электронные запорно-пломбировочные устройства: они крепятся на двери контейнеров и при несанкционированном открытии передают сигнал о вскрытии вагона или контейнера.

Используются датчики для распознавания вибрации и звука: они позволяют обнаруживать дефекты пути или состава во время движения состава.

Системы радиочастотной идентификации позволяют считывать вагоны и передавать на метке все данные о грузе [11].

Умные вагоны и контейнеры оснащены разными датчиками, которые отслеживают состояние груза и самого подвижного состава. Так, контейнеры SkyCell используют для перевозки лекарств и медикаментов, в которых присутствуют датчики для отслеживания местоположения, а также на всем пути следования поддерживается внутренний микроклимат, данные передаются экспедитору прямо на рабочее место [10]. Контейнеры Unit One оснащены технологией интернета вещей,

которая отслеживает местоположение груза на всем пути следования с переносом данных в общий сервер.

Цифровые платформы взаимодействия с клиентами и платформами

Взаимодействие с партнерами и клиентами — неотъемлемая часть работы каждой компании. В ОАО «РЖД» с каждым годом разрабатываются новые программы для улучшения взаимосвязей.

Одной из основных систем является «Личный кабинет клиента». Зарегистрированным пользователям предоставляется ряд услуг:

- оформление и просмотр коммерческой документации;
- подача заявок на перевозку грузов;
- расчет провозной платы и др.

В 2021 г. была внедрена новая система «РЖД Маркет». Она позволяет:

- заказать любой товар и перевезти его железнодорожным транспортом;
- сравнить цены с другими поставщиками;
- организовать доставку.

Также внедрена автоматизированная система «Логистика». Она упрощает обмен документами между работниками железнодорожного транспорта и таможенными органами.

Дочерняя компания ОАО «РЖД» участвовала в интеграции системы «Агропромышленный комплекс». Цель — организация перевозок скоропортящихся грузов, систематизация взаимодействия перевозчика и санитарных компаний, предотвращение порчи груза и контроль за ним на всем пути следования [11].

Robotic Process Automation (RPA) — автоматизация задач

На сети железных дорог более 1000 информационных систем, для каждой из данных систем имеются свои специалисты из информационно-вычислительных центров, часть работы уже выполняют роботы. Технология RPA позволяет уменьшить обработку документов, взять на себя выполнение однотипных и односложных заданий, проводимых человеком. Так, на рабочих местах работников роботы выполняют функции с учетными записями: установка новой, продление, закрытие. Более чем 90 % от общего количества операций обработано с помощью RPA. В сфере грузовой работы роботы заполняют акты общей формы по типовым шаблонам, а также некоторую коммерческую документацию — для упрощения работы [11].

Все приведенные выше цифровые сервисы позволяют свести к минимуму работу в сфере контейнерных перевозок на сети железных дорог. Но для налаженного взаимодействия портов и припортовых станций, для снижения простоев контейнеров и повышения пропускной способности следует разработать конкретную концепцию работы.

На сегодняшний день в портах на установленный срок составляются планы о прибытии судна, которые передаются в дирекцию управления движением для

последующего формирования графика движения поездов. Одним из результатов решения научной задачи станет разработка методики взаимодействия работы портов и припортовых станций на основе предиктивной аналитики и интеллектуальной системы планирования. Предпосылки решения — низкая эффективность нынешнего взаимодействия портов и припортовых станций.

Методика взаимодействия портов и припортовых станций

В настоящей работе предлагается методика, состоящая из четырех этапов: сбор, агрегация данных и прогноз; анализ и расчет; принятие решений и выбор сценария; исполнение. На рис. 3 показана концептуальная структура метода взаимодействия работы портов и припортовых станций.

1. Сбор, агрегация данных и прогноз

Агрегируются данные от морских трекеров (Automatic Identification System), портов, стивидорных компаний, метеослужб. Учитываются: скорость передвижения, текущее местоположение судна, погода, занятость причалов, очередь на вход в акваторию порта. На основе предиктивной аналитики формируется прогноз передвижений и прибытия судна, в том числе возможных задержек. На выходе получается динамический прогноз прибытия судна в порт с учетом всех переменных.

2. Анализ и моделирование

На каждый контейнер, выполняющий перевозку в смешанном сообщении, формируются:

- технические характеристики (номер контейнера, номер запорно-пломбировочного устройства, вес брутто и нетто, габариты);
- описание груза (коды ГНГ, ЕТСНГ);
- данные отправителя/получателя;
- название судна и рейса.

После формирования поездов для каждого контейнера указывается степень приоритета в зависимости от типа груза и условий перевозки.

3. Принятие решений и выбор сценария

Формируются три сценария:

- а) если задержка в ожидании судна до 12 часов (включительно), вагоны с контейнерами остаются простоять на путях общего пользования припортовой

станции с последующим оформлением актов общей формы ГУ-23ВЦ на начало и конец простоя;

б) если задержка в ожидании судна от 12 до 48 часов, вагоны с контейнерами с менее приоритетными грузами подаются на контейнерные площадки с последующим хранением — с целью освобождения подвижного состава для других перевозок;

в) если задержка свыше 48 часов, формируются и разрабатываются альтернативные логистические цепочки или контейнеры переправляются на тыловые терминалы.

4. Реализация

На основе данных производится перераспределение ресурсов портов и станции (план маневровых работ, работа маневровых локомотивов, авто-погрузчиков, кранов). От первых трех модулей формируется информация, на основе которой работа порта строится на основе реального подхода судов, а не по плановому. На припортовых станциях формируются графики маневровых работ, в которых высвобождаются пути для формирования и отправления других поездов.

На основе разработанных этапов разработан алгоритм метода взаимодействия портов и припортовых станций, представленный на рис. 4. Для конкретизации работы данного метода ниже рассмотрен пример типовой технологической ситуации с использованием алгоритма методики взаимодействия портов и припортовых станций.

Представители процесса:

- припортовая железнодорожная станция N — обрабатывает 1000 ваг/сут;
- морской порт M — имеет 3 причала, 5 порталных кранов;
- судно QWE — планируемое время прибытия: 16 часов 00 минут 15 ноября 2025 г.;
- сформирован поезд № 3435 — 45 вагонов с контейнерами для судна.

Особенности конкретизации методики на примере задержки судна

Система получает данные за 32 часа до предполагаемого прибытия: судно QWE находится в 500 км от порта, его скорость снижена до 12 узлов. Дополнительно поступает штормовое предупреждение на 15 ноября 2025 г. Также известно, что причал № 2 будет занят до 18 часов 00 минут 15 ноября 2025 г.

На основании этих сведений система формирует прогноз: судно прибудет в порт в 8 часов 00 минут 16 ноября 2025 г., при этом допустимая погрешность составляет ± 4 часа. Таким образом, расчетное временное отклонение (ΔT) составляет 16 часов.



Рис. 3. Концептуальная структура метода взаимодействия работы портов и припортовых станций

Производится оповещение о том, что обработка поезда № 3435 будет производиться по сценарию б. Поезд прибывает на станцию в 10 часов 00 минут, производится анализ приоритетности контейнеров.

Таким образом, 20 рефрижераторных контейнеров отцепляются от поезда и переставляются на отставные пути станции; 15 контейнеров с лесоматериалами перегружаются на контейнерную площадку А; 10 контейнеров с личными вещами перегружаются на контейнерную площадку Б морского порта.

Далее по команде маневрового диспетчера локомотив отцепляет 20 вагонов, подает 25 вагонов на пути порта; платформы подаются под сдвоенную операцию, и маневровый локомотив с погруженными контейнерами подается на пути станции.

За час до прибытия судна маневровый локомотив производит подачу 20 вагонов с пути станции на пути порта; в это же время автопогрузчики перегружают с контейнерных площадок А и Б 25 нужных контейнеров.

По итогу сократился простой на путях станции и высвободился маневровый локомотив для сдвоенных операций при обработке по разработанной методике. При обработке поезда по существующей технологии 45 вагонов с контейнерами приставали на путях станции до прибытия судна, тем самым снижая пропускную способность станции.

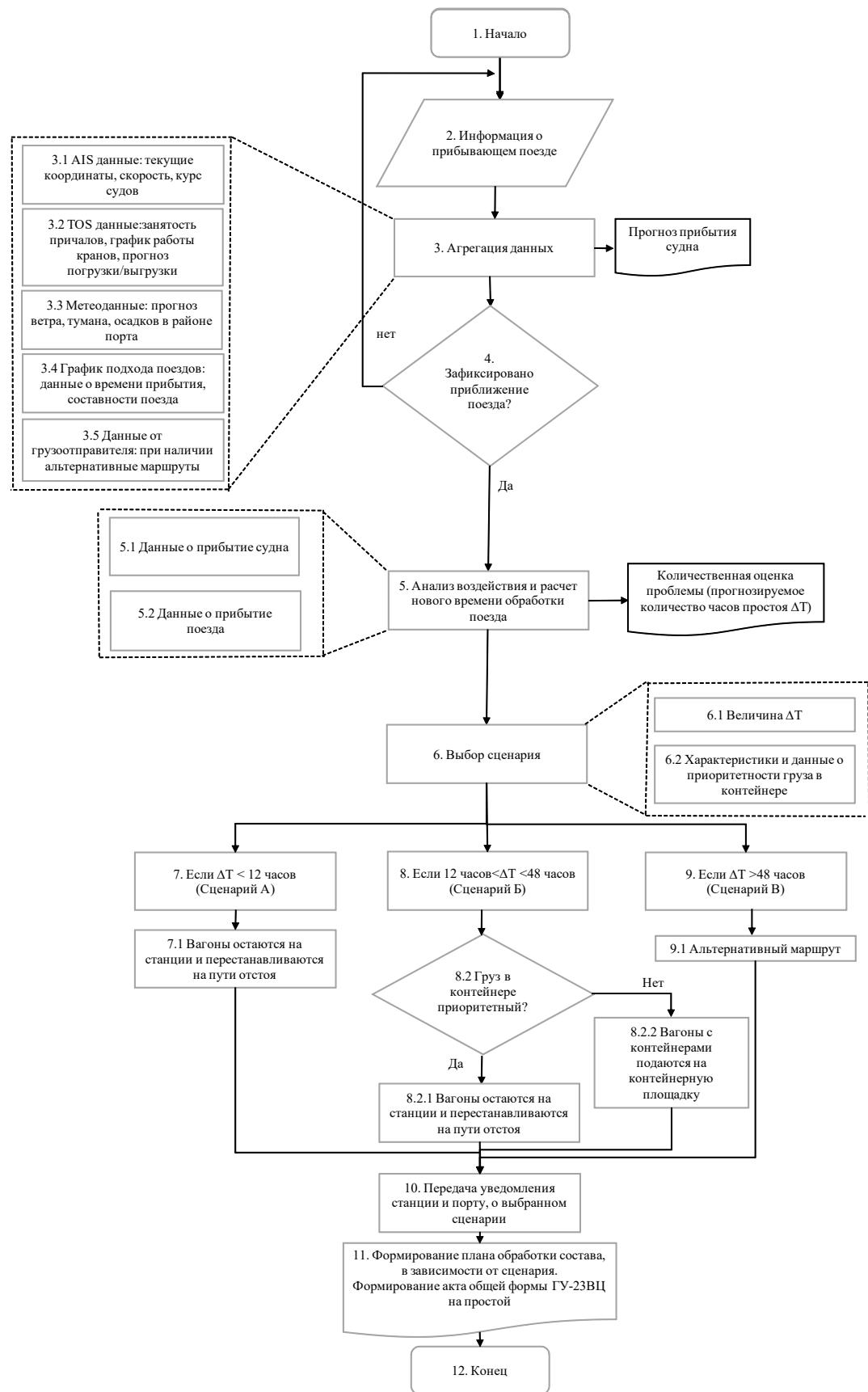


Рис. 4. Алгоритм методики взаимодействия припортовых станций и портов

Заключение

В работе исследованы лучшие практики в сфере контейнерных перевозок на сети железных дорог. Проведен комплексный анализ цифровых сервисов, используемых или внедряемых в настоящее время. Проанализированы автоматизированные системы для работы на железнодорожных станциях и в портах, разработана методика взаимодействия портов и припортовых станций, составлены концептуальная структура и алгоритм данной методики, рассмотрен пример типовой технологической ситуации с использованием алгоритма методики взаимодействия портов и припортовых станций. В перспективе развития следует детально рассмотреть внедрение системы на примере порта и припортовой станции Октябрьской железной дороги, проанализировать экономическую составляющую проекта и разработать имитационную и оптимизационную модели.

Список источников

1. Будущее контейнерных перевозок: ключевые тренды и лучшие практики 2025 года для успешной логистики. — URL: https://avalog.pro/blog/2025/03/17/budushhee-kontejnernyh-perevozok_klyuchevye-trendy-i-luchshie-praktiki-2025-goda-dlya-uspeshnoj-logistiki (дата обращения: 01.11.2025).
2. Импортозамещение // Гудок. — URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1650850&ysclid=mhs3aij38t570112005> (дата обращения: 01.11.2025).
3. Портал к портам. — URL: <https://gudok.ru/zdr/169/?ID=1700263&ysclid=mhlz49toby965172558> (дата обращения: 01.11.2025)
4. TOS — система управления терминалами в морском порту и ТЛЦ. — URL: <https://www.solvo.ru/products/solvo-tos/> (дата обращения: 01.11.2025)
5. Обзор СОЖТ за 12 мес. 2024 г. — URL: <https://railsovet.ru/upload/iblock/96d/s12g1snqlot94ejxaq7aqay27x2wm7hy.pdf?ysclid=mhmg7estw2978929505> (дата обращения: 01.11.2025)
6. Сайт АО «АЛЬФА-ПРИБОР». Продукция. — URL: www.alfa-pribor.ru (дата обращения: 04.11.2025)
7. Пленкин С. А. Разработка методики перераспределения вагонопотоков (на примере Северо-Западного полигона) / С. А. Пленкин, А. В. Новичихин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023 — Вып. 3 — С. 73–84. — DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-73-84.
8. Сайт ОАО «Российские железные дороги». — URL: <http://rzd.ru> (дата обращения: 03.11.2025).
9. Сайт Минтранс «Министерство транспорта РФ». — URL: <https://mintrans.gov.ru> (дата обращения: 03.11.2025).
10. Вакуленко С. П. Новый взгляд на технологию контейнерных перевозок железнодорожным транспортом / С. П. Вакуленко, А. М. Насыбуллин, Л. Р. Айсина, Д. Ю. Роменский и др. // Техника и технология транспорта. — 2022 — Вып. 1 — С. 12.

11. Комарова Д. В. Транспортно-логистическая система России: состояние, основные показатели, проблемы и перспективы развития / Д. В. Комарова // Теория и практика современной науки. — 2018. — Вып. 5 — С. 1192–1198.

Дата поступления: 07.07.2025

Решение о публикации: 04.08.2025

Контактная информация:

ЛОМАКИНА Дарья Сергеевна — аспирант; dashylkalom135@yandex.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, зав. кафедрой «Логистика и коммерческая работа»; novichikhin@pgups.ru

Methodology for Interaction in the “Railway Station – Port” System

D. S. Lomakina, A. V. Novichikhin

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

For citation: Lomakina D. S., Novichikhin A. V. Methodology for Interaction in the “Railway Station – Port” System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 135–147. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-135-147

Summary

Purpose: To increase the carrying capacity of port railway stations by developing a methodology for interaction between port stations and ports. **Methods:** To enhance the understanding of operations in container shipping, the best practices and emerging trends anticipated for the year 2025 were analyzed. An evaluation of digital services within the railway network was performed. The study explored automated control systems applied in container transportation at both railway stations and ports. A comprehensive assessment of the interactions between port stations and ports was presented. Additionally, the existing technological shortcomings of railway station-port interaction were identified. **Results:** A methodology facilitating the interaction between railway stations and ports in terms of harmonizing their timetables has been developed. This methodology aims to decrease the downtime of container wagons at stations and improve carrying capacity by accurately predicting vessel arrivals in real time and determining the most efficient train handling strategy. A conceptual framework for this interaction methodology has been created, encompassing empirical foundations and assumptions, theoretical underpinnings, implementation strategies, and reliability criteria. An algorithm for this methodology has been established, which is exemplified through a typical technological scenario illustrating the interaction between ports and port stations. **Practical significance:** The practical implications of this methodology lie in its ability to enhance the efficient and coordinated operation of ports and port stations. It facilitates timely management decisions, and bolsters the competitiveness of the transport sector by enabling the selection of the most effective train handling strategy based on forecasts of vessel arrivals. Consequently, carriers will experience increased carrying capacity through the balanced distribution of railcars at port stations, while shippers will benefit from reduced infrastructure occupancy costs.

Keywords: Container shipping, port, port railway station, rail transportation, transportation process management.

References

1. *Budushchee konteynernykh perevozok: klyuchevye trendy i luchshie praktiki 2025 goda dlya uspeshnoy logistiki* [The future of container transportation: key trends and best practices for success-

ful logistics in 2025]. Available at: <https://avalog.pro/blog/2025/03/17/budushhee-kontejnernyh-perevozok-klyuchevye-trendy-i-luchshie-praktiki-2025-goda-dlya-uspeshnoj-logistiki> (accessed: November 1, 2025). (In Russian)

2. *Importozameshchenie* [Import substitution]. Gudok. Available at: <https://gudok.ru/news-paper/?ID=1650850&ysclid=mhs3aij38t570112005> (accessed: November 1, 2025). (In Russian)

3. *Portal k portam* [Portal to ports]. Available at: <https://gudok.ru/zdr/169/?ID=1700263&ysclid=mhlz49toby965172558> (accessed: November 1, 2025). (In Russian)

4. *TOS — sistema upravleniya terminalami v morskem portu i TLTs* [TOS — terminal operating system in seaport and dry ports]. Available at: <https://www.solvo.ru/products/solvo-tos/> (accessed: November 1, 2025). (In Russian)

5. *Obzor SOZhT za 12 mes. 2024 g.* [Review of the Russian Railway Union for 12 months of 2024]. Available at: <https://railsoviet.ru/upload/iblock/96d/s12g1snqlot94ejxaq7aqay27x2wm7hy.pdf?ysclid=mhmg7estw2978929505> (accessed: November 1, 2025). (In Russian)

6. *Sayt AO “AL”FA-PRIBOR”. Produktsiya* [Website of JSC “ALFA-PRIBOR”. Products]. Available at: www.alfa-pribor.ru (accessed: November 4, 2025). (In Russian)

7. Plenkin S. A., Novichikhin A. V. Razrabotka metodiki pereraspredeleniya vagonopotokov (na primere Severo-Zapadnogo poligona) [Development of a methodology for redistributing car flows (on the example of the North-Western polygon)]. *Byulleten’ rezul’tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2023, Iss. 3, pp. 73–84. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-73-84. (In Russian)

8. *Sayt OAO “Rossiyskie zheleznye dorogi”* [Website of JSC “Russian Railways”]. Available at: <http://rzd.ru> (accessed: November 3, 2025). (In Russian)

9. *Sayt Mintrans “Ministerstvo transporta RF”* [Website of the Ministry of Transport of the Russian Federation]. Available at: (accessed: November 3, 2025). (In Russian)

10. Vakulenko S. P., Nasybullin A. M., Aysina L. R., Romenskiy D. Yu. et al. Novyy vzglyad na tekhnologiyu konteynernykh perevozok zheleznodorozhnym transportom [A new look at the technology of container transportation by rail]. *Tekhnika i tekhnologiya transporta* [Engineering and Technology of Transport]. 2022, Iss. 1, p. 12. (In Russian)

11. Komarova D. V. Transportno-logisticheskaya sistema Rossii: sostoyanie, osnovnye pokazateli, problemy i perspektivy razvitiya [Transport and logistics system of Russia: state, key indicators, problems and development prospects]. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki* [Theory and Practice of Modern Science]. 2018, Iss. 5, pp. 1192–1198. (In Russian)

Received: July 07, 2025

Accepted: August 04, 2025

Author’s information:

Daria S. LOMAKINA — Postgraduate Student; dashylkalom135@yandex.ru

Aleksey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Head of the Department of Logistics and Commercial Work; novichikhin@pgups.ru

УДК 625.46

Анализ влияния протяженности участка между остановочными пунктами и временных задержек на расчетную скорость движения подвижного состава скоростного трамвая

Д. А. Басовский¹, О. В. Востриков², А. А. Костенко¹

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

²СПб ГУП «Горэлектротранс», Российская Федерация, 196105, Санкт-Петербург, Сызранская ул., 15

Для цитирования: Басовский Д. А., Востриков О. В., Костенко А. А. Анализ влияния протяженности участка между остановочными пунктами и временных задержек на расчетную скорость движения подвижного состава скоростного трамвая // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 148–156. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-148-156

Аннотация

Цель: Обоснование необходимости реорганизации существующего трамвайного движения для возможности реализации высоких расчетных скоростей сообщения, которое является одним из необходимых условий организации скоростных трамвайных линий. **Метод:** Компьютерное моделирование движения подвижного состава скоростного трамвая с определением математических зависимостей расчетных скоростей сообщения от протяженностей участков между остановочными пунктами с учетом временных задержек на регулируемых пересечениях уличной дорожной сети и времени простоя на остановочных пунктах. **Результаты:** Получено математическое выражение, позволяющее оценить расчетную скорость сообщения скоростного трамвая при любой протяженности участка между остановочными пунктами. Обоснована необходимость в реорганизации трамвайного движения с созданием необходимых условий, позволяющих реализовать высокие расчетные скорости сообщения. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут применяться инженерами транспортной инфраструктуры при назначении длин и конфигураций участков в процессе проектирования скоростных трамвайных линий.

Ключевые слова: Трамвайный путь, остановочные пункты, скоростная линия, временные задержки, время простоя, многомодальное моделирование.

Введение

В 2023 г. в Санкт-Петербурге прирост объемов перевозок пассажиров городским общественным транспортом вырос на 19,7 % относительно уровня 2022 г. По данным Комтранса, более 1,2 млрд пассажирских перевозок приходятся на метрополитен, «Пассажиравтотранс» и «Горэлектротранс».

В течение первого полугодия 2023 г. общее количество пассажиров, воспользовавшихся метро, составило приблизительно 327,4 миллиона человек. Трамваи и троллейбусы ГУП «Горэлектротранс» перевезли более 124,9 миллиона пассажиров. ГУП «Пассажиравтотранс» и частные перевозчики обслужили около 156 миллионов и 205,4 миллиона пассажиров на своих автобусных маршрутах.

В 2023 г. завершилось обновление подвижного состава Трамвайного парка № 7, началось масштабное обновление Трамвайного парка № 8, а в парк № 5 было поставлено четырнадцать новых трамваев производства Усть-Катавского вагоностроительного завода. К 2028 г., с завершением реализации программы «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга», город увеличит трамвайный парк до 596 единиц.

Внедрение программы даст возможность «Горэлектротрансу» запустить скоростные магистральные трамвайные маршруты. Благодаря этому время в пути сократится, а интервал между трамваями составит от 3 до 8,6 минуты.

Скоростной трамвай имеет наибольшую провозную способность по сравнению с прочими видами наземного транспорта [1–4].

Согласно пункту 4.1 свода правил СП 98.13330.2018 «Трамвайные и троллейбусные линии» (далее — свод правил), трамвайные линии, где расчетный показатель скорости движения превышает 24 км/ч, отнесены к скоростным. В соответствии с актуальным сводом правил скоростную трамвайную линию определяют как отрезок пути протяженностью от 2 километров и более, где в пиковые часы скорость движения может превышать 21 км/ч.

Существует три основных метода прокладки трамвайных путей [5]:

- в профиле улично-дорожной сети на совмещенном с автодорогой полотне;
- в профиле улично-дорожной сети на обособленном от автодороги полотне;
- на самостоятельном полотне.

Согласно [5], при проектировании новых трамвайных линий необходимо предусматривать их размещение на выделенном полотне, отделенном от проезжей части, тротуаров и велодорожек. Для этого должны быть использованы разделительные полосы и технические средства, исключающие доступ автотранспорта.

Постановка задачи

Оптимизация расположения остановочных пунктов способствует сокращению общего времени поездки, повышению расчетной скорости сообщения и частоты устройства остановок [6, 7].

Проанализируем зависимость расстояния между остановочными пунктами и скорости сообщения подвижного состава при различном времени простоя трамвая и наличии временных задержек (ожидание на светофорах, пересечения с другими транспортными средствами и др.). Как уже отмечалось ранее, расчетную скорость сообщения в 21 км/ч будем считать минимально необходимой для возможности классифицировать рассматриваемый участок как «скоростную трамвайную линию».

Для использования в системе городского рельсового транспорта рассматривался трехсекционный трамвайный вагон ПКТС 71-932 «Невский», отличающийся

высоким техническим уровнем и большим потенциалом интеграции. Вагон обладает следующими техническими характеристиками, которые были использованы при создании имитационной модели:

- конструкционная скорость — 75 км/ч;
- длина вагона — 27,5 м;
- ширина вагона — 2,5 м;
- высота вагона — 3,5 м;
- служебное ускорение — 1 м/с^2 ;
- служебное замедление — 2 м/с^2 .

Упомянутые технические характеристики были задействованы в ходе создания имитационной модели, сформированной в программном комплексе для моделирования мультимодального движения с открытым исходным кодом SUMO (*Simulation of Urban Mobility*) [8] (рис. 1–3).

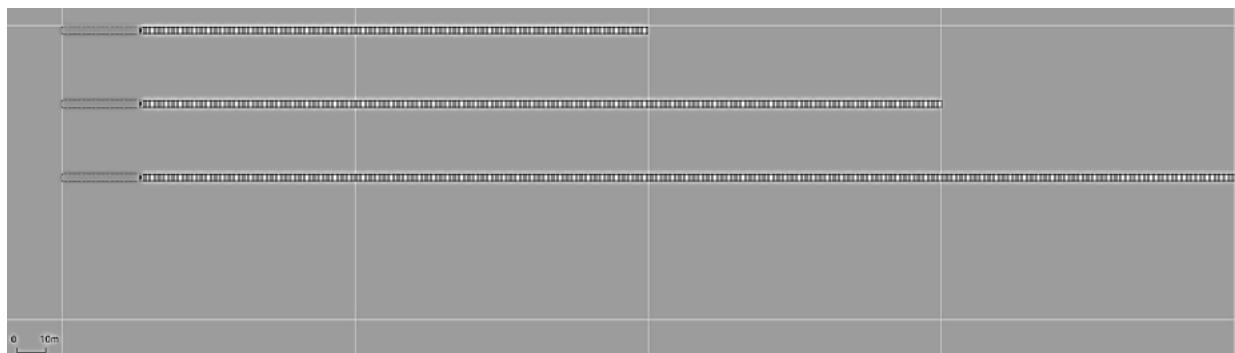


Рис. 1. Расчетные участки между остановочными пунктами
(протяженностью 200 до 400 м)



Рис. 2. Технические характеристики и параметры вагона 71-932 «Невский»,
внесенные в имитационную модель

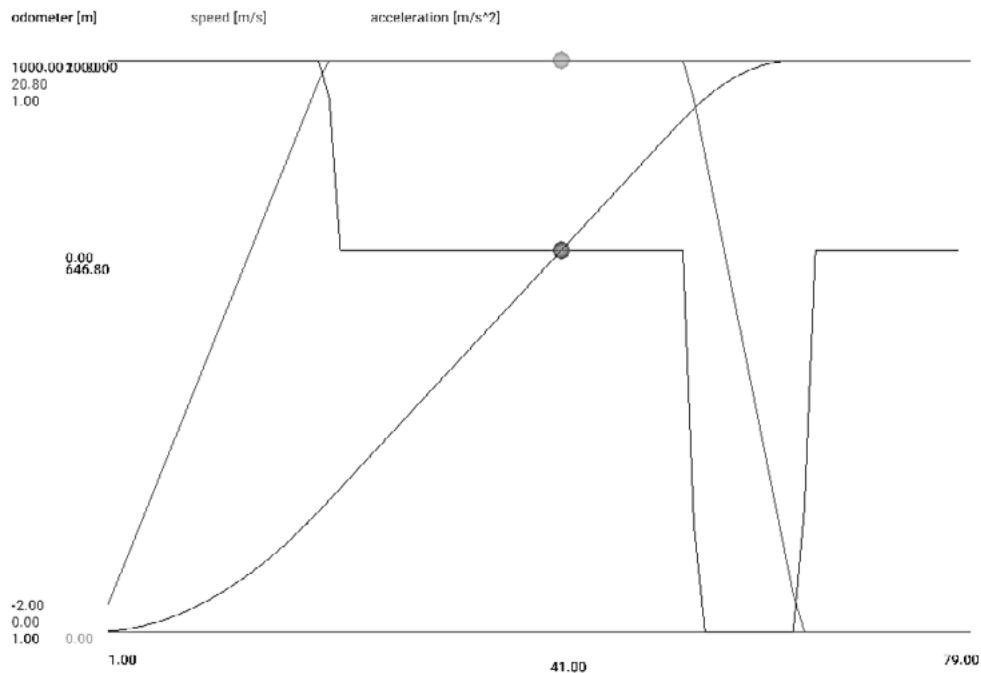


Рис. 3. Кинематические графики ($S(t)$, $V(t)$, $a(t)$) подвижного состава для линейного участка протяженностью 1000 м

В качестве объектов моделирования выступают линейные участки между остановочными пунктами различной протяженности — от 200 до 1500 м. Максимальная скорость, которую может развивать трамвай в данной модели, составляет 75 км/ч, что соответствует его конструкционным характеристикам, указанным в техническом паспорте.

Кроме того, исследовались два варианта расчета движения трамвая, включающих сценарии с задержками на регулируемых переездах. В случае отсутствия задержек продолжительность ожидания равнялась 0 с, при наличии — 30 с (среднее время ожидания зеленого сигнала светофора).

Было рассмотрено 4 варианта времени простоя трамвая t на остановочных пунктах: 15 с, 30 с, 45 с и 60 с.

Результаты моделирования

По результатам расчета ранее созданных имитационных моделей были построены графики зависимости изменения скорости сообщения трамвая от расстояния между остановочными пунктами и наличия/отсутствия временных задержек на регулируемых пересечениях, которые представлены на рис. 4, 5.

На построенных графиках пунктиром обозначены минимально необходимые расстояния между трамвайными остановками, обеспечивающие достижение минимально необходимой расчетной скорости сообщения в 21 км/ч.

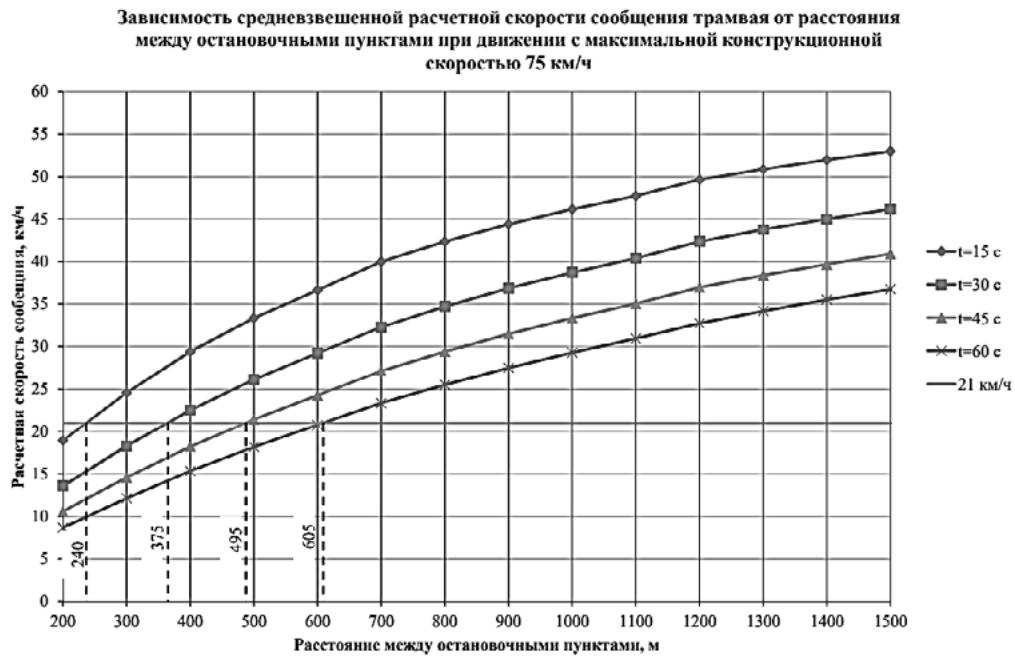


Рис. 4. Анализ динамики расчетной скорости трамвая в связи с расстоянием между остановками и отсутствием простоя на регулируемых переездах

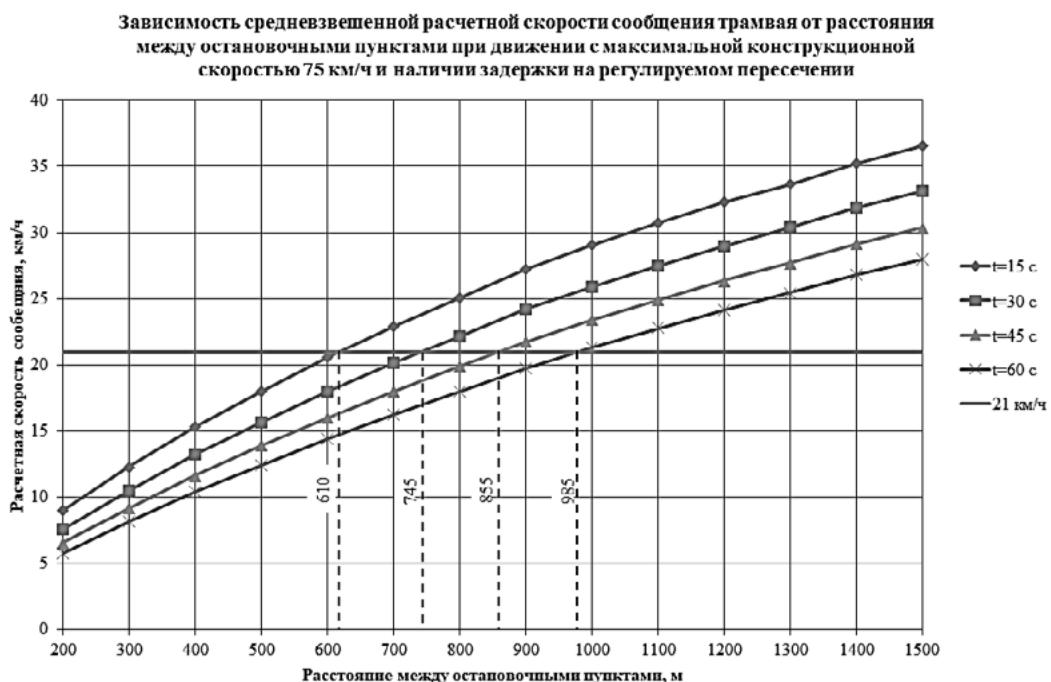


Рис. 5. Анализ динамики расчетной скорости трамвая в связи с расстоянием между остановками и имеющимся простоем в 30 с на регулируемых переездах

По результатам анализа графиков прослеживаются следующие закономерности:

- для обеспечения расчетной скорости движения трамвая 21 км/ч минимальное расстояние между остановками должно составлять 240 метров. Такой интервал допустим при отсутствии задержек на перекрестках и если время ожидания на остановке не превышает 15 секунд. Если время простоя на остановке

увеличивается до 60 секунд, необходимая длина участка для достижения минимальной расчетной скорости возрастает до 605 метров;

– чтобы обеспечить минимальную расчетную скорость движения трамвая, допустимая дистанция между остановками при ожидании зеленого сигнала светофора увеличивается до 610 метров, если время простоя составляет 15 секунд.

Была установлена количественная связь между расчетной скоростью трамвая (выраженной в км/ч) и расстоянием между остановочными пунктами (измеренным в метрах) с помощью построения трендовых линий:

$$v = Ax^2 + Bx + C,$$

где A, B, C — коэффициенты квадратичной функции, учитывающие отсутствие/наличие потери времени на регулируемых пересечениях; время простоя подвижного состава на остановочных пунктах. Все полученные значения коэффициентов сведены в таблицу.

Значения коэффициентов квадратичной функции определения расчетной скорости сообщения подвижного состава

Коэффициенты квадратичной функции	Время простоя t на остановочных пунктах, с			
	15	30	45	60
Задержка на регулируемых пересечениях уличной дорожной сети — 0 с				
A	-1,147E-05	-9,141E-06	-7,277E-06	-5,861E-06
B	0,041314	0,03651	0,031905	0,02801
C	15,081	9,8805	7,1852	5,6118
Задержка на регулируемых пересечениях уличной дорожной сети — 30 с				
A	-5,269E-06	-4,366E-06	-3,668E-06	-3,128E-06
B	0,026606	0,0237963	0,021474	0,019520
C	6,0473	4,8985	4,0901	3,5112

Применение зависимости (1) и коэффициентов таблицы позволяет оценить расчетную скорость сообщения трамвая при любой протяженности участка между остановочными пунктами.

Заключение

Анализ полученных сведений указывает на необходимость реструктуризации трамвайных маршрутов для успешной реализации «скоростных трамвайных линий» в густонаселенных городах. Действительно, высокая плотность транспортных потоков, обусловленная множеством светофоров и пересечений с другими видами транспорта, существенно снижает скорость движения трамваев. Строительство трамвайных путей на обособленном полотне позволит исключить

временные задержки на участках между остановочными пунктами и позволит реализовать высокие расчетные скорости сообщения подвижного состава [9–11].

Список источников

1. Транспорт в России / Росстат. — М.: Росстат, 2018. — 101 с.
2. Самойлов Д. С. Городской транспорт: учебник для вузов / Д. С. Самойлов. — 2--е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1983. — 384 с.
3. Дудкин Е. П. Комплексный подход к выбору и обоснованию вида городского транспорта / Е. П. Дудкин, Н. В. Левадная, В. А. Черняева // Бюллетень результатов научных исследований. — 2013. — № 3(8). — С. 4–13.
4. Дудкин Е. П. Современные скоростные системы рельсового городского транспорта / Е. П. Дудкин, О. Г. Параксевопуло, Ю. Г. Параксевопуло. — СПб.: ПГУПС, 2008. — 158 с.
5. СП 98.13330.2018. Свод правил. Трамвайные и троллейбусные линии. Актуализированная редакция СНиП 2.05.09—90.
6. Горев А. Э. Формирование коридоров приоритетного движения городского пассажирского транспорта / А. Э. Горев, А. И. Солодский, О. В. Попова, Д. Т. Оспанов // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации. — Иркутск: ИРНИТУ, 2019. — С. 618–628.
7. Мирончук А. А. Исследование влияния расстояния между остановочными пунктами на скорость движения трамвая / А. А. Мирончук, Ю. Ю. Добрынина // Инженерный вестник Дона. — 2020. — № 4(64). — С. 39.
8. Simulation of Urban MObility (SUMO). — URL: <https://sumo.dlr.de/docs/index.html> (дата обращения: 15.11.2024).
9. Черняева В. А. Анализ факторов проектирования транспортных систем городов / В. А. Черняева, Н. В. Левадная // Наука и образование XXI века: сборник статей международной науч.-практ. конференции. — Уфа: БГУ, 2013. — С. 280–284.
10. Черняева В. А. Современный подход при определении транспортных систем городов / В. А. Черняева, Н. В. Левадная, Е. П. Дудкин // Современные проблемы транспортного комплекса России. — 2013. — № 3. — С. 64–71.
11. Поляков А. А. Городское движение и планировка улиц / А. А. Поляков. — М., Л.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1953. — 251 с.

Дата поступления: 03.10.2025

Решение о публикации: 30.11.2025

Контактная информация:

БАСОВСКИЙ Дмитрий Аркадьевич — канд. техн. наук, доц.; basovskiy76@mail.ru

ВОСТРИКОВ Олег Владимирович — заместитель начальника службы по перспективному развитию; vost-ol@yandex.ru

КОСТЕНКО Андрей Александрович — аспирант; drynya.ko@mail.ru

The Influence of the Inter-Station Section Length and Time Delays on the Tram Design Speed

D. A. Basovskiy¹, O. V. Vostrikov², A. A. Kostenko¹

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

²Saint Petersburg State Unitary Enterprise “Gorelektrotrans”, 15, Syzranskaya str., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

For citation: Basovskiy D. A., Vostrikov O. V. Kostenko A. A. The Influence of the Inter-Station Section Length and Time Delays on the Tram Design Speed. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 148–156. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-148-156

Summary

Purpose: To substantiate the necessity for reorganization of the existing urban tram networks in order to realize the potential of high-speed tram traffic. **Method:** Computer modelling of high-speed tram rolling stock was performed. The research elucidates the mathematical relationships between calculated operational speeds and the distances between stops. The model incorporates critical variables, including incurred time delays at regulated street network intersections and dwell times observed at the passenger stops. The findings underscore the critical influence of traffic reorganization on achieving the design speeds essential for effective high-speed tram operation. **Results:** A mathematical expression has been developed to enable the precise evaluation of the design tram speed across variable inter-stop segment lengths. The imperative to restructure tram transit operations has been substantiated by the establishment of requisite parameters to facilitate elevated operational speeds. **Practical significance:** Practical applications of this research extend to transport infrastructure engineers when determining tram track lengths and configurations during the foundational design phases of high-speed tram networks.

Keywords: Tram track, stopping points, high-speed line, time delays, downtime, multimodal modelling.

References

1. Rosstat. *Transport v Rossii* [Transport in Russia]. Moscow: Rosstat Publ., 2018, 101 p. (In Russian)
2. Samoylov D. S. *Gorodskoy transport: uchebnik dlya vuzov, 2-e izd., pererab. i dop.* [Urban transport: textbook for universities, 2nd ed., rev. and augm.]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1983, 384 p. (In Russian)
3. Dudkin E. P., Levadnaya N. V., Chernyaeva V. A. *Kompleksnyy podkhod k vyboru i obosnovaniyu vida gorodskogo transporta* [Comprehensive approach to selecting and justifying the type of urban transport]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniiy* [Bulletin of Research Results]. 2013, Iss. 3(8), pp. 4–13. (In Russian)
4. Dudkin E. P., Paraskevopulo O. G., Paraskevopulo Yu. G. *Sovremennye skorostnye sistemy rel'sovogo gorodskogo transporta* [Modern high-speed rail urban transport systems]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2008, 158 p. (In Russian)
5. SP 98.13330.2018. *Svod pravil. Tramvaynye i trolleybusnye linii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.09—90* [SP 98.13330.2018. Set of rules. Tramway and trolleybus lines. Updated version of SNiP 2.05.09—90]. (In Russian)

6. Gorev A. E., Solodskiy A. I., Popova O. V., Ospanov D. T. Formirovanie koridorov prioritetnogo dvizheniya gorodskogo passazhirskogo transporta [Formation of priority movement corridors for urban passenger transport]. *Bezopasnost' kolesnykh transportnykh sredstv v usloviyakh ekspluatatsii* [Safety of wheeled vehicles in operation]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2019, pp. 618–628. (In Russian)
7. Mironchuk A. A., Dobrynina Yu. Yu. Issledovanie vliyaniya rasstoyaniya mezhdu ostanovochnymi punktami na skorost' dvizheniya tramvaya [Study of the impact of the distance between stops on tram speed]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2020, Iss. 4(64), p. 39. (In Russian)
8. Simulation of Urban MObility (SUMO) [Electronic resource]. Available at: <https://sumo.dlr.de/docs/index.html> (accessed: November 15, 2024).
9. Chernyaeva V. A., Levadnaya N. V. Analiz faktorov proektirovaniya transportnykh sistem gorodov [Analysis of factors in designing urban transport systems]. *Nauka i obrazovanie XXI veka: sbornik statey mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konferentsii* [Science and education of the 21st century: collection of articles from the international scientific-practical conference]. Ufa: BGU Publ., 2013, pp. 280–284. (In Russian)
10. Chernyaeva V. A., Levadnaya N. V., Dudkin E. P. Sovremennyy podkhod pri opredelenii transportnykh sistem gorodov [Modern approach to defining urban transport systems]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern problems of the Russian transport complex]. 2013, Iss. 3, pp. 64–71. (In Russian)
11. Polyakov A. A. *Gorodskoe dvizhenie i planirovka ulits* [Urban traffic and street planning]. Moscow, Leningrad: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekturke Publ., 1953, 251 p. (In Russian)

Received: October 03, 2025

Accepted: November 30, 2025

Author's information:

Dmitriy A. BASOVSKIY — Ph.D. in Engineering, Associate Professor; basovskiy76@mail.ru

Oleg V. VOSTRIKOV — Deputy Head of the Service for Long-Term Development;

vost-ol@yandex.ru

Andrey A. KOSTENKO — Postgraduate Student; drynya.ko@mail.ru

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 629.464.46

Оптимизация метрологического обслуживания динамических вагонных весов

Ю. И. Макаров, А. Г. Нуриев, Я. А. Гренадер, А. Н. Федорова

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

Для цитирования: Макаров Ю. И., Нуриев А. Г., Гренадер Я. А., Федорова А. Н. Оптимизация метрологического обслуживания динамических вагонных весов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 157–166. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-157-166

Аннотация

Цель: Цель работы заключается в оптимизации метрологического обслуживания динамических весов для железнодорожных вагонов и поездов путем применения современных методов анализа, повышения точности и надежности измерений. В работе изучена методика поверки динамических весов, предложена таблица с графиком поверок, обеспечивающая своевременное и систематическое проведение метрологического обслуживания. Проведен анализ количества динамических весов и станций, на которых они установлены, что позволило оценить масштабы будущих работ. На основе полученных данных разработаны рекомендации по улучшению процессов поверки и калибровки, направленные на снижение погрешностей измерений и повышение эффективности эксплуатации весового оборудования. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации работы железнодорожного транспорта и снижения затрат на техническое обслуживание. **Методы:** Анализ существующей методики поверки динамических весов; разработка нового испытательного состава для поверки весов и моделирование процесса поверки с использованием нового испытательного состава. **Результаты:** Выявлены недостатки поверки динамических весов; разработан способ поверки испытательным составом. Моделирование показало, что испытательный состав способен существенно сократить время поверки и повысить ее эффективность, снизив нагрузку на логистику локомотивов и железнодорожных составов. **Практическая значимость:** Предложен новый метод использования испытательного состава для поверки динамических весов на железнодорожных станциях; разработан маршрут курсирования испытательного состава, обеспечивающий поверку всех весов на Октябрьской железной дороге; определены периодичность и порядок проведения поверки весов. Исследование проведено на основе анализа данных поверки динамических весов на железнодорожных станциях Октябрьской железной дороги. Реализация предложенных рекомендаций обеспечит непрерывность работы и снизит затраты на метрологическое обслуживание.

Ключевые слова: Вагонные весы, испытательный состав, метрологическое обслуживание, поверка, межповерочный интервал.

Введение

Необходимость обеспечения безопасности и бесперебойности движения железнодорожного транспорта, наличие значительного числа разнородных процессов приводят к необходимости использования при эксплуатации многообразия по функциональному назначению, конструктивному исполнению и точности средств измерений (далее — СИ) [1].

Значительное число СИ используется в области государственного регулирования обеспечения единства измерений, что обуславливает необходимость их обязательной периодической поверки [2]. Как правило, для подготовки к работе поверителям необходимо время на сбор рабочего персонала, подготовку СИ и возможное эталонное оборудование [3], иногда — необходимость использования специализированного подвижного состава и другой специальной техники.

Распространенными на железной дороге СИ являются динамические вагонные весы, с помощью которых измеряется как вес отдельных вагонов, так и составов [4].

В данной статье предложена оптимизация метрологического обслуживания динамических вагонных весов на основе проведенного анализа в рамках Октябрьской железной дороги.

Методика поверки динамических вагонных весов

Согласно ГОСТ Р 8.598—2003 «Весы для взвешивания железнодорожных транспортных средств в движении. Методика поверки», для поверки вагонных весов необходимо собрать испытательный состав, состоящий из порожних, полностью и частично груженых контрольных вагонов. Испытательный состав должен включать в себя не менее 5 и не более 15 контрольных вагонов [5].

В соответствии с этим авторы рассмотрели состав из пяти вагонов — один вагон весопроверочный (далее — ВПВ), два порожних и два полностью груженых [6]. Данный состав был назначен после анализа метрологических характеристик всех динамических весов рассматриваемого полигона.

В настоящее время организация поверочных работ динамических вагонных весов на сети железных дорог состоит из следующих основных этапов:

- предприятие (далее — клиент), обслуживающее весы, подает заявку на проведение поверки в центр метрологии [7];
- заключение договора на основании заявки (обращения) клиента в центр метрологии с последующим предоставлением перечня копий учредительных документов;
- центр метрологии оказывает услуги по регламентированному техническому обслуживанию, предоставлению эталонов для проведения поверки и поверке вагонных весов с использованием ВПВ.

Испытательный состав прокатывают через поверяемые весы с одной стороны или с двух сторон (при тяге локомотива в одну сторону и при толкании в другую, если это предусмотрено в руководстве по эксплуатации) для получения не менее 60 результатов взвешиваний контрольных вагонов [8].

Для поверки только одних весов — с момента заявки о поверке до ее проведения — зачастую уходит 3–4 недели. Сначала собирается состав из пяти вагонов и бригада, которая будет проводить поверку; далее рассчитывается график движения испытательного состава; после начала движения состав делает остановки на различных станциях.

Образцовыми весами для испытательного состава являются весы пятого разряда [9]. Однако организации зачастую не имеют весов пятого разряда, поэтому по пути необходимо посетить еще и ближайшие «эталонные» вагонные весы. После этого испытательный состав возвращается обратно с учетом выстроенного графика.

Все эти недочеты и потраченное время влекут за собой значительные затраты для держателей весов 5-го разряда, для клиентов и для крупнейшего перевозчика российской сети железных дорог «Российские железные дороги» (далее — РЖД).

Оптимизация поверки динамических вагонных весов

Решение задачи оптимизации проводилось в рамках Октябрьской железной дороги (далее — ОЖД). Основным элементом рассматриваемой оптимизации является предложение собрать один универсальный испытательный состав, который будет курсировать по расчетному маршруту с целью проведения поверки всех динамических весов ОЖД.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие работы:

- проведен графический анализ карты ОЖД;
- выполнен расчет количества динамических весов и станций, на которых они располагаются;
- проведен анализ графиков поверки весов.

Расположение и количество динамических весов представлены на рисунке.

На основе представленной схемы был разработан маршрут движения испытательного состава (таблица). При разработке маршрута движения состава учитывалось:

- межпроверочный интервал весов;
- время движения до станции;
- время, отведенное на поверку весов [10].

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- на ОЖД 41 станция с динамическими весами;
- общее количество динамических весов — 69;
- возможно поверить все динамические весы ОЖД, применяя предлагаемую методику и соблюдая требуемые межпроверочные интервалы;
- суммарное время поверки всех весов ОЖД, применяя предлагаемую методику, составит 9 месяцев.

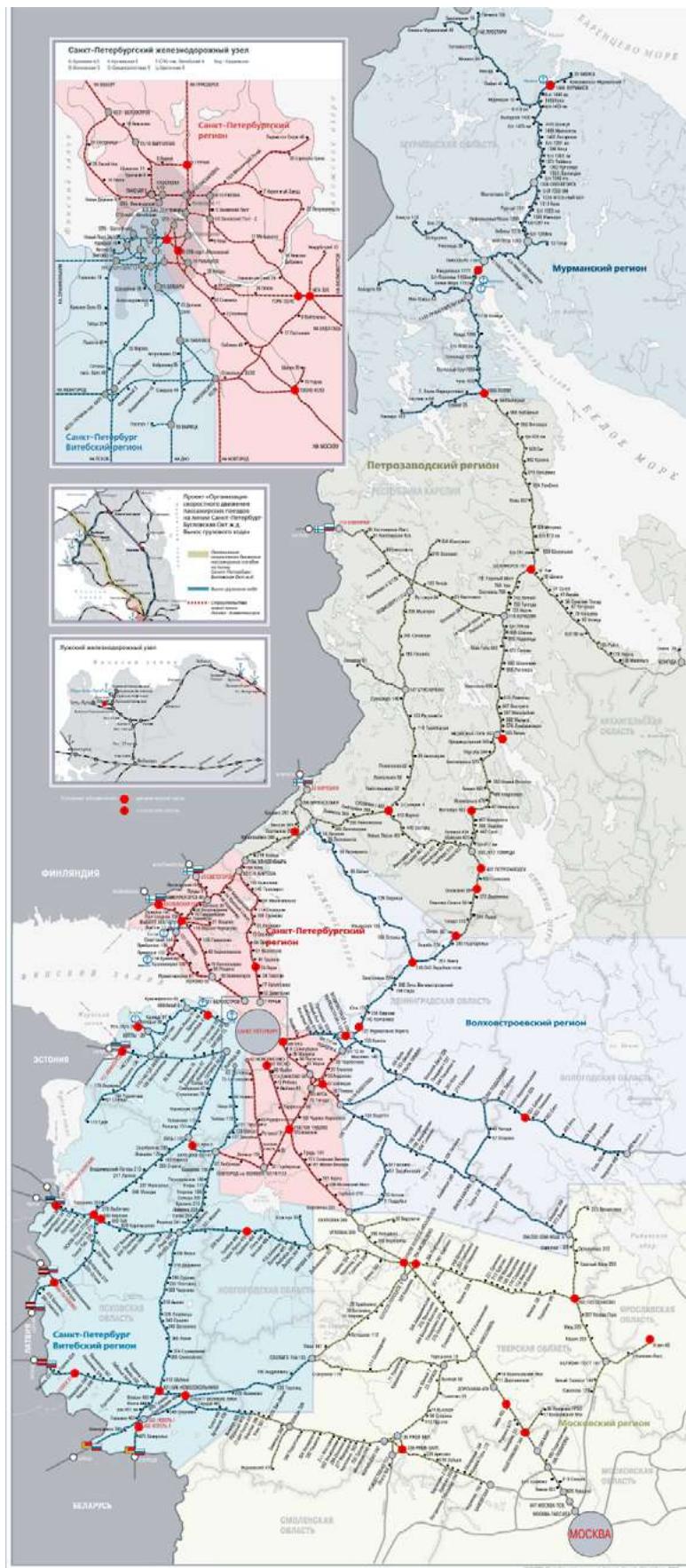


Схема расположения и количество динамических весов на ОЖД

График поверки динамических весов ОЖД

№ п/п	Место установки	Тип весов	Изготовитель	Заводской/ приписной №	Год ввода в эксплу- атацию	Дата следующей проверки	Дата текущей проверки
1	ст. Невель-2	РТВ-Д	АСИ	171608	2017	01.02.2025	17.05.2024
2	ст. Невель-2	Веста-СД	АСИ	292	2007	02.02.2025	10.02.2024
3	ст. Великие Луки	ВТВ-Д	АСИ	8-24(98)	2000	05.02.2025	29.05.2024
4	ст. Новосокольники	ВТВ-Д	АСИ	345	2007	09.02.2025	18.07.2024
5	ст. Себеж	РТВ-Д	АСИ	181329	2018	14.02.2025	14.12.2024
6	ст. Себеж	РТВ-Д	АСИ	181335	2018	15.02.2025	17.04.2024
7	ст. Себеж	ВТВ-Д	АСИ	208	2003	16.02.2025	09.03.2024
8	ст. Старая Русса	Веста-СД	АСИ	395	2008	22.02.2025	05.06.2024
9	ст. Березки	РТВ-Д	АСИ	181300	2019	29.02.2025	27.04.2024
10	ст. Псков	ВТВ-Д	АСИ	205	2003	01.03.2025	23.01.2024
11	ст. Печоры	РТВ-Д	АСИ	181138	2018	06.03.2025	20.11.2024
12	ст. Печоры	ВТВ-Д	АСИ	152	2002	07.03.2025	28.08.2024
13	ст. Пыталово	РТВ-Д	АСИ	181137	2018	13.03.2025	21.12.2024
14	ст. Пыталово	Веста-СД	АСИ	121361	2013	14.03.2025	26.05.2024
15	ст. Ржев	РТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	181301	2019	20.03.2025	30.10.2024
16	ст. Ржев	ВТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	300	2005	21.03.2025	11.04.2024
17	Тверь	ВТВ-Д	ООО «Инженерный центр «АСИ», г. Кемерово	237	2004	26.03.2025	03.11.2024
18	Ст. Решетниково	РТВ-Д	ООО «Инженерный центр «АСИ», г. Кемерово	141374	2014	28.03.2025	23.03.2024
19	ст. Углич	ВТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	8-24	1992	02.04.2025	15.12.2024
20	ст. Сонково	РТВ-ДВ	ООО «АСИ», г. Кемерово	191552	2019	05.04.2025	15.03.2024
21	ст. Медведево	РТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	191749	2020	11.04.2025	07.04.2024
22	ст. Бологое	ВТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	299	2005	12.04.2025	12.09.2024
23	Бабаево	ВТВ-СД	АСИ	8-52	2001	22.04.2025	12.07.2024
24	Бабаево	РТВ-Д	АСИ	66	2006	23.04.2025	12.05.2024
25	Бабаево	РТВ	АСИ	161293	2017	24.04.2025	24.01.2024
26	Кириши	Веста СД	АСИ	376	2005	30.04.2025	21.12.2024
27	Чудово-Московское	ВТВ-Д-200	АСИ Кемерово	10-14/4	2002	03.05.2025	10.03.2024
28	Луга-2	ВТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	200	2000	08.05.2025	13.09.2024
29	ст. Ивангород- Нарвский	РТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	181330	2019	13.05.2025	20.04.2024
30	ст. Ивангород- Нарвский	РТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	181331	2019	14.05.2025	20.04.2024

№ п/п	Место установки	Тип весов	Изготовитель	Заводской/ приписной №	Год ввода в эксплу- атацию	Дата следующей проверки	Дата текущей проверки
31	Ивангород-Нарвский (пограничная)	ВЕСТА-СД-100-У-4/2	АСИ Кемерово	121331	—	15.05.2025	24.11.2024
32	Лужская-Южная	ВЕСТА-СД-150/У2	ООО «АСИ», г. Кемерово	111533	2008	20.05.2025	12.07.2024
33	Ораниенбаум	ВТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	175	2000	24.05.2025	05.04.2024
34	Выборг	ВТВ-Д-200	АСИ Кемерово	157	2002	28.05.2025	29.03.2024
35	Бусловская	РТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	171820	2018	30.05.2025	21.07.2024
36	Бусловская	РТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	161301	2016	31.05.2025	21.07.2024
37	Пери	РТВ-Д X/200-Х-2	АСИ Кемерово	181299	2018	06.06.2025	06.03.2024
38	Пери	РТВ-Д X/200-Х-2	АСИ Кемерово	181299	2018	07.06.2025	06.03.2024
39	ст. Ручьи	ВЕСТА-СД100	ООО «Инженерный центр «АСИ», г. Кемерово	243	2006	11.06.2025	16.05.2024
40	Волковская	РТВ-Дв	АСИ Кемерово	171821	2017	14.06.2025	12.12.2024
41	Санкт-Петербург-Товарный-Московский	ВЕСТА-СД150	АСИ Кемерово	332	2007	17.06.2025	13.03.2024
42	Санкт-Петербург-Сортировочный-Московский	РТВ-Д	АСИ Кемерово	171609	2017	18.06.2025	18.01.2024
43	Санкт-Петербург-Сортировочный-Московский	РТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	171609	2017	19.06.2025	18.01.2024
44	Санкт-Петербург-Сортировочный-Московский	РТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	132-01	2006	20.06.2025	04.07.2024
45	ст. Горы	РТВ-Д	ООО «АСИ», г. Кемерово	191748	2020	24.06.2025	06.12.2024
46	ст. Мга	ВТВ-Д	ООО «Инженерный центр «АСИ», г. Кемерово	353	2007	26.06.2025	14.06.2024
47	Тосно	ВТВ-Д-200	АСИ Кемерово	272	2005	28.06.2025	19.01.2024
48	Волховстрой	РТВ	АСИ	211122	2022	01.07.2025	31.01.2024
49	Волховстрой	ВТВ-Д	АСИ	8-24/93	2000	02.07.2025	27.03.2024
50	Волховстрой	РТВ	АСИ	201128	2020	03.07.2025	28.04.2024
51	Волховстрой	РТВ	АСИ	201129	2020	04.07.2025	07.02.2024
52	Волховстрой	РТВ	АСИ	201130	2020	05.07.2025	31.01.2024
53	Мурманские Ворота	РТВ-Д	АСИ	131200	2014	09.07.2025	04.09.2024
54	Лодейное Поле	ВТВ-Д	АСИ	264	2005	12.07.2025	11.04.2024

№ п/п	Место установки	Тип весов	Изготовитель	Заводской/ приписной №	Год ввода в эксплуатацию	Дата следующей поверки	Дата текущей поверки
55	Сортавала	РТВ-Д	«АСИ»	248	2005	18.07.2025	02.11.2022
56	Свирь	РТВ-Д	«АСИ»	211110	2021	24.07.2025	13.07.2024
57	Свирь	ВТВ-Д	«АСИ»	298/1298	2005	25.07.2025	11.05.2024
58	Онежский	ВЕСТА-СД	«АСИ»	249/1249	2006	29.07.2025	02.06.2021
59	Петрозаводск	ВТВ-Д	«АСИ»	141/1141	1997	01.08.2025	18.08.2024
60	Суоярви-1	ВТВ-Д	«АСИ»	17/1117	2004	07.08.2025	24.01.2024
61	Нигозеро	ВТВ-Д	«АСИ»	207/1207	2003	12.08.2025	04.05.2024
62	Мед. Гора	ВТВ-Д	«АСИ»	35/1035	2004	15.08.2025	07.09.2024
63	Беломорск	РТВ-Д	«АСИ»	171610/1061	2005	19.08.2025	27.06.2022
64	Беломорск	ВТВ-Д	«АСИ»	204/1204	2003	20.08.2025	01.02.2024
65	Лоухи	ВТВ-Д	«АСИ»	319/1220	2006	26.08.2025	10.08.2024
66	Лоухи	РТВ-Д	«АСИ»	201050	2020	27.08.2025	24.07.2024
67	Кандалакша	РС-200Д24В	АПКО «Весоизмеритель»	018/247	1989	02.09.2025	11.08.2022
68	Кандалакша	ВЕСТА-СД	«АСИ»	358/1247	2008	03.09.2025	25.08.2024
69	Мурманск	ВЕСТА-СД	«АСИ»	365/1288	2008	06.09.2025	22.05.2024

Так как на данный момент динамические весы на ОЖД поверяются в соответствии с их межповерочным интервалом, для обеспечения непрерывного движения испытательного состава по полигону при первоначальном проезде ряд весов будет необходимо поверить дважды. Это приведет к избыточным затратам в первый год работы испытательного состава. Однако в последующие годы, когда все весы будут поверены согласно составленному графику, затраты будут существенно минимизированы.

Заключение

Считаем, что внедрение предлагаемой оптимизации поверки динамических весов позволит как сократить время проведения поверочных работ отдельных весов, так и снизить стоимость поверки весового оборудования в рамках ОЖД начиная со второго года внедрения.

Сокращение временных затрат и стоимости работ обусловлено следующими факторами:

- **исключение** необходимости подачи и обработки заявок на поверку;
- **минимизация** затрат на многократный сбор испытательного состава с привлечением дополнительных ресурсов;
- **оптимизация** логистики за счет однократного расчета маршрута движения испытательного состава и его согласования с общим графиком движения поездов.

Основные недостатки оптимизации:

- **увеличение** затрат в первый год внедрения проекта;

– **необходимость** адаптации персонала, участвующего в поверочных работах, к новому процессу.

При успешном внедрении и подтверждении расчетных показателей оптимизации на ОЖД возможно рассмотрение вопроса о распространении данной методики на всю сеть железных дорог Российской Федерации.

Список источников

1. Справочник «Что такое поверка весов?». — URL: <https://www.smartves.ru/press-center/chto-takoe-poverka-vesov/> (дата обращения: 10.01.2025).
2. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» // Российская газета. — 2008. — № 140.
3. Исаев Л. К. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для вузов / Л. К. Исаев. — М.: КноРус, 2018. — 256 с.
4. Статья «Главное про поверку весов». — URL: <https://dzen.ru/a/ZSTnzcOFhD3-WVDY> (дата обращения: 12.01.2025).
5. ГОСТ Р 8.598—2003. Весы для взвешивания железнодорожных транспортных средств в движении. Методика поверки. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032122> (дата обращения: 10.01.2025).
6. ГОСТ OIML R 76-1—2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания. — М.: Стандартинформ, 2012. — 126 с.
7. ГОСТ Р 53228—2008. Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200076726?ysclid=m7s1rr98jk912018143> (дата обращения: 18.01.2025).
8. ГОСТ 8.647—2015. Весы вагонные автоматические. Часть 1. Метрологические и технические требования. Методы испытаний. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200135535/titles?ysclid=m7s1ngs26u66872479> (дата обращения: 15.01.2025).
9. ГОСТ 8.453—82. Весы для статического взвешивания. Методы и средства поверки. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1982. — 35 с.
10. Приказ № 1622 «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений массы». — URL: <https://docs.cntd.ru/document/351048070?ysclid=m7s1ti439b290541878> (дата обращения: 12.01.2025).

Дата поступления: 06.06.2025

Решение о публикации: 12.07.2025

Контактная информация:

МАКАРОВ Юрий Иванович — ст. преподаватель; makarov@pgups.ru

НУРИЕВ Али Гасаналиевич — студент; informatiks20@gmail.com

ГРЕНАДЕР Яна Алексеевна — студент; yana.grenader@yandex.ru

ФЕДОРОВА Анастасия Николаевна — студент; fedorovaan2003@yandex.ru

Optimization of Metrological Maintenance of Dynamic Wagon Scales

Yu. I. Makarov, A. G. Nuriev, Ya. A. Grenader, A. N. Fedorova

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

For citation: Makarov Yu. I., Nuriev A. G., Grenader Ya. A., Fedorova A. N. Optimization of Metrological Maintenance of Dynamic Wagon Scales. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 157–166. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-157-166

Summary

Purpose: The aim of the paper is to optimize the metrological maintenance of dynamic scales for railway wagons and trains by applying modern methods of analysis and improving the accuracy and reliability of measurements. The paper studies the methodology for verifying dynamic scales, and presents a table of inspection schedule that ensures timely and systematic metrological maintenance. An analysis of the number of dynamic scales and the stations where they are installed was carried out. This enabled the assessment of the future work scale. Based on the data obtained, recommendations have been developed to improve the verification and calibration processes aimed at reducing measurement errors and improving the efficiency of weighing equipment functionality. The research results can be used to optimize the operation of railway transport and reduce maintenance costs. **Methods:** Analysis of the existing methodology for calibrating dynamic scales; development of a new testing method for calibrating scales; and modelling the verification process using a new test train. **Results:** The shortcomings of dynamic scales verification have been identified. A new method for their verification by a test train has been developed. The simulation has demonstrated that the new test train is capable of significantly reducing the verification time while increasing its accuracy, reducing the logistical burden on locomotives and railways. **Practical significance:** A new method for using a test train to calibrate dynamic scales at railway stations has been proposed. A test train route has been developed to ensure the verification of all scales on the Oktyabrskaya Railway; the frequency and procedure for calibrating the scales have also been determined. The research was conducted by analyzing data acquired from the verification of dynamic scales at railway stations operated by the Oktyabrskaya Railway. Adopting the suggested recommendations would facilitate uninterrupted operations and decrease expenses related to metrological maintenance.

Keywords: Wagon scales, test train, metrological maintenance, verification, verification interval.

References

1. *Spravochnik “Chto takoe poverka vesov?”* [Reference book “What is weight verification?”]. Available at: <https://www.smartves.ru/press-center/chto-takoe-poverka-vesov/> (accessed: January 10, 2025). (In Russian)
2. Federal’nyy zakon ot 26.06.2008 № 102-FZ “Ob obespechenii edinstva izmereniy” [Federal Law № 102-FZ of June 26, 2008 “On ensuring uniformity of measurements”]. *Rossiyskaya gazeta* [Russian newspaper]. 2008, Iss. 140. (In Russian)
3. Isaev L. K. *Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya: uchebnik dlya vuzov* [Metrology, standardization and certification: textbook for universities]. Moscow: KnoRus Publ., 2018, 256 p. (In Russian)

4. *Stat'ya “Glavnoe pro poverku vesov”* [Article “The main thing about weight verification”]. Available at: <https://dzen.ru/a/ZSTnzcOFhD3-WVDY> (accessed: January 12, 2025). (In Russian)
5. *GOST R 8.598—2003. Vesy dlya vzveshivaniya zheleznodorozhnykh transportnykh sredstv v dvizhenii. Metodika poverki* [Scales for weighing railway vehicles in motion. Verification methodology]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200032122> (accessed: January 10, 2025). (In Russian)
6. *GOST OIML R 76-1—2011. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Vesy neavtomaticheskogo deystviya. Chast’ 1. Metrologicheskie i tekhnicheskie trebovaniya. Ispytaniya* [State system for ensuring uniformity of measurements. Non-automatic scales. Part 1. Metrological and technical requirements. Testing]. Moscow: Standartinform Publ., 2012, 126 p. (In Russian)
7. *GOST R 53228—2008. Vesy neavtomaticheskogo deystviya. Chast’ 1. Metrologicheskie i tekhnicheskie trebovaniya. Ispytaniya* [Non-automatic scales. Part 1. Metrological and technical requirements. Testing]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200076726?ysclid=m7s1rr98jk912018143> (accessed: January 18, 2025). (In Russian)
8. *GOST 8.647—2015. Vesy vagonnnye avtomaticheskie. Chast’ 1. Metrologicheskie i tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytanii* [Wagon automatic scales. Part 1. Metrological and technical requirements. Testing methods]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200135535/titles?ysclid=m7s1ngs26u66872479> (accessed: January 15, 2025). (In Russian)
9. *GOST 8.453—82. Vesy dlya staticheskogo vzveshivaniya. Metody i sredstva poverki* [Scales for static weighing. Methods and means of verification]. Moscow: IPK Izdatel’stvo standartov Publ., 1982, 35 p. (In Russian)
10. *Prikaz № 1622 “Ob utverzhdenii gosudarstvennoy poverochnoy skhemy dlya sredstv izmereniy massy”* [Order No. 1622 “On approval of the state verification scheme for mass measuring instruments”]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/351048070?ysclid=m7s1ti439b290541878> (accessed: January 12, 2025). (In Russian)

Received: June 06, 2025

Accepted: July 12, 2025

Author’s information:

Yury I. MAKAROV — Senior Lecture; makarov@pgups.ru

Ali G. NURIEV — Student; informatiks20@gmail.com

Yana A. GRENADE — Student; yana.grenader@yandex.ru

Anastasiya N. FEDOROVA — Student; fedorovaan2003@yandex.ru

УДК 621.891.22

Влияние лазерной закалки на металлографические и триботехнические характеристики стали 55 распределительного вала дизеля тепловоза

В. П. Бирюков¹, А. Н. Миряха², А. А. Якубовский¹, Я. А. Горюнов¹, О. И. Кулаков¹

¹Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук, Российская Федерация, 101000, Москва, М. Харитоньевский пер., 4

²ООО НПП «ИНЖЕКТ», Российская Федерация, 410033, Саратов, ул. Элмашевская, Владение 3А, оф. 1

Для цитирования: Бирюков В. П., Миряха А. Н., Якубовский А. А., Горюнов Я. А., Кулаков О. И. Влияние лазерной закалки на металлографические и триботехнические характеристики стали 55 распределительного вала дизеля тепловоза // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 167–177. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-167-177

Аннотация

Цель: Определение влияния режимов обработки прямоугольным пятном полупроводникового лазера на изменения глубины зон закалки стали 55, микротвердости, микроструктуры, триботехнических свойств при трении по закаленной стали 45 при подаче масла капельным способом. **Методы:** Лазерное термоупрочнение поверхности трения образцов стали 55 было выполнено прямоугольным пятном полупроводникового лазера. Определение металлографических свойств зон лазерного упрочнения было выполнено с использованием оптической системы МС-1000, цифрового микроскопа АМ-419, микротвердомера ПМТ-3 с цифровой камерой МС-8,3С при нагрузке 0,98 Н. В качестве эталона был выбран образец стали 18ХГ после цементации с твердостью 56–59 HRC. Триботехнические испытания по схеме: «плоский прямоугольный образец стали 55 — кольцевая поверхность оправки контробразца из стали 45», установленной в патрон шпинделя машины трения. Измерение моментов трения и усилия нагружения образцов было выполнено с применением тензодатчиков в непрерывном режиме с отображением данных на дисплее персонального компьютера. Также на машине трения установлен бесконтактный индуктивный датчик частоты вращения шпинделя с выводом на тахометр, закрепленный на верхней крышке машины. **Результаты:** Исследования показали, что при лазерном упрочнении микроструктура зон закалки содержит мелкодисперсные иглы мартенсита. Твердость этих зон составляет 7470–10 980 МПа. Давление заедания при различных скоростях скольжения контробразца из стали 45 в 1,5–1,6 раза, а износстойкость — в 2 раза выше, чем у образцов стали 18ХГТ после цементации. При этом коэффициенты трения значительно ниже. **Практическая значимость:** Технологический процесс изготовления распределительного вала дизеля из стали 18ХГТ с последующей цементацией может быть заменен на лазерную закалку распределительного вала из стали 55 прямоугольным лучом полупроводникового лазера. При этом значительно снижается энергоемкость и повышается экологическая чистота производственного процесса.

Ключевые слова: Лазерное упрочнение, микротвердость, микроструктура, коэффициент трения, интенсивность изнашивания, износстойкость.

Введение

Энергоэффективность тепловозов определяется продолжительностью и надежностью их работы. Износстойкость деталей дизеля влияет на его долговечность. В настоящее время распределительные валы дизелей изготавливаются из стали 18ХГТ с последующей их цементацией. Однако ресурс работы этих валов

недостаточен, а технологический процесс цементации энергоемкий. В современном машиностроении находят применение новые технологические процессы лазерного упрочнения сталей, которые повышают долговечность работы изделий по сравнению с традиционными методами обработки. Наиболее часто применяемыми лазерами в промышленном производстве являются CO₂, Nd: YAG, волоконные лазеры и диодные лазеры [1, 2]. Новые достижения в области методов лазерного упрочнения позволили получить практические результаты и открыли путь к новым технологическим применением [3–7]. Широкое использование лазерной обработки поверхностей основано на преимуществах, которые они имеют по сравнению с традиционными технологиями [8–11]. Наряду с высокими достижениями упрочнение лазером стали 40Х [12] позволило получить твердость модифицированных зон 2980–3550 МПа, что не является верхним пределом по твердости этой стали при лазерной закалке. Разработано значительное количество экспериментальных [13–15] и аналитических моделей для их применения при лазерном упрочнении.

Материалы и методы исследования

Для выполнения экспериментальных исследований по лазерному термоупрочнению образцов стали 55 с размерами 16 × 20 × 80 мм был использован автоматизированный технологический комплекс, содержащий полупроводниковый технологический лазер PLD-6, изготовленный в ООО «НПП “ИНЖЕКТ”» с мощностью излучения 6 кВт. Лазерная закалка была проведена при скорости сканирования луча 5 мм/с, пятном с размерами 20 × 4 мм. Мощность излучения при обработке первой партии образцов (1) составила 3,6 кВт, а для второй партии — 2,4 кВт (2).

Определение металлографических свойств зон лазерного упрочнения выполнено с использованием:

- оптической системы МС-1000;
- цифрового микроскопа АМ-419;
- микротвердомера ПМТ-3 с цифровой камерой МС-8,3С при нагрузке 0,98 Н.

В качестве эталона выбран образец стали 18ХГ, прошедший цементацию и закалку, с твердостью 56–59 HRC и глубиной цементованного слоя 1,4–1,5 мм, выполненного по стандартной технологии.

Триботехнические испытания были проведены на машине трения (рис. 1), содержащей станину 1 с размещенным на ней подвижным столом 2, на котором установлен датчик усилия нагружения 3 с закрепленным на нем предметным столиком 4, выполненным в виде двух дисков 5 и 6, разделенных стальным шариком и соединенных тремя винтами 7, оснащенными пружинами 8 для самоустановки образца, с размещенным на нем теплообменным устройством 9, оснащенным

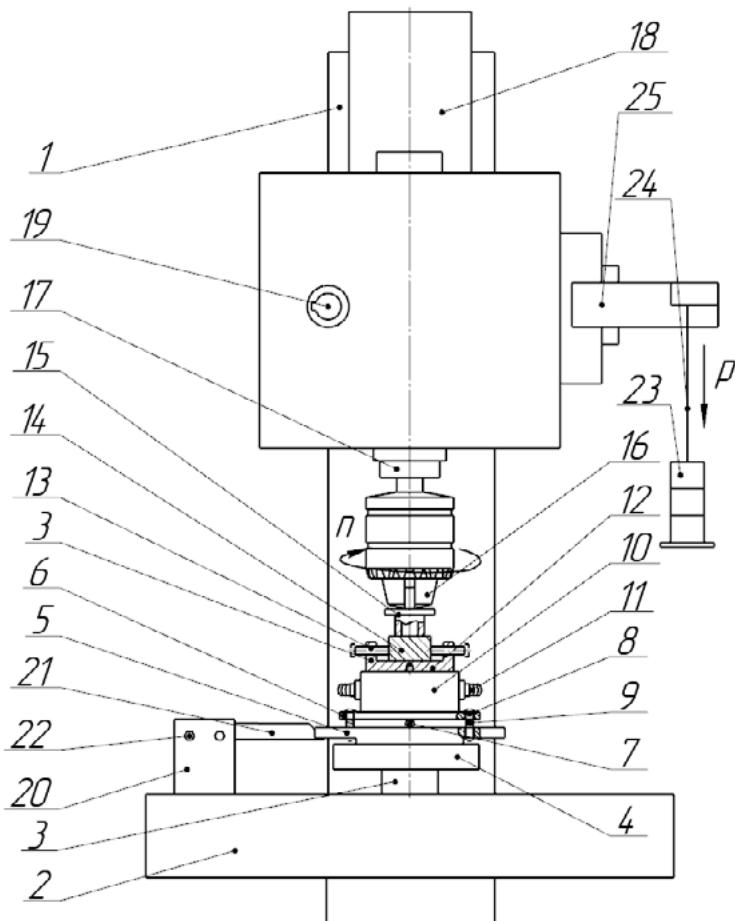


Рис. 1. Схема машины трения

штуцерами 10 для прокачки воды, ложементом 10 с размещенными симметрично относительно его оси шестью винтами 11 для крепления образца 12, на котором установлен контробразец 13, выполненный в виде кольцевой оправки, торец которой опирается на образец, а противоположный ее конец своим цилиндрическим хвостовиком закреплен в трехкулачковом патроне 14, установленном в шпинделе 15, вращение которого осуществляется с помощью электродвигателя постоянного тока 16 через редуктор (на схеме не показан). Изменение частоты вращения шпинделя производится рукояткой 17. Для измерения момента трения на опоре 18, жестко прикрепленной к столу 2, закреплена тензобалка 19 винтами 20, свободный конец которой входит в паз нижнего диска 5 предметного столика 4. Усилие нагружения P передается с помощью грузов 21, размещенных на шпильке 22, закрепленной на рычаге 23, через который с помощью зубчатой передачи «шестерня-рейка» (на схеме не показаны) — на шпиндель 15, трехкулачковый патрон 14, контробразец 13 и образец 12. Сигналы с тензометрических датчиков момента трения и усилия нагружения поступали на входы дифференциального усилителя ZETLAB ZET 410. Преобразование усиленного сигнала выполнялось 16-битным аналого-цифровым устройством (АЦП) ZETLAB ZET 210 в дифференциальном включении. Графики изменения моментов трения и усилия прижима

в реальном времени наблюдали на экране дисплея персонального компьютера. Также на машине установлен бесконтактный индуктивный датчик частоты вращения шпинделя с выводом на тахометр, закрепленный на верхней крышке установки (на схеме не показан).

Для смазки в зону трения подавалось масло 10W40 капельным способом — по одной капле в секунду. Интенсивность изнашивания определяли как среднюю арифметическую величину по результатам испытаний трех образцов.

Расчет величины интенсивности изнашивания J производили по формуле [16]:

$$J = \frac{\Delta h}{L}, \quad (1)$$

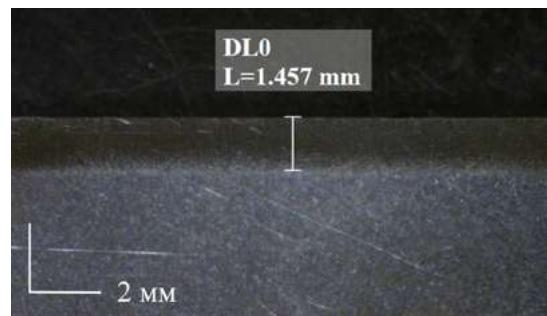
где Δh — линейный износ [17], мкм;

L — путь трения, мкм.

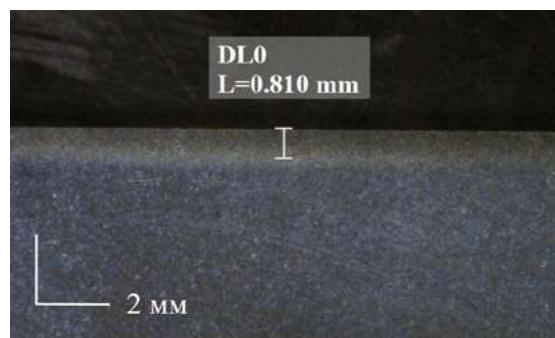
Результаты экспериментальных исследований

На рис. 2 показаны микрошлифы образцов стали 55, термоупрочненные при скорости перемещения луча 5 мм/с, мощности излучения 3,6 кВт (рис. 2, *a*) — образец партии 1 и 2,4 кВт (рис. 2, *b*) — образец партии 2.

Микроструктуры зон лазерного упрочнения, содержащие в основном мартенсит с различными размерами игл при увеличении в 1000 крат, представлены на рис. 3, *a* и *b*.



a



b

Рис. 2 Микрошлифы зон лазерного термоупрочнения стали 55:
a — 3,6 кВт; *b* — 2,4 кВт

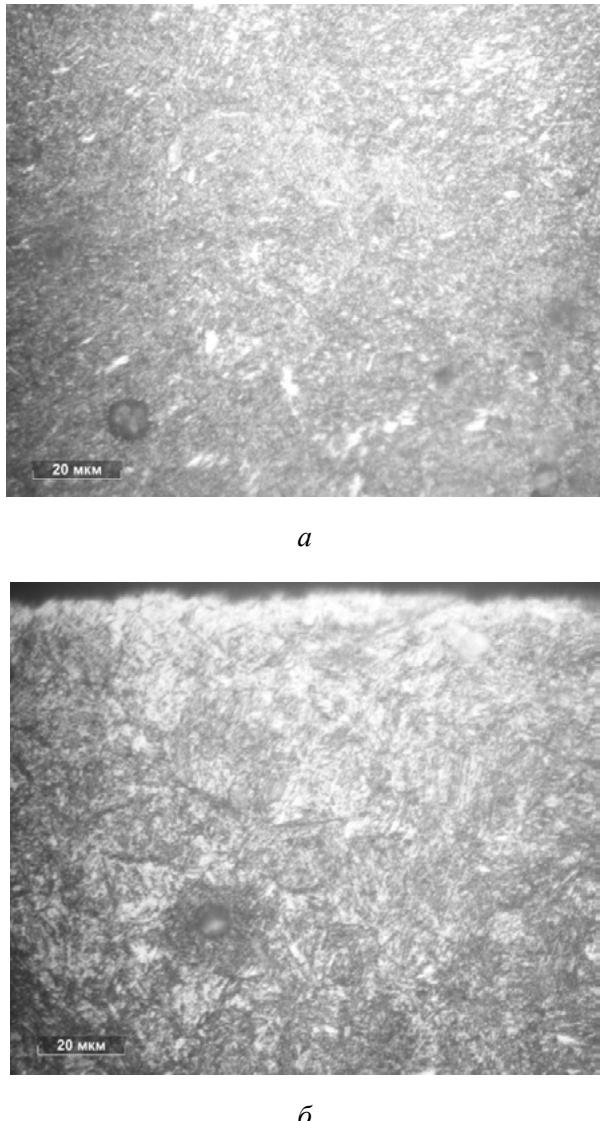


Рис. 3. Микроструктуры термоупрочненных лазерным лучом зон стали 55:
а — образец партии 1; б — образец партии 2

Микроструктуры образцов партий 1 и 2 соответствовали баллам зерна маргентсита № 2 и № 3 соответственно. Микротвердость первой зоны закалки образцов партии 1 составила 7470–10 980 МПа, за ней следовала зона неполной закалки 5380–6470 МПа и далее зона основного металла 2220–2460 МПа. Микротвердость первой зоны закалки образцов партии 2 составила 5180–7580 МПа, за ней следовала зона неполной закалки 2590–3350 HV_{0,1} и далее зона основного металла 2050–2140 МПа.

На рис. 4 представлен график зависимости удельной нагрузки заедания от скорости скольжения упрочненных лазером образцов в паре с контробразцом из стали 45. Из графика видно, что образцы партии 1 имели большую стойкость к заеданию в 1,5–1,6 раза, чем цементированные образцы. Образцы партии 2 по задиростойкости занимали промежуточное положение по этому показателю.

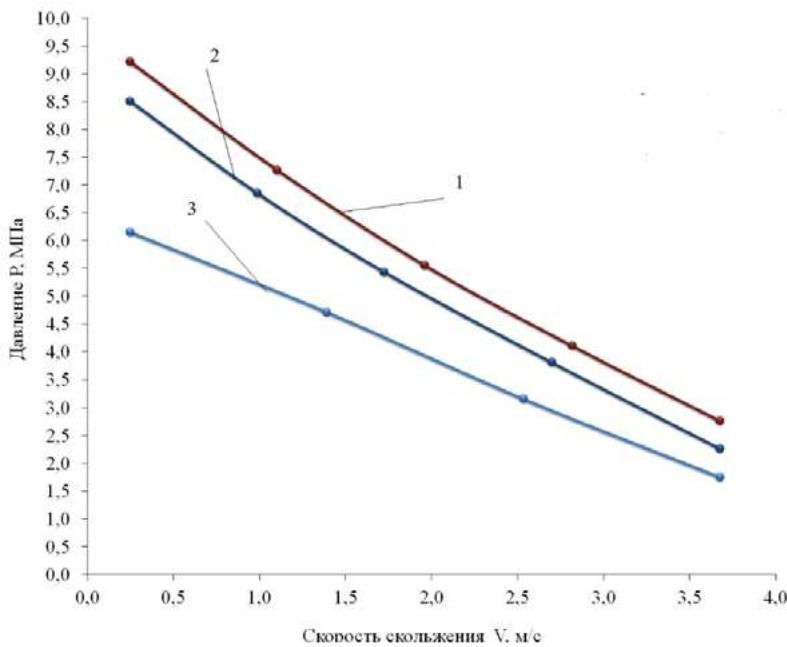


Рис. 4. Зависимость давления заедания от скорости скольжения:
1 — образцы партии 1; 2 — образцы партии 2;
3 — цементованные образцы стали 18ХГТ

На рис. 5 представлены зависимости коэффициентов трения от скорости скольжения стальных контробразцов. Анализ результатов испытаний показал, что минимальными коэффициентами трения обладали образцы партии 1, за ними по возрастанию коэффициентов трения следовали образцы партии 2 и цементованные образцы.

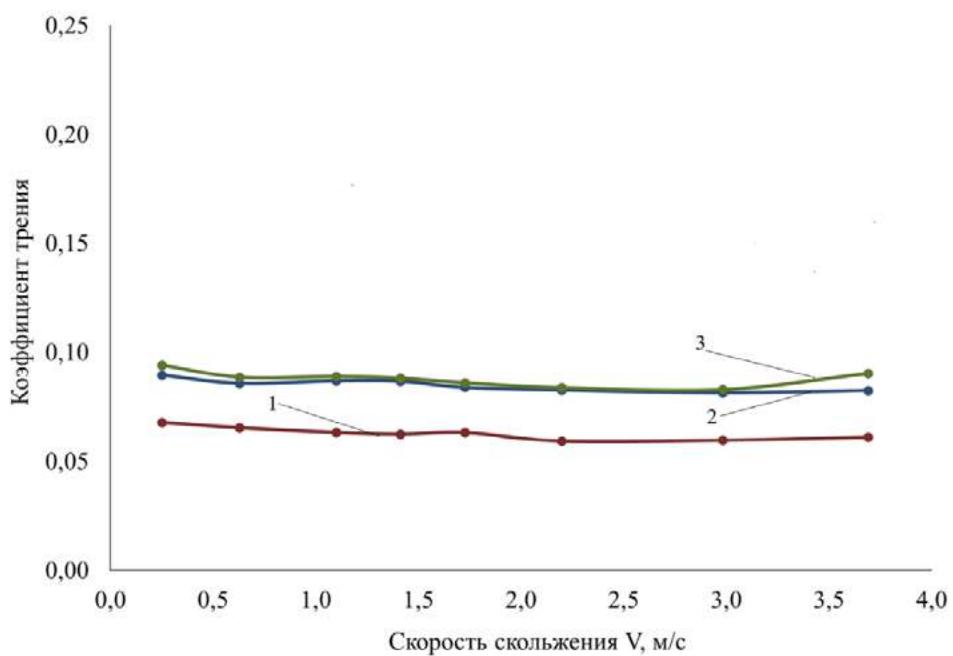


Рис. 5. Зависимость коэффициентов трения от скорости скольжения:
1 — образцы партии 1; 2 — образцы партии 2; 3 — цементованные образцы стали 18ХГТ

В таблице приведены результаты испытаний по определению интенсивности изнашивания образцов партий 1 и 2, цементованных образцов стали 18ХГТ и контробразцов из стали 45. Наименьшая средняя интенсивность изнашивания $1,38 \cdot 10^{-8}$ наблюдалась у образцов партии 1, что в 2 и 2,65 раза меньше, чем у цементированных образцов и образцов партии 2 соответственно. Средняя интенсивность изнашивания контробразцов при трении по образцам из группы 1 составляла $2,69 \cdot 10^{-8}$ и имела минимальное значение по сравнению с контробразцами, испытанными в паре с цементованными образцами и образцами партии 2.

Результаты испытаний по определению интенсивности изнашивания образцов партий 1 и 2, цементованных образцов стали 18ХГТ и контробразцов из стали 45

№ п/п	№ образца	Материал контр- образца	Смазка	Нагрузка, P , МПа	Интенсивность изнашивания образца		Интенсивность изнашивания контробразца	
					$I_1 \cdot 10^{-9}$	$I_{1cp} \cdot 10^{-9}$	$I_2 \cdot 10^{-9}$	$I_{2cp} \cdot 10^{-9}$
1	1.1	Сталь 45 (49–54 HRC)	10W-40	0,82	0,91	1,38	2,17	2,69
2	1.2				1,43		2,53	
3	1.3				1,80		3,39	
4	2.1				3,87	3,66	2,44	4,08
5	2.2				3,47		4,93	
6	2.3				3,66		4,89	
7	3.1				2,60	2,77	9,06	8,78
8	3.2				3,30		7,44	
9	3.3				2,43		9,86	

Заключение

Разработан новый технологический процесс лазерного упрочнения прямоугольным лучом полупроводникового лазера стали 55 с глубиной закаленного слоя 0,8–1,5 мм. При оптимальных режимах лазерного упрочнения получен мелкодисперсный мартенсит; микроструктура соответствовала баллу зерна № 2. Давление заедания у образцов партии 1 было в 1,5–1,6 раза выше, а износостойкость — в 2 раза выше, чем у образцов стали 18ХГТ после цементации; средние коэффициенты трения при этом оказались значительно ниже. По результатам экспериментальных исследований установлено, что технологический процесс изготовления распределительного вала дизеля из стали 18ХГТ с последующей цементацией может быть заменен на лазерную закалку распределительного вала дизеля тепловоза из стали 55 прямоугольным лучом полупроводникового лазера. При этом значительно снижается энергоемкость и повышается экологическая чистота производственного процесса.

Работа выполнена за счет средств государственного задания. Код (шифр) научной темы, присвоенный учредителем: FFGU-2024-0023.

Список источников

1. Guarino S. High Power Diode Laser (HPDL) surface hardening of low carbon steel: Fatigue life improvement analysis / S. Guarino, M. Barletta, A. Afilal // Journal of Manufacturing Processes. — 2017, — Vol. 28. — Pp. 266–271.
2. Nemova G. Brief Review of Recent Developments in Fiber Lasers // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14. — P. 2323.
3. Kennedy E. A review of the use of high-power diode lasers in surface hardening / E. Kennedy, G. Byrne, D.N. Collins // Journal of Materials Processing Technology. — 2004. — Vol. 155–156. — Pp. 1855–1860.
4. Tan C. Y. Influence of laser parameters on microstructures and surface properties in laser surface modification of biomedical magnesium alloys / C. Y. Tan, C. Wen, H. Q. Ang // Journal of Magnesium and Alloys. — 2024. — Vol. 12. — Pp. 72–97.
5. Tan S. Progress and prospects in laser additive manufacturing of key materials for aircraft engines / S. Tan, F. Weng, S. Sui, Y. Chew et al. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2021. — Vol. 170. — P. 103804.
6. Homberg D. PID control of laser surface hardening of steel / D. Homberg, W. Weiss // IEEE Transactions on Control Systems Technology. — 2006. — Vol. 14. — Pp. 896–904.
7. Lasota I. Laser surface hardening of engine camshaft cams / I. Lasota, V. Protsenko, A. Matyushkin, M. Kuznetsov et al. // Materials Today: Proceedings. — 2020. — Vol. 30. — Pp. 478–482.
8. Patwa R. Predictive modeling of laser hardening of AISI5150H steels / Patwa R., Shin Y. C. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2007, — Vol. 47. — Pp. 307–320.
9. Maharjan N. Comparative study of laser surface hardening of 50CrMo4 steel using continuous-wave laser and pulsed lasers with ms, ns, ps and fs pulse duration / N. Maharjan, W. Zhou, Y. Zhou, Y. Guan et al. // Surface and Coatings Technology. — 2019 — Vol. 366. — Pp. 311–320.
10. Maharjan N. Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere / N. Maharjan, W. Zhou, N. Wu // Surface and Coatings Technology. — 2020. — Vol. 385. — P. 125399.
11. Frerichs F. Process signature for laser hardening / F. Frerichs, Y. Lu, T. Lübben, T. Radel // Metals. — 2021. — Vol. 11. — P. 465.
12. Naprimerova E. D. Impact of laser hardening on surface properties of billets from structural materials / E. D. Naprimerova, K. Yu. Pashkeev, E. V. Yurasova, K. S. Litvinyuk et al. // Metallurgist. — 2024. — Iss. 11. — Pp. 89–93.
13. Patwa R. Predictive modeling of laser hardening of AISI5150H steels / R. Patwa, Y. C. Shin // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2007. — Vol. 47. — Pp. 307–320.
14. Zhang B. Applications of laser surface treatment in gears: a review / B. Zhang, L. Sun, N. Zhao, J. Li // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2024. — Vol. 34. — Pp. 1–35.

15. Komanduri R. Thermal analysis of the laser surface transformation hardening process / R. Komanduri, Z. Hou // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2001. — Vol. 44. — Pp. 2845–2862.

16. Куксенова Л. И. Методы испытаний на трение и износ: монография / Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева, А. Г. Колмаков, Л. М. Рыбакова — М.: Интермет Инжиниринг, 2001. — 152 с.

17. Патент № 2683600 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Способ измерения износа металлических материалов и покрытий / В. П. Бирюков, Э. Г. Гудушаури, А. А. Фишков. — Заявл. 23.05.2018; опубл. 29.03.2019. — Бюл. № 10.

Дата поступления: 15.06.2025

Решение о публикации: 28.07.2025

Контактная информация:

БИРЮКОВ Владимир Павлович — канд. техн. наук; laser-52@yandex.ru

МИРЯХА Андрей Николаевич — начальник группы; miryahaan@yandex.ru

ЯКУБОВСКИЙ Антон Алексеевич — аспирант; anton.at444@gmail.com

ГОРЮНОВ Ярослав Алексеевич — аспирант; yarosgorun22112000@gmail.com

КУЛАКОВ Олег Игоревич — аспирант; kulakov@imash.ru

The Influence of Laser Hardening on the Metallographic and Tribotechnical Properties of Class 55 Steel Used in Diesel Locomotive Camshafts

V. P. Biryukov¹, A. N. Miryakha², A. A. Yakubovsky¹, Ya. A. Goryunov¹, O. I. Kulakov¹

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4, M. Kharitonovskiy per., Moscow, 101990, Russian Federation

²INJECT RME LLC, 3A, off. 1, Elmashevskaya str., Saratov, 410033, Russian Federation

For citation: Biryukov V. P., Miryakha A. N., Yakubovsky A. A., Goryunov Ya. A., Kulakov O. I. The Influence of Laser Hardening on the Metallographic and Tribotechnical Properties of Class 55 Steel Used in Diesel Locomotive Camshafts. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 167–177. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-167-177

Summary

Purpose: This research investigates the effect of semiconductor laser processing parameters, specifically with a rectangular spot, on the hardening depth, microhardness, microstructure, and tribotechnical properties of Class 55 steel. These properties were evaluated under conditions of friction against hardened Class 45 steel, utilizing a drip oil lubrication system. **Methods:** Laser thermal hardening of the friction surface of Class 55 steel samples was performed using a semiconductor laser with a rectangular spot. Metallographic analysis of the laser-hardened zones was conducted using an MS1000 optical system, an AM419 digital microscope, and a PMT-3 microhardness tester. The microhardness measurements were performed with a load of 0.98 N and recorded using an MS-8.3 S digital camera. The reference sample selected for this study was Class 18XG steel after undergoing carburizing treatment, which demonstrated a hardness level of 56–59 HRC. Tribotechnical tests were carried out according to the scheme that included a flat rectangular block of Class 55 steel and a

ring-shaped counter-plate composed of steel 45, both of which were in the spindle chuck of a friction-testing machine. Continuous measurements of the friction moments and the applied load on the samples were obtained using strain gauges, with the data being displayed on a computer screen in real time. Furthermore, a non-contact inductive sensor was installed on the friction machine to measure the spindle rotational frequency, with the output directed to a tachometer affixed to the top cover of the machine. **Results:** The study have shown that following laser hardening, the microstructure of the hardened zones contains fine-disperse martensite needles. The hardness within these zones varies from 7470 to 10,980 MPa. The adhesive wear pressure at different sliding speeds of the 45 steel counter-plate is 1.5-1.6 times greater, and the wear resistance is twice as high compared to the samples of 18XGT after carburizing. Concurrently, the friction coefficients are significantly lower. **Practical significance:** The technological process for manufacturing a diesel camshaft made of 18XGT steel with subsequent carburizing can be replaced by laser hardening of the camshaft made from Class 55 steel using a semiconductor laser with a rectangular beam. This alternative approach significantly reduces energy consumption and enhances the ecological sustainability of the production process.

Keywords: Laser hardening, microhardness, microstructure, coefficient of friction, wear rate, wear resistance.

References

1. Guarino S., Barletta M., Afilal A. High Power Diode Laser (HPDL) surface hardening of low carbon steel: Fatigue life improvement analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 28, pp. 266–271.
2. Nemova G. Brief Review of Recent Developments in Fiber Lasers. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, p. 2323.
3. Kennedy E., Byrne G., Collins D. N. A review of the use of high-power diode lasers in surface hardening. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 155–156, pp. 1855–1860.
4. Tan C. Y., Wen C., Ang H. Q. Influence of laser parameters on microstructures and surface properties in laser surface modification of biomedical magnesium alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2024, vol. 12, pp. 72–97.
5. Tan S., Weng F., Sui S., Chew Y. et al. Progress and prospects in laser additive manufacturing of key materials for aircraft engines. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, vol. 170, p. 103804.
6. Homberg D., Weiss W. PID control of laser surface hardening of steel. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, vol. 14, pp. 896–904.
7. Lasota I., Protsenko V., Matyushkin A., Kuznetsov M. et al. Laser surface hardening of engine camshaft cams. *Materials Today: Proceedings*. 2020, vol. 30, pp. 478–482.
8. Patwa R., Shin Y. C. Predictive modeling of laser hardening of AISI150H steels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, pp. 307–320.
9. Maharjan N., Zhou W., Zhou Y., Guan Y. et al. Comparative study of laser surface hardening of 50CrMo4 steel using continuous-wave laser and pulsed lasers with ms, ns, ps and fs pulse duration. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 366, pp. 311–320.
10. Maharjan N., Zhou W., Wu N. Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 385, p. 125399.

11. Frerichs F., Lu Y., Lübben T., Radel T. Process signature for laser hardening. *Metals*, 2021, vol. 11, p. 465.
12. Naprimerova E. D., Pashkeev K. Yu., Yurasova E. V., Litvinyuk K. S. et al. Impact of laser hardening on surface properties of billets from structural materials. *Metallurgist*, 2024, Iss. 11, pp. 89–93.
13. Patwa R., Shin Y. C. Predictive modeling of laser hardening of AISI5150H steels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, pp. 307–320.
14. Zhang B., Sun L., Zhao N., Li J. Applications of laser surface treatment in gears: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, vol. 34, pp. 1–35.
15. Komanduri R., Hou Z. Thermal analysis of the laser surface transformation hardening process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, vol. 44, pp. 2845–2862.
16. Kuksanova L. I., Lapteva V. G., Kolmakov A. G., Rybakova L. M. *Metody ispytaniy na trenie i iznos: monografiya* [Friction and Wear Test Methods: monograph]. Moscow: Intermet Inzhiniring Publ., 2001, 152 p. (In Russian)
17. Biryukov V. P., Gudushauri E. G., Fishkov A. A. *Sposob izmereniya iznosa metallicheskikh materialov i pokrytiy* [Method for Measuring Wear of Metallic Materials and Coatings]. Patent RF, no. 2683600, 2019. (In Russian)

Received: June 15, 2025

Accepted: July 28, 2025

Author's information:

Vladimir P. BIRYUKOV — PhD in Engineering; laser-52@yandex.ru

Andrey N. MIRYAKHA — Head of Department; miryahaan@yandex.ru

Anton A. YAKUBOVSKY — Postgraduate Student; anton.at444@gmail.com

Yaroslav A. GORYUNOV — Postgraduate Student; yarosgorun22112000@gmail.com

Oleg I. KULAKOV — Postgraduate Student; kulakov@imash.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

УДК 331.1

Рациональные решения по вопросам организации контейнерных перевозок

М. Ю. Агеев¹, Л. М. Чеченова^{1,2}

¹Транспортная группа «ДелЭкспресс», Российская Федерация, 196006, Санкт-Петербург, Заставская ул., 22, корп. 2, лит. А

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

Для цитирования: Агеев М. Ю., Чеченова Л. М. Рациональные решения по вопросам организации контейнерных перевозок // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 178–192. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-178-192

Аннотация

Цель: Оценить целесообразность организации перевозок контейнерных грузов с использованием фитинговых платформ в железнодорожной логистике. Определить порядок оказания транспортно-экспедиционных услуг. Классифицировать особенности регулирования транспортно-экспедиционной деятельности по видам транспортных средств. **Методы:** Проведен сравнительный анализ стоимости перевозок контейнерных грузов и затрат времени на транспортировку по ключевым маршрутам. Анализ выполнен с учетом нормативных регламентов, регулирующих железнодорожные перевозки, а также бизнес-процессов организации, предоставляющей услуги транспортной экспедиции. **Результаты:** Охарактеризован объект исследования с учетом его позиции в сегменте рынка транспортно-экспедиционных услуг. Выделены бизнес-процессы компаний-экспедиторов и предложено решение по исключению ряда дублирующих функций. Данна сравнительная оценка себестоимости контейнерного состава оператора и экспедитора, позволяющая обосновать интеграцию фитинговых платформ в существующую логистику перевозок. Рассчитан экономический эффект как разница между себестоимостью контейнерного состава оператора и экспедитора. **Практическая значимость:** Полученные результаты настоящего исследования могут быть внедрены в бизнес-процессы компаний-экспедиторов, что позволит расширить долю рынка в условиях текущей нестабильности, оптимизировать расходы на перевозку, оперативно реагировать на изменения логистики перевозок.

Ключевые слова: Перевозка контейнерных грузов, фитинговые платформы, железнодорожная логистика, транспортная экспедиция, экономическая оценка.

Введение

В последние десятилетия контейнерные перевозки развиваются ускоренными темпами. Только за период с 2021 по 2024 г. объем перевозок внутрироссийских контейнерных грузов показал абсолютный прирост с 43,9 до 73,2 млн т — или в 1,7 раза. По итогам 2024 г. по сети железных дорог России во всех видах

сообщения перевезли 7 млн 880 тыс. груженых и порожних контейнеров, что на 5,9 % больше, чем в 2023 г., за счет увеличения объемов перевозок химической продукции, бумаги, строительных грузов, минеральных удобрений, нефти и нефтепродуктов, зерна, рыбы, картофеля.

Вместе с тем объемы перевозок в контейнерах показали отрицательную динамику по таким номенклатурным позициям, как древесина, промтовары, черные и цветные металлы, автомобили и комплектующие к ним, цветная руда и серное сырье.

В настоящий момент КНР является ключевым торговым партнером России с сохранением высокого уровня объемов контейнерных перевозок на восточном направлении, что определяет модернизацию приграничной инфраструктуры. В сообщении с Китаем увеличиваются объемы перевозок товаров с поддержанием температурного режима. Так, в рефрижераторных контейнерах доставляются фрукты, овощи, замороженное мясо, рыба, электроника, лакокрасочные изделия и пр.

Следует отметить проблемы в организации контейнерных перевозок с КНР. Так, ужесточение требований ОАО «РЖД» к креплению грузов оказало негативное воздействие на скорость и ритмичность работы дальневосточных терминалов: возросли задержки железнодорожных перевозок и, соответственно, увеличилось транзитное время. Этому способствовал дисбаланс импортных и экспортных грузопотоков.

Со стороны КНР увеличению объемов железнодорожных контейнерных перевозок способствует политика Китайских железных дорог по распределению ниток графика движения для ускоренных контейнерных поездов. Кроме того, из-за резкого сокращения грузопотока из КНР в направлении европейских государств по железной дороге через Казахстан значительно возросла квота на поезда в направлении Белоруссии и субъектов РФ.

Таким образом, актуальность темы обусловлена ускоренным развитием внутрироссийских контейнерных перевозок в условиях сокращения транзитных перевозок в направлении Европы и возрастающей роли контейнерных перевозок для экономики страны в восточном направлении.

Материалы и методы исследования

Цель настоящего исследования — проанализировать целесообразность организации перевозок контейнерных грузов с использованием фитинговых платформ в железнодорожной логистике.

Предмет исследования — прикладные аспекты организации бизнес-процессов транспортно-экспедиторской компании в сегменте контейнерных перевозок, в том числе в международном сообщении. В рамках предмета исследования предусмотрено:

- определение стоимости перевозок по ключевым маршрутам;
- расчет затрат времени на транспортировку по ключевым маршрутам.

Кроме того, исследование включает анализ нормативно-правовой базы, регулирующей транспортно-экспедиционную деятельность в Российской Федерации (рис. 1).

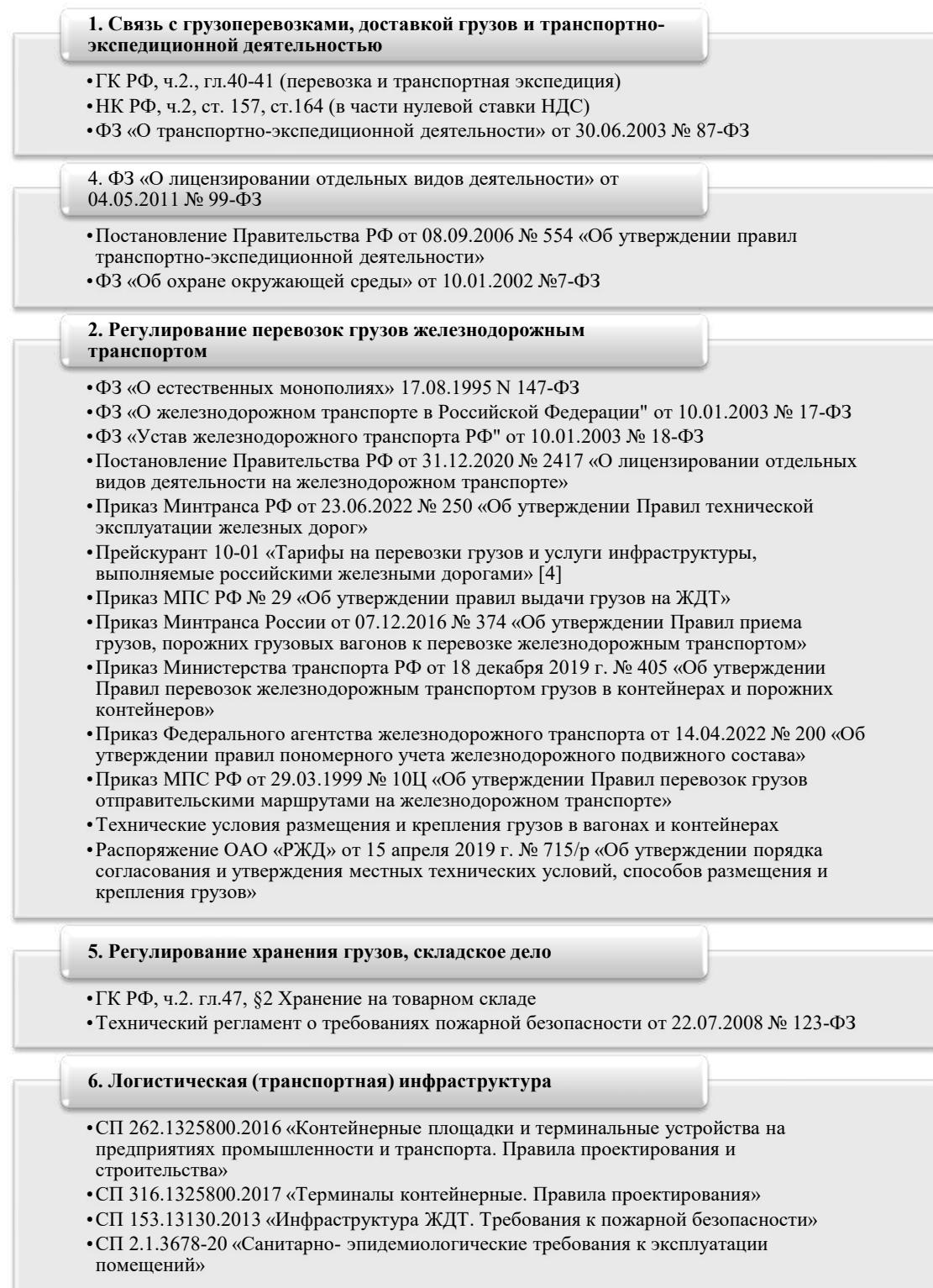


Рис. 1. Классификация нормативно-правовой базы, регулирующей транспортно-экспедиционную деятельность в РФ (составлено авторами по данным [1–9])

Методической основой исследования являются бизнес-процессы транспортно-экспедиторской организации в сегменте перевозок грузов в контейнерах, в том числе в международном сообщении, с возможностью определения стоимости перевозок и затрат времени по ключевым маршрутам в результате интеграции фитинговых платформ в логистику перевозок.

Объект исследования — транспортная компания «ДелЭкспресс» — международная транспортно-логистическая компания. По данным на 2025 год, она имеет филиалы в следующих городах: Москва, Новосибирск, Находка и Нинбо [10].

За годы работы компания зарекомендовала себя как надежный контрагент, предоставляя широкий спектр транспортных услуг (рис. 2).

За период с 2022 по 2024 г. ТК «ДелЭкспресс» демонстрирует стабильный рост показателей:

- объем перевозок и выручка увеличились на 84,3 %;
- валовая прибыль выросла в 5 раз;
- себестоимость возросла на 75 %;
- чистая прибыль увеличилась в 5,5 раза (рис. 3).



Рис. 2. Перечень оказываемых ООО «ДелЭкспресс» услуг
(составлено авторами по данным [10])

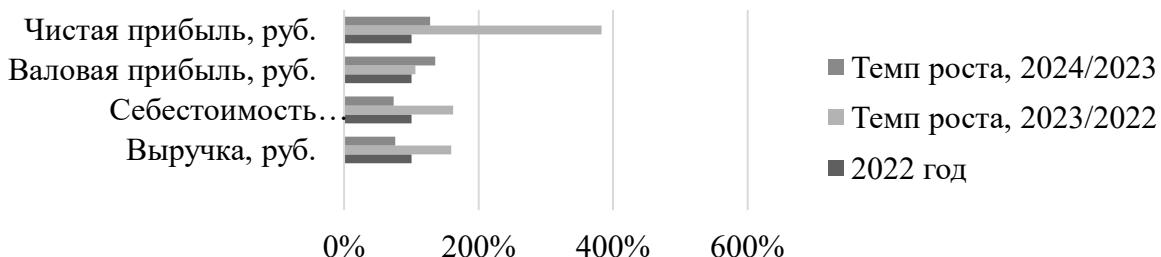


Рис 3. Динамика темпов роста основных финансовых показателей деятельности
(составлено авторами по данным [11])

Результаты исследования

1. Охарактеризован объект исследования с учетом занимаемой позиции в сегменте рынка транспортно-экспедиционных услуг.

Основными конкурентами ТК «ДелЭкспресс» в сегменте оказания транспортно-экспедиционных услуг являются ТК «SOTA Logistic», «ВЛ Лоджистик», «Логистические решения», «iDeaLog», «ТЛЦ», контейнерный оператор «Тетра Транс» (рис. 4).

Каждый из конкурентов имеет свои сильные и слабые стороны, а также наработанную годами клиентскую базу. При этом:

– «Тетра Транс» (доля рынка — 31 %) — один из крупнейших собственников контейнеров. Компания активно инвестирует в развитие бизнеса: закупает фитинговые платформы, автотранспортные средства и контейнеры.

– «ТЛЦ» (доля рынка — 26 %) обладает важным конкурентным преимуществом — возможностью формировать собственные контейнерные поезда. Это позволяет:

- а) не зависеть от решений железнодорожных операторов;
- б) расширять клиентскую базу;
- в) избегать дополнительных ограничений при планировании перевозок.

Основными конкурентными преимуществами транспортной компании «ДелЭкспресс» являются:

- финансовая стабильность компании за весь период ее существования;
- наличие полиса страхования ответственности экспедитора с агрегатным лимитом до 1 млн долл. США;
- статус надежного контрагента;
- наличие собственного парка автотранспортных средств и контейнеров (рис. 5);
- клиентоориентированная система электронного документооборота [12].

При этом отсутствие фитинговых платформ существенно ограничивает возможности компании на рынке.

За 2024 г. ТК «ДелЭкспресс» отправлено свыше 10 тыс. контейнеров из России в Китай, 5 тыс. из Китая в Россию. Основными локациями в Китае являются ключевые морские порты: Шанхай, Нингбо, Ченду, Нанша. По внутрироссийским перевозкам основными городами отправления являются Санкт-Петербург и Москва, основными направлениями — Новосибирск, Екатеринбург, Иркутск, Красноярск, Хабаровск и Владивосток (рис. 6).

2. Выделены бизнес-процессы компаний-экспедиторов с предложением решения по исключению ряда дублирующих функций.

Нами исследованы основные бизнес-процессы компаний-экспедиторов, систематизация которых представлена в табл. 1.

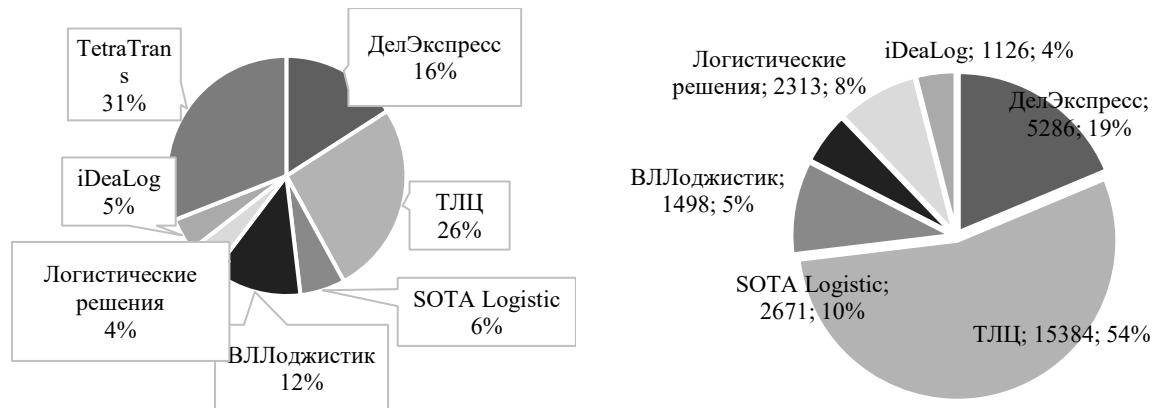


Рис. 4. Доля рынка в зависимости от объемов перевозок грузов за 2024 г.:
1 — в целом, %; 2 — в контейнерах (в единицах TEU), % (составлено авторами по данным [11])

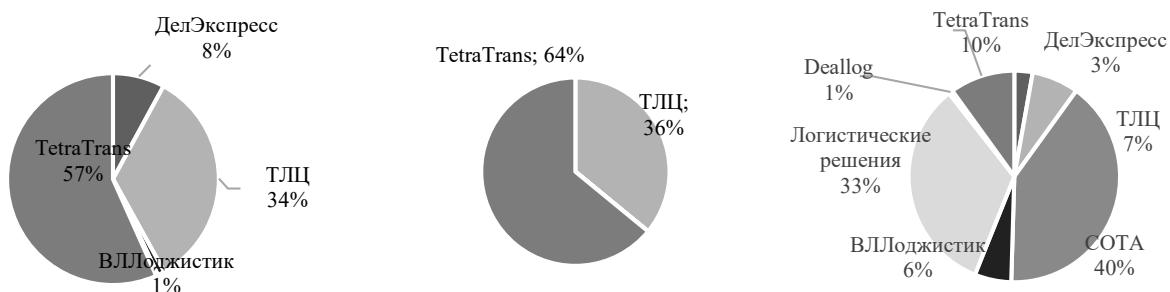


Рис. 5. Структура имущества в собственности
(составлено авторами по данным компаний), %:
1 — контейнерный парк; 2 — фитинговые платформы; 3 — автомобили
(составлено авторами по данным [10])

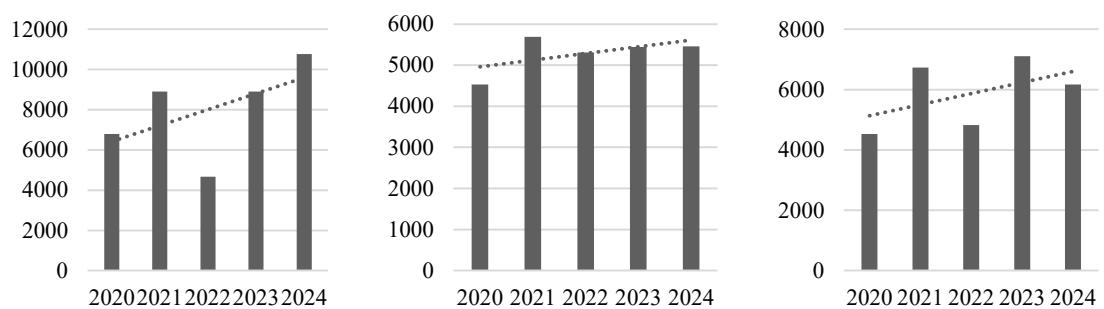


Рис. 6. Динамика перевозок грузов в контейнерах, TEU:
1 — экспорт; 2 — импорт; 3 — внутрироссийские перевозки
(составлено авторами по данным [10])

Настоящее исследование представляет интерес для компаний-экспедиторов, стремящихся к оптимизации бизнес-процессов в сфере логистики перевозок.

Ключевой проблемой компаний, осуществляющих перевозку грузов, является дублирование функций при документальном оформлении заявки на перевозку. Это неизбежно ведет к дополнительным расходам, связанным с ростом труда затрат и увеличением времени на обработку заявки.

ТАБЛИЦА 1. Бизнес-процессы компаний-экспедиторов

Основные бизнес-процессы	Характеристика основных бизнес-процессов	Вспомогательные бизнес-процессы
Прием и обработка заявок на перевозку	Сбор и анализ информации о грузе, маршруте, сроках доставки и других параметрах заявки. Определение стоимости перевозки и согласование условий с клиентом	Управление документооборотом, согласование условий с клиентами
Планирование маршрутов и графиков перевозок	Определение оптимальных маршрутов, расчет времени в пути, учет особенностей груза	Анализ данных о предыдущих перевозках, прогнозирование спроса
Подготовка транспортных средств	Проверка технического состояния, загрузка контейнеров, оформление документации	Техническое обслуживание, обеспечение безопасности
Осуществление перевозки	Контроль за соблюдением графика, обеспечение сохранности груза, соблюдение правил дорожного движения	Мониторинг состояния транспортных средств, связь с водителями
Разгрузка и доставка груза	Оформление документов, передача груза получателю	Организация погрузочно-разгрузочных работ, контроль качества доставки
Расчет стоимости услуг	Учет расходов на перевозку, оценка полученных результатов	Бухгалтерский учет, анализ расходов
Работа с претензиями и рекламациями	Рассмотрение жалоб клиентов, урегулирование конфликтов	Ведение базы данных претензий, взаимодействие с клиентами

В качестве одной из рекомендаций предлагается интеграция структурных подразделений, выполняющих типовые функции. Данное решение наглядно представлено на рис. 7.

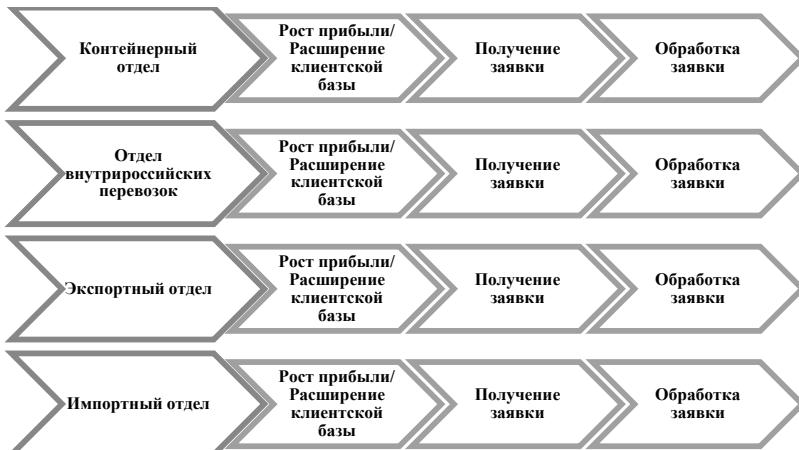
Схема текущих бизнес-процессов**Схема оптимизации**

Рис. 7. Решение по оптимизации бизнес-процессов в логистике перевозок
(составлено авторами)

Рекомендуемый порядок работы имеет ряд преимуществ:

- укрепление позиций на рынке за счет роста количества перевозок: исключение образования дохода в каждом функциональном подразделении и его консолидация позволит организовать единичный заказ в убыток компании, но при этом перевезет контейнер в более удачную локацию, что обеспечит прирост доходов, значительно превышающий образованный расход в расчете на 1 заказ;
- использование собственного контейнерного парка в интенсивном режиме, что обеспечит снижение расходов за счет исключения простоя контейнеров;
- активная кооперации структурных подразделений в фокусе единого целеполагания, исключающая конкуренцию в части образования доходов.

3. Дана сравнительная оценка себестоимости контейнерного состава оператора и экспедитора, позволяющая обосновать интеграцию фитинговых платформ в существующую логистику перевозок.

В состав тарифа на перевозку контейнерного груза по железной дороге входит перечень услуг по:

- оформлению товарно-транспортных и перевозочных документов, включая заявку на перевозку грузов по форме ГУ-12;
- подаче, уборке железнодорожных платформ;
- крановым операциям на терминале отправления;
- перевозке груза по сети железных дорог до станции назначения;
- предоставлению контейнера;
- обеспечению безопасности и сохранности груза.

Величина конечной стоимости перевозки контейнерного груза, а также прием и выдача контейнера напрямую зависят от двух факторов:

- наличия контейнеров в локации отправления;
- потребности в контейнерах в регионе назначения.

Это обусловлено преимущественным правом оператора управлять стоимостью перевозки контейнера. В частности, оператор может:

- существенно снизить свою долю в стоимости услуги;
- увеличить долю собственника контейнера;
- исключить прием сторонних контейнеров [13].

Имея в собственности подвижной состав, контейнеры и фитинговые платформы, компания имеет следующие преимущества:

- исключение зависимости от сторонних операторов;
- существенное снижение расходов на перевозку контейнеров;
- отсутствие необходимости согласования действий с третьими сторонами;
- гарантированное наличие подвижного состава;
- формирование уникального торгового предложения;
- оптимизация загрузки собственного парка контейнеров;
- оптимизация маршрутов и загрузки.

На примере ряда ключевых маршрутов перевозки грузов в контейнерах, сгруппированных в категории 1–5, апробировано решение интегрировать фитинговые платформы в существующую логистику перевозок:

- маршруты 1-й категории составлены для работы с приоритетными для компании регионами с возможностью оперативной корректировки объемов перевозок / контейнерных составов в зависимости от сезонности спроса и рыночной конъюнктуры;
- маршруты 1-й, 2-й и 5-й категорий имеют отличие от 1-го в части изменения ряда локаций отправки контейнерных составов;
- маршруты 3-й и 4-й категорий адресно разработаны под ключевых для компании клиентов — АО «Русал», ПАО «Сегежа Групп», что делает ее стратегически важной ввиду гарантированных долгосрочных контрактов, стабильного потока заявок и перспектив участия в крупных проектах компаний-клиентов.

В табл. 2, 3 представлен фрагмент сравнительной оценки себестоимости контейнерного состава оператора и экспедитора по маршруту 1 ТК «ДелЭкспресс» за 2024 г.

Полученный результат демонстрирует прирост годового дохода от регулярных отправок одного контейнерного поезда на 11 043 151 рубль. По перечню рассмотренных маршрутов ТК «ДелЭкспресс» имеет возможность корректировать объемы перевозок в зависимости от сезонности спроса и рыночной ситуации без ущерба для своих интересов.

4. Рассчитан экономический эффект как разница себестоимости контейнерного состава оператора и экспедитора.

Экономический эффект выражен в абсолютной разнице себестоимости контейнерного состава оператора и экспедитора. При расчете себестоимости контейнерного состава:

- за основу приняты данные, предоставленные ТК «ДелЭкспресс», за 2024 г. по оптимальным маршрутам с учетом загруженности путей сообщения и основным локациям — Красноярск и Иркутск, в том числе отправка через Москву (ключевые клиенты — АО «Русал», ПАО «Сегежа Групп»);
- учтены недостатки текущего процесса перевозок грузов в контейнерах, а именно: зависимость от поставщиков, невозможность отправить контейнер ввиду отсутствия соответствующей инфраструктуры, риск повышения цен на услуги, сдача в аренду собственного парка контейнеров без личного использования в процессе оказания услуг.

Расчет себестоимости контейнерного состава произведен с учетом оптимизации бизнес-процессов (результат 2 настоящего исследования) в соотнесении с маршрутами, описанными выше (результат 3 настоящего исследования) [14]. Полученные результаты сведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета себестоимости контейнерного состава оператора

Откуда	Куда	ЖД-перевозка, руб.	Фрахт, руб.	Срок доставки, сут.	Итого, руб.
Нингбо	Владивосток	0	166 000	15	166 000
Владивосток	СПб	290 000	0	30	290 000
СПб	Нингбо	0	215 800	45	215 800
Нингбо	Новороссийск	0	332 000	15	332 000
Новороссийск	Москва	79 460	0	30	79 460
Москва	Красноярск	1	0	30	1
Красноярск	Владивосток	120 000	0	15	120 000
Владивосток	Нингбо	0	62 250	15	62 250
Нингбо	Владивосток	0	166 000	15	166 000
Владивосток	СПб	290 000	0	30	290 000
СПб	Екатеринбург	93 500	0	15	93 500
Екатеринбург	Тяньцзинь	579 000	0	45	579 000
Тяньцзинь	СПб	509 892	0	45	509 892
СПб	Новосибирск	91 670	0	15	91 670
Итого		2 053 523	942 050	360	2 995 573
Итого за 1 контейнерный состав					185 725 526

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета себестоимости контейнерного состава экспедитора

Откуда	Куда	ЖД-пере- возка, руб.	Погрузочно- разгрузочные работы, руб.	Аренда, руб.	Фрахт, руб.	Срок доставки, сут.	Итого, руб.
Нингбо	Владивосток	0	0	0	66 400	15	66 400
Владивосток	СПб	168 930	16 000	37 500	0	30	222 430
СПб	Нингбо	0	0	0	249 000	45	249 000
Нингбо	Владивосток	0	0	0	66 400	15	66 400
Владивосток	Москва	164 197	16 000	37 500	0	30	217 697
Москва	Красноярск	128 727	16 000	37 500	0	30	182 227
Красноярск	Владивосток	124 680	13 333,33	15 625	0	15	153 638
Владивосток	Нингбо	0	0	0	62 250	15	62 250
Нингбо	Владивосток	0	0	0	66 400	15	66 400
Владивосток	СПб	168 930	16 000	37 500	0	30	222 430
СПб	Екатеринбург	85 000	16 000	18 750	0	15	119 750
Екатеринбург	Тяньцзинь	579 000	13 333,33	46 875	0	45	639 208
Тяньцзинь	СПб	306 440	16 000	56 250	0	45	378 690
СПб	Новосибирск	136 187	16 000	18 750	0	15	170 937
Итого за 1 контейнерный состав							174 682 375

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета экономического эффекта для компании-экспедитора в расчете на 1 контейнерный железнодорожный состав

Категория маршрутов	Себестоимость контейнерного состава, млн руб.		Экономический эффект, млн руб.
	оператора	экспедитора	
1	185	174	11
2	175	146	28
3	110	126	-16
4	152	120	31
5	160	145	14

Таким образом, совокупный экономический эффект от интеграции фитинговых платформ в логистику перевозок ТК «ДелЭкспресс» по данным за 2024 г. составил порядка 70 млн руб.

Заключение

Интеграция фитинговых платформ обеспечит снижение себестоимости услуги по перевозке груза в контейнерах, привлечение новых клиентов за счет более конкурентоспособных ставок тарифа, возможность формирования адресного коммерческого предложения, реализацию собственного контейнерного парка под свои нужды, гарантированное наличие подвижного состава.

Полученные результаты позволяют утверждать, что предложенное решение имеет практическую целесообразность и экономически обоснованно, является оптимальным для компаний-экспедиторов [15], ограниченных в мощностях, но при этом имеющих потенциал развития с учетом текущих рыночных тенденций и изменения маршрутов перевозок.

Список источников

1. Приказ Министерства транспорта РФ от 7 декабря 2016 г. № 374 «Об утверждении Правил приема грузов, порожних грузовых вагонов к перевозке железнодорожным транспортом». — URL: <https://base.garant.ru/71635664/> (дата обращения: 29.09.2025).
2. Приказ Министерства транспорта РФ от 23 июня 2022 г. № 250 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации». — URL: <https://base.garant.ru/405042985/> (дата обращения: 28.10.2025).
3. Постановление Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 2417 «О лицензировании отдельных видов деятельности на железнодорожном транспорте» (с изменениями и дополнениями). — URL: <https://base.garant.ru/400169332/> (дата обращения: 28.10.2025).
4. Постановление ФЭК РФ от 17 июня 2003 г. № 47-т/5 «Об утверждении Прейскуранта N 10-01 “Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами” (Тарифное руководство N 1, части 1 и 2)» (с изменениями и дополнениями). — URL: <https://base.garant.ru/12131790/> (дата обращения: 28.10.2025).

5. Приказ Минтранса РФ от 18 декабря 2019 г. № 405 «Об утверждении Правил перевозок железнодорожным транспортом грузов в контейнерах и порожних контейнеров». — URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73712588/> (дата обращения: 28.10.2025).

6. Федеральный закон от 30 июня 2003 г. № 87-ФЗ «О транспортно-экспедиционной деятельности». — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_43006/ (дата обращения: 28.10.2025).

7. Приказ Минтранса РФ от 11 февраля 2008 г. № 23 «Об утверждении Порядка оформления и форм экспедиторских документов». — URL: <https://base.garant.ru/12159320/> (дата обращения: 28.10.2025).

8. ГК РФ, Глава 41 «Транспортная Экспедиция». — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_9027/dfe46eb17d8b852987049332ca429b48b665b8a9/ (дата обращения: 28.10.2025).

9. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 52298—2004. Услуги транспортно-экспедиторские. Общие требования (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 декабря 2004 г. № 148-ст). — URL: https://rosgosts.ru/file/gost/03/080/gost_r_52298-2004.pdf (дата обращения: 28.10.2025).

10. Официальный сайт компании ТК «ДелЭкспресс». — URL: <https://delekspress-ooo.orgs.biz/> (дата обращения: 28.10.2025).

11. Данные бухгалтерской отчетности и финансового анализа ТК «ДелЭкспресс». — URL: https://www.audit-it.ru/buh_otchet/7805634210_ooo-delekspress/ (дата обращения: 28.10.2025).

12. Гулый И. М. Экономические последствия цифровизации железнодорожных контейнерных перевозок / И. М. Гулый // Экономические науки. — 2021. — № 200. — С. 57–61.

13. Гулый И. М. Перспективы развития перевозок грузов по маршрутам мультимодального международного транспортного коридора «Север — Юг» / И. М. Гулый // Экономика Центральной Азии. — 2022. — Т. 6. — № 4. — С. 341–354.

14. Волкова Е. В. Влияние логистических затрат на финансовые показатели работы компаний / Е. В. Волкова, А. В. Стримовская // Логистика и управление цепями поставок. — 2018. — № 5(88). — С. 53–61.

15. Журавлева Н. А. Трансформационное лидерство и устойчивое развитие российских транспортных систем / Н. А. Журавлева // Инновационные транспортные системы и технологии. — 2022. — Т. 8. — № 2. — С. 92–111.

Дата поступления: 21.06.2025

Решение о публикации: 08.08.2025

Контактная информация:

ЧЕЧЕНОВА Лиана Мухamedовна — д-р экон. наук, доц.; liana1981-149@mail.ru

АГЕЕВ Максим Юрьевич — экономист департамента экономики²; аспирант кафедры «Экономика транспорта»¹; maxim.ageev.19@yandex.ru

Efficient Solutions for Containerized Freight Transportation Management

M. Yu. Ageev¹, L. M. Chechenova²

¹Delexpress Transport Group, 22, bld. 2, lit. A, Zastavskaya str., Saint Petersburg, 196006, Russian Federation

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

For citation: Ageev M. Yu., Chechenova L. M. Efficient Solutions for Containerized Freight Transportation Management. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 178–192. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-178-192

Summary

Purpose: To substantiate the benefits of utilizing fitting platforms for container freight transportation within railway logistics; to consider the procedures involved in providing freight forwarding services; and to classify the regulatory specifics governing freight forwarding activities according to different vehicle types. **Methods:** A comparative analysis and assessment of the costs associated with transportation of containerized freight, the duration of transportation along major routes, and the relevant regulatory frameworks that oversee railway freight transportation, alongside the operational processes of organisations that offer comprehensive freight forwarding services. **Results:** The research object is characterized with respect to its position within the transport and forwarding services market segment. Business processes of freight forwarding companies have been systematized, and a solution has been proposed to eliminate a range of redundant functions. A comparative analysis of cost structures between the operator's and the forwarder's container fleets has been presented, thereby substantiating the integration of fitting platforms into extant transportation logistics frameworks. The economic effect has been determined by the difference in cost structures associated with the container fleets of both the operator and the forwarder. **Practical significance:** The results of this study can be applied within the business processes of freight forwarding companies, facilitating an increase in market share during periods of instability, optimizing transportation expenses, and enabling swift adaptations to evolving logistical conditions.

Keywords: Containerized freight transportation, fitting platforms, railway logistics, freight forwarding, cost assessment.

References

1. *Prikaz Ministerstva transporta RF ot 7 dekabrya 2016 g. № 374 “Ob utverzhdenii Pravil priema gruzov, porozhnikh gruzovykh vagonov k perevozke zheleznodorozhnym transportom”* [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated December 7, 2016 No. 374 “On approval of the Rules for accepting cargo and empty freight cars for railway transportation”]. Available at: <https://base.garant.ru/71635664/> (accessed: September 29, 2025). (In Russian)
2. *Prikaz Ministerstva transporta RF ot 23 iyunya 2022 g. № 250 “Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii”* [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 23, 2022 No. 250 “On approval of the Rules for technical operation of railways of the Russian Federation”]. Available at: <https://base.garant.ru/405042985/> (accessed: October 28, 2025). (In Russian)
3. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 31 dekabrya 2020 g. № 2417 “O litsenzirovani otdel'nykh vidov deyatel'nosti na zheleznodorozhnom transporte” (s izmeneniyami i dopolneniyami)* [Resolution

of the Government of the Russian Federation dated December 31, 2020 No. 2417 “On licensing certain types of activities in railway transport” (as amended and supplemented)]. Available at: <https://base.garant.ru/400169332/> (accessed: October 28, 2025). (In Russian)

4. *Postanovlenie FEK RF ot 17 iyunya 2003 g. № 47-t/5 “Ob utverzhdenii Preyskuranta N 10-01 “Tarify na perevozki gruzov i uslugi infrastruktury, vypolnyaemye rossiyskimi zheleznyimi dorogami” (Tarifnoe rukovodstvo N 1, chasti 1 i 2)” (s izmeneniyami i dopolneniyami)* [Resolution of the Federal Energy Commission of the Russian Federation dated June 17, 2003 No. 47-t/5 “On approval of Price List No. 10-01 ‘Tariffs for cargo transportation and infrastructure services provided by Russian Railways’ (Tariff Manual No. 1, Parts 1 and 2)’ (as amended and supplemented)]. Available at: <https://base.garant.ru/12131790/> (accessed: October 28, 2025). (In Russian)

5. *Prikaz Mintransa RF ot 18 dekabrya 2019 g. № 405 “Ob utverzhdenii Pravil perevozok zheleznodorozhnym transportom gruzov v konteynerakh i porozhnikh konteynerov”* [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated December 18, 2019 No. 405 “On approval of the Rules for transportation of cargo in containers and empty containers by railway transport”]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73712588/> (accessed: October 28, 2025). (In Russian)

6. *Federal’nyy zakon ot 30 iyunya 2003 g. № 87-FZ “O transportno-ekspeditsionnoy deyatel’nosti”* [Federal Law dated June 30, 2003 No. 87-FZ “On freight forwarding activities”]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_43006/ (accessed: October 28, 2025). (In Russian)

7. *Prikaz Mintransa RF ot 11 fevralya 2008 g. № 23 “Ob utverzhdenii Poryadka oformleniya i form ekspeditorskikh dokumentov”* [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of February 11, 2008 No. 23 “On Approval of the Procedure for Registration and Forms of Forwarding Documents”]. Available at: <https://base.garant.ru/12159320/> (accessed: October 28, 2025). (In Russian)

8. *GK RF, Glava 41 “Transportnaya Ekspeditsiya”* [Civil Code of the Russian Federation, Chapter 41 “Freight Forwarding”]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_9027/dfe46eb17d8b852987049332ca429b48b665b8a9/ (accessed: October 28, 2025). (In Russian)

9. *Natsional’nyy standart RF GOST R 52298—2004. Uslugi transportno-ekspeditorskie. Obshchie trebovaniya (utv. prikazom Federal’nogo agentstva po tekhnicheskому regulirovaniyu i metrologii ot 30 dekabrya 2004 g. № 148-st)* [National Standard of the Russian Federation GOST R 52298—2004. Freight forwarding services. General requirements (approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 30, 2004 No. 148-st)]. Available at: https://rosgosts.ru/file/gost/03/080/gost_r_52298-2004.pdf (accessed: October 28, 2025). (In Russian)

10. *Ofitsial’nyy sayt kompanii TK “DelEkspress”* [Official website of the company TK “DelEkspress”]. Available at: <https://delekspress-ooo.orgs.biz/> (accessed: October 28, 2025). (In Russian)

11. *Dannye bukhgalterskoy otchetnosti i finansovogo analiza TK “DelEkspress”* [Data of accounting reports and financial analysis of TK “DelEkspress”]. Available at: https://www.audit-it.ru/buh_otchet/7805634210_ooo-delekspress/ (accessed: October 28, 2025). (In Russian)

12. Gulyy I. M. Ekonomicheskie posledstviya tsifrovizatsii zheleznodorozhnykh konteyernykh perevozok [Economic consequences of digitalization of railway container transportation]. *Ekonomicheskie nauki* [Economic Sciences]. 2021, Iss. 200, pp. 57–61. (In Russian)
13. Gulyy I. M. Perspektivy razvitiya perevozok gruzov po marshrutam mul'timodal'nogo mezhdunarodnogo transportnogo koridora “Sever — Yug” [Prospects for development of cargo transportation along the routes of the multimodal international transport corridor “North — South”]. *Ekonomika Tsentral'noy Azii* [Economics of Central Asia]. 2022, vol. 6, Iss. 4, pp. 341–354. (In Russian)
14. Volkova E. V., Strimovskaya A. V. Vliyanie logisticheskikh zatrat na finansovye pokazateli raboty kompanii [Influence of logistics costs on financial performance indicators of a company]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and Supply Chain Management]. 2018, Iss. 5(88), pp. 53–61. (In Russian)
15. Zhuravleva N. A. Transformatsionnoe liderstvo i ustoychivoe razvitiye rossiyskikh transportnykh sistem [Transformational leadership and sustainable development of Russian transport systems]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii* [Modern Transportation Systems and Technologies]. 2022, vol. 8, Iss. 2, pp. 92–111. (In Russian)

Received: June 21, 2025

Accepted: August 08, 2025

Author's information:

Liana M. CHECHENOVA — Dr. Sci. in Economics, Associate Professor; liana1981-149@mail.ru
Maxim Yu. AGEEV — Economist, Department of Economics²; Postgraduate Student of the Department of Transport Economics¹; maxim.ageev.19@yandex.ru

УДК 330.34

Стратегия развития предприятия в долгосрочном периоде в условиях санкций

В. С. Меркушева¹, Е. А. Перков²

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

²Государственный университет просвещения, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, 10А, стр. 2

Для цитирования: Меркушева В. С., Перков Е. А. Стратегия развития предприятия в долгосрочном периоде в условиях санкций // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 193–200. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-193-200

Аннотация

Цель: Выполнить анализ существующих методик стратегического развития предприятия для оценки возможности их применения в условиях санкционного давления. Предложить рекомендации по формированию долгосрочной стратегии в условиях нестабильной внешнеэкономической среды, а также усовершенствовать методики стратегического планирования. **Методы:** Анализ и синтез, сравнительный анализ, экономико-статистические подходы, экспертные оценки. **Результаты:** Выполнен анализ существующих подходов стратегического развития. Изучены результаты влияния санкций на экономику страны. Предложены рекомендации по формированию долгосрочной стратегии в условиях нестабильной внешнеэкономической среды, инструментарий для более эффективного стратегического планирования, который может найти применение на предприятии любой отрасли промышленности. **Практическая значимость:** Использование сценарного подхода при оценке текущей производственной стратегии позволит разработать для промышленных предприятий более детализированный план стратегического развития с учетом рисков и факторов неопределенности, обусловленных санкционным давлением. Представление стратегии развития в форме «дерева решений» дает возможность наглядно выявить и проанализировать сильные и слабые стороны деятельности предприятия, а также сформировать наиболее эффективную стратегию его развития.

Ключевые слова: Стратегическое планирование, санкционное давление, диверсификация экспорта, импортозамещение, долгосрочное планирование, антикризисный план, распоряжение правительства № 2436-р, сравнение стратегий, методика, стратегическое планирование, конкурентоспособность.

Введение

На сегодняшний день актуальным является вопрос выработки стратегии развития предприятия в долгосрочной перспективе, которая представляет собой комплекс мер, направленных на достижение устойчивого роста и конкурентоспособности в условиях изменяющейся внешней среды. В условиях глобальной нестабильности, вызванной санкциями, экономическими кризисами и геополитическими конфликтами, предприятия вынуждены адаптировать свои стратегии с акцентом на минимизацию рисков и использование новых возможностей, предоставляемых государством. В теории стратегия развития в таких условиях может включать следующие элементы [1–5]:

1. Анализ внешней среды — оценка угроз и возможностей, связанных с санкциями, изменениями на рынках и технологическими трендами.
2. Диверсификация — расширение географии сбыта, поиск новых рынков и снижение зависимости от отдельных регионов или партнеров.
3. Импортозамещение — развитие собственных технологий и производственных мощностей для снижения зависимости от иностранных поставщиков.
4. Инновации — внедрение новых технологий и процессов для повышения эффективности и конкурентоспособности.
5. Государственная поддержка — использование мер, предлагаемых правительством, для стабилизации экономики и поддержки ключевых отраслей.

Предприятия промышленности, в связи с введенными санкциями против России в 2022 г., столкнулись со следующими проблемами:

- ограничение доступа к западным технологиям и оборудованию;
- сложности с привлечением международного финансирования;
- перестройка логистических цепочек и поиск новых рынков сбыта.

Действительно, многие технологии, используемые в промышленности, строительстве, нефтегазовой отрасли, были разработаны западными компаниями. Санкции ограничили доступ к этим технологиям, что создало необходимость развития собственных решений, увеличение финансирования в НИОКР, создание и расширение экспериментальной и производственной базы.

Санкции привели к ограничению доступа российских компаний к международным финансовым рынкам, что затруднило привлечение инвестиций для реализации крупных проектов.

В условиях санкций компании вынудили искать новые маршруты транспортировки и рынки сбыта, что потребовало значительных инвестиций в инфраструктуру промышленных предприятий и транспортных объектов.

Можно сказать, что действие санкций и подтолкнуло к развитию всех видов деятельности в различных отраслях. Данная ситуация помогла выявить множество проблем и нерешенных задач в реальных секторах экономики.

Перед государством встали вопросы снижения экономических потерь от вводимых ограничений, сохранения рабочих мест, предприятий и бизнеса, а также создания условий для развития импортозамещения.

В 2023 г. выходит федеральный закон № 625-ФЗ [6] который, в частности, предусматривает сохранение специального регулирования в сферах разрешительной и контрольной (надзорной) деятельности, корпоративных отношений. Так, в строительной деятельности за застройщиком сохраняется право вносить изменения в условия госконтракта самостоятельно, без излишней бюрократической нагрузки.

Для предприятий и предпринимателей до конца 2024 г. действовал мораторий на проведение плановых проверок. Проверки сохранили только в отношении небольшого закрытого перечня объектов в рамках санитарно-эпидемиологического,

ветеринарного и пожарного контроля, а также надзора в области промышленной безопасности.

Предоставляются льготные кредиты, ставки и размер которых определяют правительство и Банк России. Этими кредитами могут воспользоваться производители приоритетной промышленной продукции, а также системообразующие предприятия. В сфере предпринимательства появились различные меры господдержки: субсидии, гранты и другие.

В 2024 г. Правительство России продолжило реализацию антикризисного плана, направленного на стабилизацию экономики и поддержку ключевых отраслей. Основные меры включают:

- финансовую поддержку предприятий через льготное кредитование и субсидии. Правительство предоставляет льготные кредиты и субсидии для поддержки предприятий, что позволяет им инвестировать в развитие собственных технологий и инфраструктуры;
- стимулирование импортозамещения и развитие отечественных технологий. В рамках антикризисного плана предусмотрены меры по стимулированию разработки и внедрения отечественных технологий, что позволяет снизить зависимость от иностранных поставщиков;
- создание благоприятных условий для экспорта в дружественные страны. Правительство упрощает таможенные процедуры и развивает транспортные коридоры для увеличения экспорта в страны Азии и Ближнего Востока;
- инвестиции в инфраструктурные проекты. В рамках антикризисного плана предусмотрены инвестиции в развитие транспортной и логистической инфраструктуры, что позволяет компаниям эффективно перестраивать логистические цепочки.

Эти меры явились реализацией распоряжения Правительства РФ от 2023 г. № 2436-р [7], которое направлено на поддержку стратегических отраслей экономики.

Методология

Выработка методологии стратегического планирования в условиях всеобъемлющего санкционного давления и неопределенности внешней среды является одним из наиболее важных и актуальных вопросов для российских предприятий и организаций, поскольку они по-прежнему стремятся оставаться конкурентоспособными и успешными. Анализируя стратегии развития различных предприятий, таких как «Лукойл», «Роснефть», «Новатэк», «Газпром», различных строительных организаций в долгосрочной перспективе в досанкционный период, нужно отметить, что многие из них ориентировались на международные проекты, на использование западных технологий и материалов, комплектующих, привлечение западных инвестиций.

После введения санкций многие промышленные предприятия переориентировались на азиатские рынки, включая Китай и Индию. Компании стали активно инвестировать в собственные технологии и проекты, а также использовать меры государственной поддержки — в частности, распоряжение Правительства РФ № 2436-р [7] — для развития инфраструктуры.

Основные подходы, которые эффективно используются в стратегическом планировании [1–5, 8, 9]:

- анализ PEST (он же STEP) охватывает все факторы внешней среды любой организации: социум (S), технологии (T), экономику (E) и политику (P). Этот метод рекомендуется использовать в нестабильной рыночной среде, поскольку он учитывает инфляцию, спрос на рабочую силу и изменение стоимости материалов;
- SWOT-анализ. Активно используется в последнее время, поскольку учитывает различные риски, связанные с работой предприятий. Он достаточно инертен и легко подстраивается под различные цели организации;
- сценарное планирование. Используется в военном деле;
- анализ пяти сил Портера. Заключается в рассмотрении сфер внутри отрасли по пяти ключевым силам: риск появления новых игроков, угроза товаров-заменителей, спрос у потребителей, рыночное влияние поставщиков и уровень конкуренции;
- матрица BCG (Growth-Share Matrix). Наглядно демонстрирует связь между ростом спроса и долей рынка;
- адаптивная оценка (Responsive evaluation). Дает предварительную оценку запланированных действий с учетом обратной связи от аудитории. Может быть полезна при проверке разных гипотез;
- сбалансированные системы показателей (BSC) и стратегические карты (диаграммы для BSC). В отличие от других подходов стратегического планирования, имеют сжатый набор ключевых показателей для отслеживания. Основная цель подхода — управление результативностью.

В результате обобщения трудов ученых [1–5, 8–11], посвященных методикам стратегического планирования, предлагается:

1. Активно использовать сценарный подход с построением «дерева решений» для наглядности.
2. Для планирования и разработки нескольких сценариев развития (наиболее вероятного, оптимистического и пессимистического) — выделить основные составляющие изменения внешних условий, такие как:
 - ужесточение санкций;
 - изменение цен на материалы и комплектующие;
 - появление новых рынков сбыта;
 - внедрение новых технологий строительства и реконструкции.
3. Внедрять цифровые технологии (например, BIM-проектирование) в строительных организациях. Это позволяет на этапе проектирования проанализировать все возможные риски при строительстве и эксплуатации объектов.

4. Интегрировать ESG-принципы (экология, социальная ответственность, корпоративное управление) в стратегию компании.
5. Использовать agile-подходы для быстрой адаптации к изменениям на рынке.
6. Обеспечивать технологическую независимость путем создания собственных R&D-центров для разработки новых технологий.
7. Расширять присутствие на рынках:
 - выявлять новые рынки сбыта;
 - углублять сотрудничество с Китаем и Индией в области технологий и инвестиций.

Результаты исследования

По сведениям Министерства экономического развития РФ и Федеральной службы государственной статистики (Росстат) [12], опубликованы фактические данные по основным макроэкономическим показателям за период с 2018 по 2024 г.

По данным Росстата, в 2024 г. зафиксирован рост российской экономики в размере 4,1 %, что выше официального прогноза Минэкономразвития (3,9 %), экспертных оценок (консенсус на уровне 3,7 %) и оценок международных организаций. В номинале ВВП практически удвоился за последние 4 года — до 200 трлн рублей. Ранее сопоставимый прирост занимал 10 лет (с 2012 по 2021 г. номинальный ВВП вырос в 2 раза).

Несмотря на такие положительные результаты, видно, что в 2020 г. (ковидном) и 2022 г. с появлением санкций показатели ухудшились, поэтому необходимо предусматривать и прогнозировать различное влияние внешней среды на развитие предприятий и организаций в стратегическом планировании.

При стратегическом планировании следует предусматривать пять основных этапов анализа:

1. Анализ среды.
2. Постановка цели.
3. Выбор стратегии, разработка плана.
4. Реализация выбранной стратегии.
5. Контроль, оценка.

В ходе разработки долгосрочной стратегии предлагается:

1. На первом этапе («Анализ среды») использовать сценарный подход с построением «дерева решений» для наглядной оценки последствий изменения:
 - рынков сбыта;
 - производства;
 - обеспечивающих отраслей.
2. На этапе постановки цели — определить сроки ускорения процессов:
 - импортозамещения;
 - развития собственных технологий.

3. На третьем этапе — реализовать диверсификацию экспортных рынков с акцентом на Азию и Ближний Восток, а также укрепить сотрудничество с дружественными странами в области технологий и инвестиций.

Для реализации выбранной стратегии на данном этапе необходимо запланировать и осуществить инвестиции в инновации и зеленые технологии, что позволит повысить конкурентоспособность компании. Активное использование мер поддержки предусмотрено антикризисным планом и распоряжением Правительства РФ № 2436-р [7].

В процессе контроля результативности выбранной стратегии на промежуточных этапах ее реализации необходимо:

- отслеживать фактические показатели деятельности предприятия;
- оперативно вносить целенаправленные корректировки в расчеты показателей эффективности;
- при необходимости актуализировать саму стратегию.

Заключение

В условиях санкционного давления российские компании демонстрируют высокую адаптивность, перестраивая свои стратегии развития. Антикризисный план и распоряжение Правительства РФ № 2436-р [7] играют важную роль в поддержке предприятий, предоставляя им дополнительные возможности для преодоления вызовов. Успех в долгосрочной перспективе будет зависеть от способности компаний диверсифицировать рынки, развивать собственные технологии и интегрироваться в новые глобальные цепочки создания стоимости.

Список источников

1. Портер М. Конкурентная стратегия: методика анализа отраслей и конкурентов / М. Портер; пер. с англ. — 3-е изд. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. — 453 с.
2. Каплан Р. С. Сбалансированная система показателей: от стратегии к действию / Р. С. Каплан, Д. П. Нортон; пер. с англ. — 3-е изд. — М.: Олимп-Бизнес, 2022. — 320 с.
3. Грант Р. Современный стратегический анализ / Р. Грант. — СПб.: Питер, 2022. — 672 с.
4. Томпсон А. А. Стратегический менеджмент: учебник для вузов / А. А. Томпсон, А. Дж. Стриклэнд. — М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1998. — 576 с.
5. Рассел А. Планирование будущего корпорации / Р. Акофф; пер. с англ.; общ. ред. и предисл. [с. 5–21] В. И. Данилова-Данильяна. — М.: Прогресс, 1985. — 327 с.
6. Федеральный закон от 25.12.2023 № 625-ФЗ.
7. Официальные документы Правительства России по антикризисному плану и Распоряжению № 2436-р.
8. Левченко Н. В. Корпоративная стратегия международной логистической компании в условиях санкций Запада / Н. В. Левченко // Инновации и инвестиции. — 2023. — № 4. — С. 126–132.

9. Друкер П. Эффективный руководитель / П. Друкер. — М.: Манн, Иванов и Фербер, 2021. — 240 с.
10. Руденко М. Н. Стратегическое планирование: учеб. пособие / М. Н. Руденко, Е. Д. Оборина, Д. Н. Письменников; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. — Пермь, 2014. — 96 с.
11. Абрамов Д. В. Разработка оптимальных методов и инструментов управления при формировании корпоративной стратегии диверсификации / Д. В. Абрамов, Т. Ю. Анопченко, В. А. Шарыпов // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). — 2017. — № 3(59). — С. 80–89.
12. Сайт Федеральной службы государственной статистики (Росстат). — URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts/comments>.

Дата поступления: 21.07.2025

Решение о публикации: 31.08.2025

Контактная информация:

МЕРКУШЕВА Виктория Сергеевна — канд. экон. наук, доц.; vika.merkusheva@bk.ru
ПЕРКОВ Евгений Александрович — аспирант; evgenyperkovworking@yandex.ru

A Long-Term Strategy for Company Development Under Sanctions

V. S. Merkusheva¹, E. A. Perkov²

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

²State University of Education, 10, bld. 2, Radio str., Moscow, 105005, Russian Federation

For citation: Merkusheva V. S., Perkov E. A. A Long-Term Strategy for Company Development Under Sanctions. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 193–200. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-193-200

Summary

Purpose: To evaluate current strategies for enterprise development in order to determine their viability under sanctions pressure. To develop recommendations for a sustainable long-term strategy that will be appropriate for a volatile external economic environment. To enhance methods for strategic planning. **Methods:** Analysis and synthesis, comparative analysis, economic and statistical techniques, along with expert evaluations. **Results:** The current strategic development approaches have been analyzed. The repercussions of sanctions on the national economy have been thoroughly examined. Recommendations for establishing a sustainable long-term strategy in a volatile external economic environment along with effective strategic planning tools applicable across various enterprises have been formulated. **Practical significance:** Employing a scenario approach to evaluate the current enterprise strategy will enable the formulation of a comprehensive strategic development plan for industrial enterprises, factoring in the risks and uncertainties associated with sanctions pressure. Representing the development strategy as a “Decision Tree” will facilitate the visual identification and analysis of the enterprise’s strengths and weaknesses, thereby enabling the formulation of the most effective strategy for the enterprise’s advancement.

Keywords: Strategic planning, sanctions pressure, export diversification, import substitution, long-term planning, anti-crisis plan, Government Decree No. 2436-r, comparison of strategies, methods of strategic planning, competitiveness.

References

1. Porter M. *Konkurentnaya strategiya: metodika analiza otrasyley i konkurentov* [Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors]. Moscow: Alpina Business Books Publ., 2007, 453 p. (In Russian)
2. Kaplan R. S. *Sbalansirovannaya sistema pokazateley: ot strategii k deystviyu* [The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action]. Moscow: Olimp-Business Publ., 2022, 320 p. (In Russian)
3. Grant R. *Sovremennyj strategicheskiy analiz* [Contemporary Strategy Analysis]. St. Petersburg: Piter Publ., 2022, 672 p. (In Russian)
4. Tompson A. A. *Strategicheskiy menedzhment: uchebnik dlya vuzov* [Strategic Management: Textbook for Universities]. Moscow: Banki i birzhi, UNITY Publ., 1998, 576 p. (In Russian)
5. Akoff R. *Planirovanie budushchego korporatsii* [Corporate Future Planning]. Moscow: Progress, 1985, 327 p. (In Russian)
6. *Federal'nyy zakon ot 25.12.2023 № 625-FZ* [Federal Law No. 625-FZ of December 25, 2023]. (In Russian)
7. *Oifitsial'nye dokumenty Pravitel'stva Rossii po antikrizisnomu planu i Rasporyazheniyu № 2436-r* [Official Documents of the Government of Russia on the Anti-Crisis Plan and Order No. 2436-r]. (In Russian)
8. Levchenko N. V. Korporativnaya strategiya mezhdunarodnoy logisticheskoy kompanii v usloviyakh sanktsiy Zapada [Corporate Strategy of an International Logistics Company under Western Sanctions]. *Innovatsii i investitsii* [Innovation and Investment], 2023, Iss. 4, pp. 126–132. (In Russian)
9. Drucker P. *Effektivnyy rukovoditel'* [The Effective Executive]. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber Publ., 2021, 240 p. (In Russian)
10. Rudenko M. N. *Strategicheskoe planirovaniye: ucheb. posobie* [Strategic Planning: Textbook]. Perm: Perm. gos. nats. issled. un-t Publ., 2014, 96 p. (In Russian)
11. Abramov D. V. Razrabotka optimal'nykh metodov i instrumentov upravleniya pri formirovaniyu korporativnoy strategii diversifikatsii [Development of Optimal Management Methods and Tools in Forming a Corporate Diversification Strategy]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta (RINKh)* [Bulletin of Rostov State University of Economics (RSUE)]. 2017, Iss. 3 (59), pp. 80–89. (In Russian)
12. *Sayt Federal'noy sluzhby gosudarstvennoy statistiki (Rosstat)* [Website of the Federal State Statistics Service (Rosstat)]. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts/comments>. (In Russian)

Received: July 21, 2025

Accepted: August 31, 2025

Author's information:

Viktoriya S. MERKUSHEVA — PhD in Economics, Associate Professor; vika.merkusheva@bk.ru
Evgeniy A. PERKOV — Postgraduate Student; evgenyperkovworking@yandex.ru

УДК 338.47

Оценка применения глобальных подходов к развитию городской мобильности в транспортной политике Санкт-Петербурга

Е. С. Бут

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

Для цитирования: Бут Е. С. Оценка применения глобальных подходов к развитию городской мобильности в транспортной политике Санкт-Петербурга // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 201–212. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-201-212

Аннотация

Исследование посвящено глобальным тенденциям развития пассажирского транспорта в агломерациях, а также адаптации институтов и инструментов транспортной политики в городских агломерациях России на примере Санкт-Петербурга. **Цель:** Выявление ключевых направлений развития городских транспортных систем агломераций и оценка степени их институционализации и практической реализации в программе развития транспортной системы Санкт-Петербурга; разработка предложений по актуализации программы, направленных на повышение качества городской мобильности и укрепление агломерационной связности. **Методы:** Систематизация научной литературы, сопоставительный анализ международных практик развития транспортных систем крупных городов, анализ программных документов развития транспортной системы Санкт-Петербурга. **Результаты:** Сформирована типология актуальных направлений (приоритет общественного транспорта; интермодальность и тарифная интеграция; управление спросом на индивидуальные поездки; экологизация и цифровизация), выделены факторы трансформации рынка городских пассажирских перевозок. Проведен анализ степени реализации ключевых мер в программе развития городского транспорта Санкт-Петербурга. Выявлено, что применение международных практик в транспортной политике Санкт-Петербурга носит частичный характер; идентифицированы разрывы, которые ограничили масштабируемость и системный эффект мер, а именно: отсутствие закрепленных стандартов тактовости и пересадки, разрывность коридоров приоритета общественного транспорта, неполная городско-агломерационная тарифная интеграция, слабая межтерриториальная координация показателей качества. Даны научно обоснованные рекомендации по дальнейшей адаптации международных практик развития городского транспорта к условиям Санкт-Петербургской агломерации. Результаты могут быть использованы органами управления и операторами при актуализации программ развития городских транспортных систем.

Ключевые слова: Городской пассажирский транспорт, агломерация, приоритет общественного транспорта, интермодальность, тарифная интеграция.

Введение

За последние годы уклад городской жизни во всем мире ускоренно меняется: агломерации растут и по площади, и по численности населения, во многих из них нарастает полицентричность расселения, что в совокупности с цифровизацией сервисов трансформирует требования к городской мобильности [1–3].

В большинстве агломераций повторяются схожие вызовы — перегруженность сети и рост времени «от двери до двери», неравенство транспортной доступности, разрывы интермодальных стыковок и фрагментация управления, при этом их

выраженность зависит от морфологии расселения, институтов и качества цифровых сервисов. Ответом становится «набор практик»: коридоры приоритета общественного транспорта (ОТ), интеграция расписаний и тарифов, управление спросом, экологизация парка и сервисы в реальном времени, эффективность которых определяется институциональной, финансово-технологической и планировочной готовностью [4, 5]. При оценке доступности поездки «от двери до двери» на первый план выходят не только суммарное время и его вариативность, но и надежность и «сохраняемость» стыковок, время и удобство переходов внутри транспортно-пересадочных узлов (ТПУ), согласованность расписаний и тарифов (единые билеты, абонементы), полнота и своевременность информации в реальном времени, а также физическая доступность и безопасность пересадок для маломобильных групп населения [6, 7].

Ключевой задачей в теме интеграции видов транспорта становится «сшивание» стыковок через два взаимодополняющих слоя: расписательная координация (тактовость, окна гарантированных пересадок, оптимизация расписаний) и операционное управление в реальном времени (корректировки скорости и расписания) [8, 9]. Иллюстрации организации «бесшовных» пересадок в крупных городах мира: модель tram-train (Карлсруэ, Саарбрюккен); through-services в Токио; интегрированный Taktfahrplan и зональная тарифная система ZVV/Z-Pass в Цюрихе. Тарифная интеграция дополняет «бесшовность»: единые/ограниченные тарифы снижают транзакционные издержки и повышают вероятность успешной пересадки; совмещение расписательной координации, управления в реальном времени и интегрированного тарифа делает «бесшовность» измеримой [10].

В пределах агломерации интеграция неизбежно дополняется институциональными вызовами: разделение полномочий между муниципалитетами и регионом, множественность операторов и разнонаправленные финансовые потоки требуют формализованной межведомственной координации. Вместе с тем даже при переносе полномочий на межведомственный уровень на практике сохраняются разрывы согласования задач, КРІ и бюджетов [11].

Дополнительный эффект дают декарбонизация парка и ценовые меры управления спросом на личный автотранспорт: платный въезд в загруженные зоны и экологические сборы демонстрируют уменьшение автозависимости, перераспределение поездок в пользу ОТ и сокращение выбросов [12, 13].

Показательные кейсы: Лондон (с 2003 г.) и Стокгольм (с 2007 г.) снизили трафик в центрах благодаря платному въезду; Сингапур сочетает ERP (платный проезд на перегруженных участках) и СОЕ (квотирование парка 10-летними сертификатами), одновременно управляя трафиком и общим числом автомобилей; Шэнчжэнь в 2017 г. полностью электрифицировал автобусный парк; Шанхай совмещает ограничения для автомобилей с ДВС со стимулами для электромобилей.

Парковочная политика (зонирование, дифференциация тарифов) обеспечивает нормативную загрузку улично-дорожной сети, освобождая ее от длительной и хаотичной стоянки автомобилей. Иллюстративные кейсы политики парковочного управления: в Сеуле целевая загрузка поддерживается регулярными обследованиями и зонированием; в Москве динамическое ценообразование по загрузке повышает оборачиваемость мест и среднюю скорость наземного ОТ.

Материалы и методы

Для достижения цели исследования использованы анализ и систематизация научных публикаций по городской мобильности (выделение ключевых тенденций), а также сравнительный анализ и обобщение программных документов Санкт-Петербурга (оценка их соответствия выявленным тенденциям). В качестве информационной базы исследования были использованы научные публикации по выбранной проблематике, нормативно-правовые акты и программные документы, касающиеся развития транспортной системы Санкт-Петербурга.

Результаты исследования

Проведенный анализ международных кейсов позволил синтезировать классификацию направлений развития пассажирских перевозок в агломерациях с привязкой к инструментам реализации и измеримым эффектам. Она структурирует семь взаимосвязанных блоков политики и отражает конкретные инструменты, с помощью которых эти направления в последние годы реализуются в разных странах, а также целевые результаты их применения (табл. 1).

В следующей части исследования классификация сопоставлена с документами стратегического планирования Санкт-Петербурга: Транспортной стратегией Санкт-Петербурга до 2025 г. (постановление Правительства Санкт-Петербурга от 13.07.2011 № 945), Концепцией развития транспортной системы Санкт-Петербурга 2017–2038 гг. (перспектива до 2048 г.), Государственной программой Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга» (Программа).

Анализ международных практик в области развития городских транспортных систем и документов развития транспортной системы Санкт-Петербурга позволил выделить ключевые направления развития городской транспортной системы и конкретизировать инструменты, обеспечивающие достижение стратегических целей (табл. 2).

Анализ действующей Программы развития транспортной системы Санкт-Петербурга показывает, что она частично отражает современные подходы к управлению агломерационной мобильностью, однако в недостаточной мере ориентирована на получение агломерационных эффектов.

**ТАБЛИЦА 1. Классификация направлений развития пассажирского транспорта
в агломерациях**

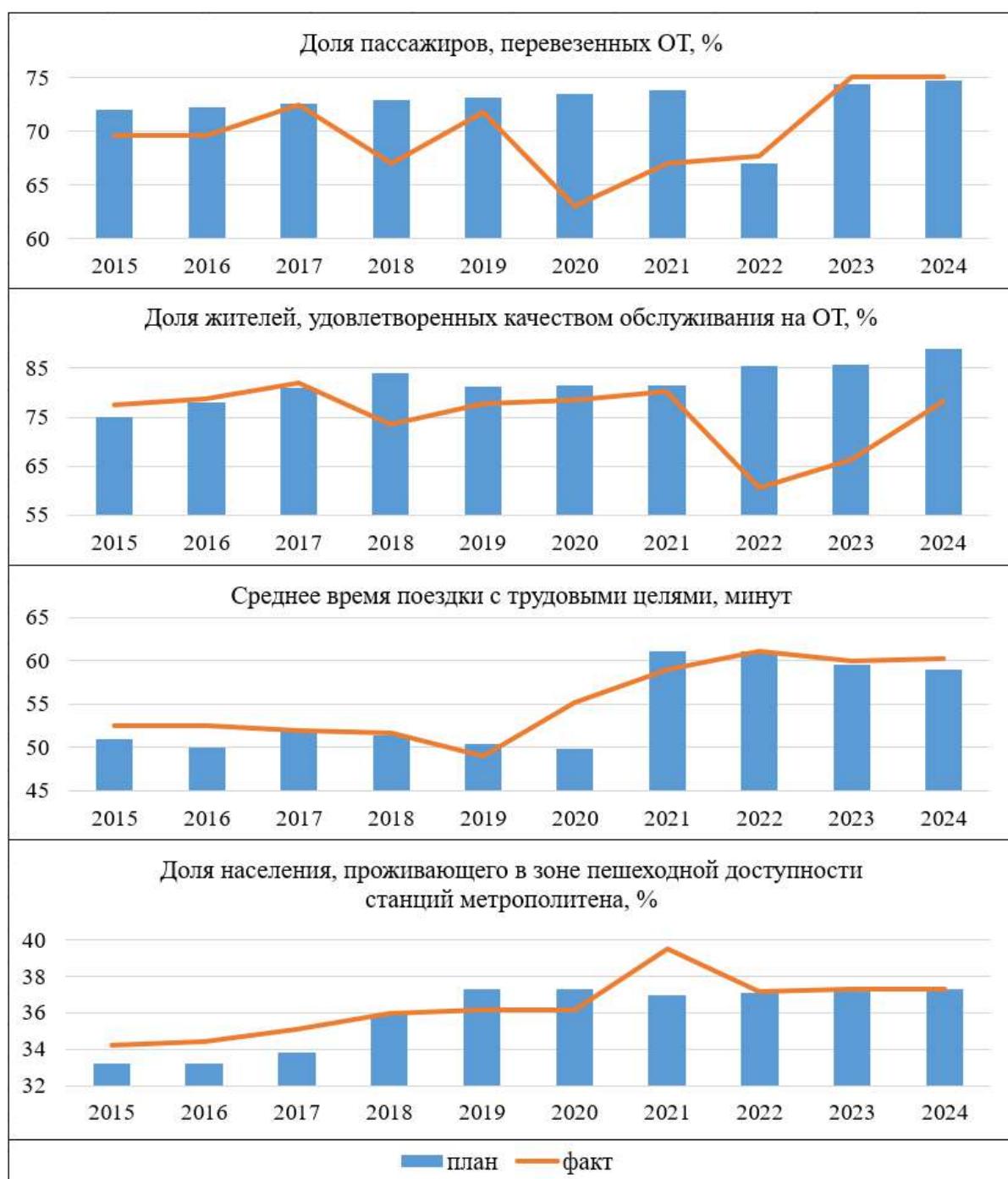
Направление	Инструменты и эффекты
Институциональная координация и управление качеством	Инструменты: единый заказчик и система КП; межведомственное планирование. Эффекты: согласованность; меньше дублирования функций; ускорение реализации проектов
Тарифно-билетная интеграция	Инструменты: единые тарифные зоны, проездные и абонементы; согласование льгот; бесконтактная оплата и цифровые сервисы. Эффекты: ниже транзакционные издержки и вероятность отказа от пересадки; рост пассажиропотока
Планирование сети и расписаний	Инструменты: тактовые расписания; синхронизация интервалов; оптимизация маршрутной сети. Эффекты: сокращение потерь времени на пересадках и совокупного времени в пути; повышение предсказуемости
Операционная надежность и приоритет ОТ	Инструменты: выделенные полосы для ОТ и светофорный приоритет; адаптивное управление ОТ в реальном времени. Эффекты: снижение совокупного времени поездки; рост регулярности и предсказуемости
Интермодальные узлы и «сшивание» стыковок	Инструменты: развитие ТПУ; короткие переходы; доступность для маломобильных граждан; навигация в реальном времени. Эффекты: снижение времени пересадки и доли несостоявшихся стыковок; повышение комфорта и доступности; укрепление связности транспортной сети
Управление спросом на личный автотранспорт	Инструменты: плата за въезд; динамическое ценообразование на платных парковках; нефинансовые ограничения доступа в зоны и часы пик; каршеринг, перехватывающие парковки. Эффекты: сокращение доли поездок на личных автомобилях; лучше экологические показатели
Декарбонизация парка подвижного состава	Инструменты: электрификация ОТ; стимулы отказа от ДВС; ограничения использования автопарка по стандартам выбросов и экологическим классам; развитие зарядной инфраструктуры. Эффекты: сокращение выбросов углекислого газа и окислов азота; снижение эксплуатационных затрат на топливо; рост экологической и инвестиционной привлекательности территории

Недостаточно выделен приоритет общественного транспорта: темпы развития метро не соответствуют спросу, отсутствует стратегия развития трамвайных маршрутов как магистрального вида транспорта, доля высокопроизводительных видов транспорта в структуре пассажиропотока не растет. По данным отчетов Комитета по транспорту Санкт-Петербурга о ходе реализации Программы, доля пассажиров, перевезенных городским пассажирским транспортом, за период 2015–2024 гг. увеличилась с 69,6 % до 75,1%, при этом плановые значения оставались на уровне 72–74 %, что указывает на занижение целевых ориентиров и отсутствие реального стимулирования роста пассажиропотока за счет развития приоритетных видов общественного транспорта (рис. 1).

ТАБЛИЦА 2. Ключевые инструменты развития транспортной системы в Санкт-Петербурге

Направление	Инструменты и KPI
Институциональная координация	Инструменты: разные организаторы перевозок на уровне города и региона. KPI: отсутствие единых индикаторов на уровне агломерации
Тарифно-билетная интеграция	Инструменты: пересадочные билеты «60/90 минут»; транспортная карта «Подорожник»; безналичная оплата. KPI: доля электронных оплат; доля поездок с пересадочным тарифом; охват интегрированными тарифными продуктами
Планирование сети и расписаний	Инструменты: приоритезация рельсовых направлений; стандарты доступности остановок; тактовость и синхронизация маршрутов. KPI: средний интервал движения наземного ОТ в часы пик; доля маршрутов с интервалом менее 10 минут; прирост средней скорости наземного ОТ; доступность остановок
Операционная надежность и приоритет ОТ	Инструменты: выделенные полосы; приоритет на светофорах; интеллектуальные транспортные системы и автоматизированное управление в реальном времени; обособление трамвайных путей. KPI: средняя скорость на коридорах; показатели регулярности и задержек; число управляемых светофоров
Интермодальные узлы и «сшивание» стыковок	Инструменты: развитие инфраструктуры ТПУ; перехватывающие парковки; доступность для МГН; навигация и информирование в реальном времени. KPI: ввод новых ТПУ; использование перехватывающих парковок; доля подвижного состава, доступного для маломобильных групп населения; среднее время пересадки
Управление спросом на личный автотранспорт	Инструменты: платная городская парковка с дифференцированными тарифами по коэффициентам загрузки; платный въезд не внедрен. KPI: целевая загрузка парковок; охват платными зонами; оборачиваемость парковочных мест; доля поездок на личных автомобилях
Декарбонизация парка подвижного состава	Инструменты: обновление парка ОТ; закупки по экологическим стандартам; развитие зарядной инфраструктуры. KPI: доля электрического подвижного состава; показатели снижения выбросов; темпы ввода единиц подвижного состава

Институциональная связка «Санкт-Петербург — Ленинградская область» остается ограниченной: Соглашение по перевозке жителей Санкт-Петербурга и Ленинградской области дает формальную основу для совместных маршрутов и их финансирования, но не вводит единые KPI качества на всю агломерацию. При этом показатель удовлетворенности жителей качеством обслуживания общественного транспорта колебался в пределах 60–82 % и систематически не достигал плановых значений (в 2022 г. — лишь 71 % от плана, в 2023 г. — 77,3 %), что указывает на сохраняющееся недоверие населения к качеству транспортных услуг (рисунок). Оценка степени удовлетворенности проводилась среди жителей Санкт-Петербурга и не охватывала территорию Ленинградской области, что приводит к ее фрагментарности и искажает реальное представление о качестве обслуживания в границах агломерации.



Достижение целевых показателей Программы (составлено авторами по данным [14])

Операционный приоритет общественного транспорта реализуется фрагментарно. Выделенные полосы ОТ не образуют непрерывных коридоров, преимущество ОТ на светофорах вводится точечно. Пересадки остаются долгими и непредсказуемыми: нет единых стандартов времени пересадки, расписания разных видов транспорта согласуются эпизодически и несистемно. При этом показатель доли населения, проживающего в зоне пешеходной доступности станций метрополитена, за десятилетие увеличился лишь с 34,2 % до 37,3 % (рис.), что указывает на

крайне медленное расширение покрытия метро по отношению к росту численности населения.

Тарифная интеграция развивается, но не охватывает все типовые связки, в том числе интеграцию метро и городского наземного ОТ с пригородными железнодорожными линиями. Предусмотрены такие инструменты, как единый месячный абонемент (на все виды ОТ) и билет «90 минут», который позволяет совершить одну поездку на метро и неограниченное число поездок на городском наземном транспорте в течение полутора часов, однако пригородный железнодорожный транспорт пока не включен в зону действия этих тарифов, что ограничивает полноценную интеграцию транспортных цепочек агломерации.

Политика управления спросом и экологические ограничения используются не в полном объеме. Сеть платной уличной парковки расширяется, однако механизмы ценового регулирования применяются ограниченно; плата за въезд в центральные зоны не реализована. Цифровые сервисы обеспечивают доступность прогноза прибытия и безналичную оплату, но нет данных о фактической заполненности подвижного состава. Доступность для людей с ограниченной мобильностью обеспечена не на всех маршрутах и станциях. Развитие транспортно-пересадочных узлов предусмотрено, однако их количество и темпы ввода не соответствуют масштабу агломерации.

В международной практике одним из ключевых индикаторов эффективности развития транспортной системы является сокращение времени поездки «от двери до двери». Однако в Санкт-Петербурге динамика соответствующего показателя — «Среднее время поездки с трудовыми целями» — демонстрирует противоположную тенденцию.

За период с 2015 по 2024 г. средняя продолжительность поездки выросла с 52,5 до 60,2 минуты, то есть почти на 15 %, что свидетельствует об усложнении передвижений и росте транспортных издержек для населения (рисунок). При этом формальная степень выполнения плановых значений, колеблющаяся от 90 % до 103 %, не отражает фактического ухудшения условий мобильности.

Характерная для последних лет корректировка плановых значений, приближающих целевые показатели к фактическим результатам, формирует эффект «выполнения плана» при отсутствии реального улучшения транспортной ситуации. Кроме того, метрики качества ориентированы преимущественно на городской уровень и не учитывают специфику агломерационных перевозок; механизмы межтерриториальной координации показателей качества не заложены.

В целях актуализации и расширения инструментария с учетом современных тенденций предлагается включить в Программу развития транспортной системы Санкт-Петербурга пакет мер, направленный на повышение пространственной связности агломерации через формирование единой интегрированной транспортной сети, обеспечивающей устойчивые и эффективные связи между ее частями.

Для перехода к агломерационному формату прежде всего необходимо усилить институциональную связку и унифицировать методику измерения результатов: разработать общие для всей агломерации целевые показатели и способы их расчета.

На операционном уровне ключевая задача — превратить разрозненные элементы приоритета ОТ в непрерывные коридоры с гарантированным преимуществом. Необходимо усиление тарифной интеграции «город — область»: межсубъектный пересадочный тариф с ограничителями стоимости, распространенный на пригородную железную дорогу.

Существенно улучшит комфорт пассажиров предоставление в реальном времени информации о фактической загруженности подвижного состава и перехватывающих парковок. Это позволит управлять спросом в пиковые часы.

Для устойчивого модального сдвига требуется доработка инструментов управления спросом на личный автотранспорт и экологической обстановкой. Рекомендуется:

- закрепить целевые диапазоны загрузки как основу динамического ценообразования на парковках и расширить зону его применения в узлах притяжения и на стыках Санкт-Петербурга и Ленинградской области;
- рассмотреть возможность введения pilotных экологических зон и сценариев платы за въезд в наиболее перегруженные районы.

Комплексная реализация перечисленных шагов позволит:

- повысить связность и доступность в масштабе агломерации;
- сократить время «от двери до двери»;
- укрепить модальный сдвиг в пользу общественного транспорта;
- обеспечить устойчивое развитие транспортной системы.

В то же время применение вышеуказанных мер должно сопровождаться:

- общей для агломерации системой показателей;
- ежегодным аудитом достижения целей.

Это обеспечит:

- корректировку программы развития транспортной системы на основе сопоставимых данных;
- принятие управлеченческих решений с опорой на измеримый эффект для жителей и экономики.

Обсуждение результатов

В ходе исследования выполнен обзор международной практики, синтезирована классификация направлений развития пассажирских перевозок с привязкой к инструментам и эффектам, проведен аудит документов Санкт-Петербурга и дана оценка отражения глобальных тенденций в Программе; выявлено отсутствие единых агломерационных KPI качества и доступности.

Вместе с тем остается ряд нерассмотренных вопросов:

- институционально-финансовая модель межтерриториальной координации требует дополнительного исследования;
- необходима разработка детальной спецификации показателей транспортного обслуживания на агломерационном уровне.

Заключение

Проведенное исследование позволило не только зафиксировать ключевые тенденции развития транспортных систем агломераций, но и предложить их прикладную классификацию с привязкой к инструментам и измеримым эффектам. Анализ программных документов Санкт-Петербурга подтвердил наличие важной институциональной базы развития транспортной системы, но одновременно выявил дефицит решений при переходе от городского к агломерационному масштабу. Целенаправленное устранение выявленных пробелов обеспечит существенный прирост агломерационного эффекта — повышение связности и предсказуемости поездок «от двери до двери», сокращение времени и издержек перемещений, усиление модального сдвига в пользу общественного транспорта и сопутствующие экологические и социально-экономические выгоды.

Список источников

1. Васильева М. Е. Интеллектуальные транспортные системы в российских агломерациях: сущность, структура и направления развития / М. Е. Васильева, Е. М. Волкова, А. С. Романов // Инновационные транспортные системы и технологии. — 2023. — Т. 9. — № 4. — С. 117–128. — DOI: 10.17816/transsyst202394117-128.
2. Лосин Л. А. Определение потенциала поликентричности городских районов на основе математического моделирования систем городского пассажирского транспорта / Л. А. Лосин, Н. А. Калюжный // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 47–59. — DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-47-59.
3. Шульженко Т. Г. Логистика новой городской мобильности: ценностно ориентированный подход / Т. Г. Шульженко, А. Е. Жук, Д. П. Иванова; под ред. Т. Г. Шульженко. — М.: ИНФРА-М, 2023. — 546 с.
4. Schlett M. Public transport through time and space: Novel indicators for fare policy assessment / M. Schlett, A. Loder // Transportation Research Record. — 2025. — Vol. 2679. — Iss. 8. — Pp. 984–1003. — DOI: 10.1177/03611981251335884.
5. Vale D. Accessibility inequality across Europe: A comparison of 15-minute pedestrian accessibility in cities with 100,000 or more inhabitants / D. Vale, A. S. Lopes // npj Urban Sustainability. — 2023. — Vol. 3. — P. 55. — DOI: 10.1038/s42949-023-00133-w.
6. Рахимов О. О. Цифровая платформа как элемент управления транспортной системой городской агломерации / О. О. Рахимов, М. А. Лякина // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы. — 2023. — № 1. — С. 10–15. — DOI: 10.17816/transsyst202394117-128.

тивы: сборник трудов LXXXII Всероссийской научно-технической конференции. — 2022. — С. 101–105.

7. Waldorf I. Low fare public transport as social policy? A study of Germany's 9-Euro-Ticket and Deutschlandticket via propensity score matching / I. Waldorf, A. Loder, S. Wurster et al. // Transportation. — 2025. — Advance online publication. — DOI: 10.1007/s11116-025-10640-7.

8. Gkiotsalitis K. A review of public transport transfer synchronisation at the real-time control phase / K. Gkiotsalitis, O. Cats, T. Liu // Transport Reviews. — 2022. — Vol. 43. — Iss. 1. — Pp. 88–107. — DOI: 10.1080/01441647.2022.2035014.

9. Liu T. Optimizing public transport transfers by integrating timetable coordination and vehicle scheduling / T. Liu, W. Ji, K. Gkiotsalitis, O. Cats // Computers & Industrial Engineering. — 2023. — Vol. 184. — P. 109577. — DOI: 10.1016/j.cie.2023.109577.

10. Ziedan A. The app or the cap? Which fare innovation affects bus ridership? / A. Ziedan, A. Hightower, L. Lima, C. Brakewood // Transport Policy. — 2024. — Vol. 145. — Pp. 247–258. — DOI: 10.1016/j.trapol.2023.10.014.

11. Andersson I. Rescaling public transport planning in Sweden: Investigating the continued planning at the scale ‘left behind’ / I. Andersson, B. Hermelin // European Planning Studies. — 2024. — Vol. 32. — Iss. 7. — Pp. 1445–1463. — DOI: 10.1080/09654313.2024.2341977.

12. Zong F. Congestion pricing for sustainable urban transportation systems considering carbon emissions and travel habits / F. Zong, M. Zeng, Y.-X. Li // Sustainable Cities and Society. — 2024. — Vol. 101. — P. 105198. — DOI: 10.1016/j.scs.2024.105198.

13. Zhao C. Impact of carbon charge policy on mode shifts in public transportation / C. Zhao, J. Tang, L. Hu, C. Hu et al. // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2024. — Vol. 137. — P. 104491. — DOI: 10.1016/j.trd.2024.104491.

14. Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 30.06.2014 № 552 «О государственной программе Санкт-Петербурга “Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга”» (с изменениями на 7 октября 2025 года) // Официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга.

Дата поступления: 25.10.2025

Решение о публикации: 15.11.2025

Контактная информация:

БУТ Екатерина Сергеевна — аспирант; but_ekaterina@bk.ru

Assessing Global Approaches to Urban Mobility Development in the Context of Saint Petersburg's Transport Policy

E. S. But

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

For citation: But E. S. Assessing Global Approaches to Urban Mobility Development in the Context of Saint Petersburg's Transport Policy. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 201–212. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-201-212

Summary

The paper explores contemporary global trends in passenger transportation within metropolitan regions and assesses their implementation in Russia, focusing specifically on Saint Petersburg. **Purpose:** To identify the primary policy directions for urban transport development in city–region contexts and to evaluate how effectively these directions are integrated and carried out in Saint Petersburg's Transport System Development Programme. **Methods:** A systematic review of relevant research literature, a comparative analysis of international large-city practices, and a detailed analysis of Saint Petersburg's strategic and programme documents along with the mapping of fundamental indicators. **Results:** A detailed classification of priorities, encompassing public transport, intermodal transportation, tariff integration, private transport demand management, ecological sustainability, and digitalization, has been developed, alongside the identification of factors contributing to the transformation of the urban passenger transport market. While these priorities have been articulated in Saint Petersburg's official documents, their implementation remains inconsistent. Key deficiencies hindering a widespread and systematic impact include the absence of mandatory standards for synchronized timetables and transfer dependability, fragmented public transport priority corridors, an insufficient cross-jurisdictional alignment of key quality performance indicators (KPIs). Evidence-based recommendations to adapt international practices for urban transport development to the conditions of the Saint Petersburg agglomeration have been proposed. The insights provided will be beneficial for governing bodies and operators in updating urban transport development programmes.

Keywords: Urban public transport, urban agglomeration, public transport priority, intermodal integration, tariff integration.

References

1. Vasil'eva M. E., Volkova E. M., Romanov A. S. Intellektual'nye transportnye sistemy v rossiyskikh aglomeratsiyakh: sushchnost', struktura i napravleniya razvitiya [Intelligent transport systems in Russian agglomerations: essence, structure and development directions]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii* [Innovative Transport Systems and Technologies]. 2023, vol. 9, Iss. 4, pp. 117–128. DOI: 10.17816/transyst202394117-128. (In Russian)
2. Losin L. A., Kalyuzhnyy N. A. Opredelenie potentsiala politsentrichnosti gorodskikh rayonov na osnove matematicheskogo modelirovaniya sistem gorodskogo passazhirskogo transporta [Determining the polycentric potential of urban areas based on mathematical modeling of urban passenger transport systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS, 2025, vol. 22, Iss. 1, pp. 47–59. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-47-59. (In Russian)
3. Shul'zhenko T. G., Zhuk A. E., Ivanova D. P. *Logistika novoy gorodskoy mobil'nosti: tsennostno orientirovannyj podkhod* [Logistics of new urban mobility: a value-oriented approach]. Moscow: INFRA-M Publ., 2023, 546 p. (In Russian)
4. Schlett M., Loder A. Public transport through time and space: Novel indicators for fare policy assessment. *Transportation Research Record*, 2025, vol. 2679, Iss. 8, pp. 984–1003. DOI: 10.1177/03611981251335884.

5. Vale D., Lopes A. S. Accessibility inequality across Europe: A comparison of 15-minute pedestrian accessibility in cities with 100,000 or more inhabitants. *npj Urban Sustainability*, 2023, ol. 3, p. 55. DOI: 10.1038/s42949-023-00133-w.
6. Rakhimov O. O., Lyakina M. A. Tsifrovaya platforma kak element upravleniya transportnoy sistemoy gorodskoy aglomeratsii [Digital platform as an element of managing the transport system of an urban agglomeration]. *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXXII Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Transport: Problems, Ideas, Prospects: Proceedings of the LXXXII All-Russian Scientific and Technical Conference]. 2022, pp. 101–105. (In Russian)
7. Waldorf I., Loder A., Wurster S. et al. Low fare public transport as social policy? A study of Germany's 9-Euro-Ticket and Deutschlandticket via propensity score matching. *Transportation*, 2025, Advance online publication. DOI: 10.1007/s11116-025-10640-7.
8. Gkiotsalitis K., Cats O., Liu T. A review of public transport transfer synchronisation at the real-time control phase. *Transport Reviews*, 2022, vol. 43, Iss. 1, pp. 88–107. DOI: 10.1080/01441647.2022.2035014.
9. Liu T., Ji W., Gkiotsalitis K., Cats O. Optimizing public transport transfers by integrating timetable coordination and vehicle scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, vol. 184, p. 109577. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109577.
10. Ziedan A., Hightower A., Lima L., Brakewood C. The app or the cap? Which fare innovation affects bus ridership? *Transport Policy*, 2024, vol. 145, pp. 247–258. DOI: 10.1016/j.trapol.2023.10.014.
11. Andersson I., Hermelin B. Rescaling public transport planning in Sweden: Investigating the continued planning at the scale ‘left behind’. *European Planning Studies*, 2024, vol. 32, Iss. 7, pp. 1445–1463. DOI: 10.1080/09654313.2024.2341977.
12. Zong F., Zeng M., Li Y. -X. Congestion pricing for sustainable urban transportation systems considering carbon emissions and travel habits. *Sustainable Cities and Society*, 2024, vol. 101, p. 105198. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105198.
13. Zhao C., Tang J., Hu L., Hu C. et al. Impact of carbon charge policy on mode shifts in public transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, vol. 137, p. 104491. DOI: 10.1016/j.trd.2024.104491.
14. Postanovlenie Pravitel'stva Sankt-Peterburga ot 30.06.2014 № 552 "O gosudarstvennoy programme Sankt-Peterburga "Razvitiye transportnoy sistemy Sankt-Peterburga" (s izmeneniyami na 7 oktyabrya 2025 goda) [Resolution of the Government of Saint Petersburg dated 30.06.2014 № 552 "On the State Program of Saint Petersburg 'Development of the Transport System of Saint Petersburg'" (as amended on October 7, 2025)]. *Oifitsial'nyy sayt Administratsii Sankt-Peterburga* [Official Website of the Administration of Saint Petersburg]. (In Russian)

Received: October 25, 2025

Accepted: November 15, 2025

Author's information:

Ekaterina S. BUT — Postgraduate Student; but_ekaterina@bk.ru