

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

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

Журнал имеет институт рецензирования

The Journal has the Peer-review division

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

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

Минимальные системные требования

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ INTERNATIONAL EDITORIAL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

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

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

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

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

Файл 1 – рукопись научной статьи в формате MS Word.

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

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

Файл 4 – информация об авторах:

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

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

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

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

Файл 8 – лицензионный договор.

1.5 Все рукописи проходят рецензирование (внешняя экспертная оценка).

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

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

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

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

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

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

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

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

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

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

Внимание! Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

Фотографии предоставляются в двух вариантах: в тексте статьи и в виде отдельных файлов TIFF и JPEG без сжатия. Название файла должно соответствовать подрисочной 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

О. Е. Пудовиков, Ш. Н. Кахрамонов	Модель для исследования устойчивости вагонов грузового поезда при движении в условиях горно- перевального профиля и ветровых нагрузок	7
А. Е. Афанасьев, Т. А. Афанасьева, Д. М. Деркунова	Совершенствование методики ресурсных испытаний боковых стоек полувагона в части определения испытательной нагрузки	24
Е. В. Соломатин	Теоретические и экспериментальные исследования промежуточных рельсовых скреплений	36
Т. З. Сиукаев, Б. А. Дудин, Ю. Л. Беньяш, М. В. Шевлюгин, В. В. Варичева	Подземная трехфазная линия электропередачи	49
В. А. Чернов, Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн	Влияние упругого элемента буксового узла на ресурс боковой рамы тележки с осевой нагрузкой 25 тс	57
В. В. Варичева, Т. З. Сиукаев, Б. А. Дудин	Инженерная методика определения ЭДС холостого хода тяговых подстанций постоянного тока	69
П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров	Оценка ресурса несущей конструкции маневрового локомотива ТЭМ2 железных дорог Республики Узбекистан	77
А. А. Мигров, Е. В. Опарина	Анализ и синтез механизма стеклоочистителя	93
В. А. Бараусов, В. П. Бубнов, В. И. Моисеев	Имитационная модель физико-химического метода защиты контактного провода от обледенения	107
О. В. Быкова	Влияние природно-климатических условий на работу железнодорожного транспорта на примере Северной железной дороги	120
М. С. Васильевская, А. Е. Цаплин	Разработка комплекса диагностирования подвижного состава электродепо метрополитена с применением тепловизионных и электронных средств	133

П. Г. Колпахчян, А. Ю. Рязанов	Тяговый электродвигатель с постоянными магнитами на роторе: характеристика и перспективы применения в транспортной отрасли	145
Ю. А. Беленцов, В. Д. Ефимов, В. С. Соловьев	Калибровка комплекса автоматизированного ультразвукового контроля полых осей колесных пар SHUTTLE R	158

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Р. С. Кударов, Р. С. Кударов	Центральная предельная теорема в задачах прогнозирования неуспеваемости студентов вузов	172
---------------------------------	---	-----

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

В. М. Шавшуков, М. Т. Рахимов	Экономическая политика зеленой экономики: от энергетических шоков к устойчивому развитию	190
----------------------------------	--	-----

Contents

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

O. E. Pudovikov, Sh. N. Kakhramonov	A Model to Study the Stability of Freight Train Wagons Moving in Conditions of Mountain Pass Profile and Wind Loads	22
A. E. Afanasyev, T. A. Afanasyeva, D. M. Derkunova	Improvement of Gondola Side Pillar Resource Testing Methodology with Respect to Test Load Determination	34
E. V. Solomatin	Theoretical and Experimental Studies of Intermediate Rail Fasteners	46
T. Z. Siukaev, B. A. Dudin, Yu. L. Ben'yash, M. V. Shevlyugin, V. V. Varicheva	Underground Three-Phase Power Transmission Line	55
V. A. Chernov, L. V. Tsyganskaya, D. G. Bein	Influence of the Axle Box Elastic Element on the Life of the Bogie Side Frame at 25 Tonnes Axial Load	66
V. V. Varicheva, T. Z. Siukaev, B. A. Dudin	Engineering Methodology for Determining EMF in Idling DC Traction Substations	75
P. S. Grigoriev, N. S. Kodirov	Estimation of the Service Life of the TEM2 Shunting Locomotive Main Frame on the Uzbekistan Railways	90
A. A. Migrov, E. V. Oparina	Analysis and Synthesis of Windshield Wiper Mechanism	105
V. A. Barausov, V. P. Bubnov, V. I. Moiseev	Simulation Model of a Physical-Chemical Method for Protecting Contact Wires Against Icing	118
O. V. Bykova	The Impact of Natural and Climatic Change on the Railway Transport Operation Focusing on the Severnaya (North) Railway	131
M. S. Vasil'evskaya, A. E. Tsaplin	The Development of a Diagnostics Complex for the Metro Electric Rolling Stock Using Thermal Imaging and Electronic Devices	143

P. G. Kolpakhchyan, A. Yu. Ryazanov	Characteristics of a Traction Motor with Permanent Magnets on the Rotor and Its Potential Application in the Transport Industry	156
--	---	-----

Yu. A. Belentsov, V. D. Yefimov, V. S. Solovyov	Calibration of the Automated Ultrasonic Inspection System for SHUTTLE R Hollow Axle's Wheelsets	169
---	--	-----

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

R. S. Kudarov, R. S. Kudarov	Central Limit Theorem Applied to Predicting Underachievement among University Students	189
---------------------------------	---	-----

ECONOMICS AND MANAGEMENT

V. M. Shavshukov, M. T. Rahimov	Green Economy Policy: from Energy Shocks to Sustainable Development	200
------------------------------------	--	-----

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.4.05

Модель для исследования устойчивости вагонов грузового поезда при движении в условиях горно-перевального профиля и ветровых нагрузок

О. Е. Пудовиков, Ш. Н. Кахрамонов

Российский университет транспорта, Российская Федерация, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ГСП-4

Для цитирования: Пудовиков О. Е., Кахрамонов Ш. Н. Модель для исследования устойчивости вагонов грузового поезда при движении в условиях горно-перевального профиля и ветровых нагрузок // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 7–23. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-7-23

Аннотация

Цель: Представлена модель грузового поезда, предназначенная для анализа устойчивости подвижного состава при движении по горно-перевальным участкам железных дорог, особое внимание уделено влиянию на запасы устойчивости от опрокидывания ветровых нагрузок. Применительно к участку Ангрен — Пап железных дорог Республики Узбекистан, на основании анализа режимных карт, а также информации о весовых нормах, установленных для данного участка, определены участки пути, при движении по которым наиболее выражена склонность вагонов к опрокидыванию, в том числе при действии ветровых нагрузок. В статье подчеркивается значимость эффективной и безопасной эксплуатации подвижного состава для обеспечения сохранности грузов и повышения безопасности в сложных горных условиях, включая крутые подъемы и спуски, а также кривые малого радиуса. **Методы:** Исследуется влияние продольных сил на устойчивость вагонов от опрокидывания, в том числе при воздействии ветра, направленного по нормали к оси пути. Авторами разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее выполнять имитационное моделирование движения поезда различной составности по пути переменного плана и профиля с учетом строительных параметров верхнего строения пути для анализа устойчивости вагонов от опрокидывания. Выполнен анализ полученных результатов, позволивший выявлять опасные участки, с целью последующей корректировки режимов ведения поезда для повышения безопасности движения. Для определения величин сил, действующих на вагоны поезда от воздействия ветра, был выполнен аэродинамический расчет с использованием модели поезда, разработанной в программе моделирования *SolidWorks*. **Результаты:** Определены величины коэффициента аэродинамического сопротивления для вагонов различных типов, найдены опасные участки, при движении по которым возникают предпосылки для потери устойчивости вагонов. **Практическая значимость:** Разработано специализированное программное обеспечение для анализа опасных факторов. Показана возможность оптимизации режимов управления грузовыми поездами для повышения безопасности движения поездов в условиях сложного горного рельефа при воздействии ветровых нагрузок.

Ключевые слова: Горно-перевальной участок, тяговые и тормозные характеристики, специализированное программное обеспечение, *SolidWorks*, *Flow Simulation*, ветровая нагрузка, продольные квазистатические силы, модель поезда, коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания, устойчивость вагонов.

Введение

На сегодняшний день во многих странах мира продолжает развиваться железнодорожный транспорт. Надежная и бесперебойная работа железнодорожного транспорта при перевозке грузов между странами является важным фактором, способствующим постоянному увеличению объема перевозок и сокращению времени доставки грузов.

С растущим объемом транзитных и местных грузовых перевозок увеличивается количество отправляемых грузовых поездов, что способствует более полному использованию наличной провозной и пропускной способности железнодорожной дороги, вплоть до их проектных значений. При исчерпании резервов пропускной способности железных дорог увеличение ее провозной способности может быть достигнуто применением современных, более мощных локомотивов. Данная задача в настоящее время является чрезвычайно актуальной и находится в стадии решения на железных дорогах Республики Узбекистан, в том числе при обеспечении международных мультимодальных транзитных коридоров.

Вместе с этим возрастает значимость факторов, способных составить угрозу безопасности движения поездов. К таким факторам относятся в том числе величины продольных динамических и квазистатических сил, действующих в поезде, способных вызвать разрыв автосцепок в случае превышения ими максимально допустимых по условиям прочности значений. Кроме этого, в этих случаях в поездах возникают условия, способствующие потере устойчивости вагонов и в последствии их сходу с рельсов. Особенно такая ситуация опасна на участках с кривыми малого радиуса и значительным возвышением наружного рельса. Дополнительным часто встречающимся опасным фактором на горно-перевальных участках железных дорог Республики Узбекистан является воздействие на вагоны бокового ветра значительной скорости, увеличивающее вероятность опрокидывания вагонов. В связи с этим исследование и изучение влияния режимов движения, плана и профиля пути, а также влияние ветровой нагрузки на устойчивость вагонов при вождении поездов в горной местности считается актуальной задачей.

Имитационная модель железнодорожного пути

После распада Советского Союза в 1991 году железнодорожное сообщение центральных и западных регионов Республики Узбекистан с восточными регионами, в которых расположена Ферганская долина, было прервано. Возобновление сообщения было возможно только через территорию Республики Таджикистан и потребовало заключения межправительственного соглашения для осуществления местных и транзитных перевозок. Однако постоянные задержки и изменение тарифных ставок снизили интенсивность железнодорожного сообщения до минимума

и практически остановили его в 2001 году, при этом задача по обеспечению основного объема как грузовых, так и пассажирских перевозок легла на автомобильный транспорт. При этом ныне существующая автомобильная трасса не справлялась с растущим объемом грузоперевозок между Ферганской долиной и другими регионами страны. Так, в зимнее время из-за угрозы схода лавин и плохих погодных условий автотрассу периодически закрывали. В связи с этим в 2013 году правительство Республики Узбекистан приняло решение о строительстве новой однопутной электрифицированной железнодорожной линии Ангрен — Пап [1].

На основании постановления № ПП-1985 от 18 июня 2013 года первого президента Республики Узбекистан И. А. Каримова было начато строительство электрифицированной железнодорожной линии Ангрен — Пап [2], являющейся важным звеном международного коридора «Китай — Центральная Азия — Европа». Данная линия является горно-перевальным участком со сложным рельефом и природно-климатическими условиями, проложена на высоте 2200 м над уровнем моря. Железнодорожный участок располагается на горном хребте Курама и пролегает через перевал Камчик. На данном участке вождение грузовых поездов является чрезвычайно сложной задачей из-за особенностей плана и профиля. Так, на отдельных участках пути уклоны при спуске достигают $-29,6\%$, а при подъеме $+28,5\%$, также на участке расположено множество кривых малого радиуса и длины.

Тем не менее достаточно высокий проектный уровень пропускной способности этого участка железной дороги способствует постоянному увеличению объема перевозок (табл. 1), а также сокращению времени доставки грузов и пассажиров до пункта назначения. Особенности плана и профиля пути рассматриваемого участка влекут за собой неравномерный износ оборудования локомотивов и вагонов, ускоренное расходование их ресурса, что приводит к увеличению параметра потока отказов силового и вспомогательного оборудования, узлов и агрегатов в процессе эксплуатации подвижного состава. Все это требует постоянного контроля со стороны локомотивной бригады условий работы оборудования и особенностей реализации силы торможения на спуске и силы тяги при движении на подъеме.

Увеличение объема грузоперевозок потребовало увеличения массы и количества отправляемых грузовых поездов. Для работы в таких сложных условиях эксплуатации локомотивы, находящиеся на тот момент в собственности АО «Узбекистон темир йуллари», не были приспособлены. Отметим, что на момент запуска линии основу парка составляли электровагоны переменного тока, выпущенные в СССР и КНР, — ВЛ80С и O`zbekiston соответственно.

В связи с этим для обеспечения необходимого объема перевозок и достижения проектных значений пропускной способности участка железной дороги, расположенного на горном участке, АО «Узбекистон темир йуллари» приобрело новые современные магистральные электровагоны переменного тока серий *O`ZEL* и *O`ZELR* с асинхронными тяговыми электродвигателями, произведенные в КНР. Данные электровагоны

ТАБЛИЦА 1. Динамика объемов перевезенных грузов железнодорожным транспортом

	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Общий объем перевезенных грузов, тыс. т	86 368,6	86 405,6	95 034	94 789,6	95 400	98 880	102 300	103 400
В том числе:								
ввоз	11 463,1	13 059,9	17 982	18 072,1	20 900	18 660	19 500	19 500
вывоз	6114,3	8007,4	8140	8479,2	10 400	11 900	10 900	11 300
транзит	7976,6	7675,1	7234	7270,9	8100	8510	10 200	10 300
местное сообщение	60 814,6	57 663,2	61 678	60 967,4	56 000	59 810	61 700	62 300

оборудованы тяговыми преобразователями на базе *IGBT*-модулей с водяным охлаждением, с микропроцессорным управлением и возможностью поосного регулирования силы тяги, мощностью соответственно 6000 и 7200 кВт.

Для выполнения исследований авторами было разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее выполнять имитационное моделирование движения поезда на рассматриваемом участке для решения поставленных задач по оценке опасных участков и оптимизации режимов ведения поездов.

В разработанном программном обеспечении создана цифровая копия нечетного направления участка линии Пап-2 — Ангрен. В программе реализован железнодорожный путь длиной 122 км с минимальным шагом дискретизации, примененным при описании кривых малого радиуса, равным 1 м. Основная часть пути описана с шагом 100 м, при этом на каждом шаге учитываются величина уклона, радиус кривых и возвышения наружного рельса, а также величина ограничения скорости движения. На рис. 1, а приведен график высоты пути относительно уровня станции Пап-2. На рис. 1, б приведена экранная копия пользовательского интерфейса разработанного программного обеспечения, соответствующего режиму ввода и редактирования параметров железнодорожного пути.

Закупка новых локомотивов, цифровое имитационное моделирование тяговых и тормозных характеристик

Для исследования движения поезда по рассматриваемому участку в разработанном программном обеспечении были заложены предельные тяговые и тормозные характеристики электровозов *O`ZEL* и *O`ZELR* (рис. 2, а, б), для чего были использованы заводские инструкции по данным типам локомотивов [3].

При вождении грузовых поездов, в особенности на участках со сложным горным планом и профилем, в поездах возникают значительной величины продольные растягивающие и сжимающие силы, оказывающие влияние на безопасность движения. Их опасность заключается в потере устойчивости вагонов и, следовательно, значительном увеличении вероятности схода вагонов с рельсов из-за выжимания или выдергивания. Помимо этого, существенную угрозу безо-

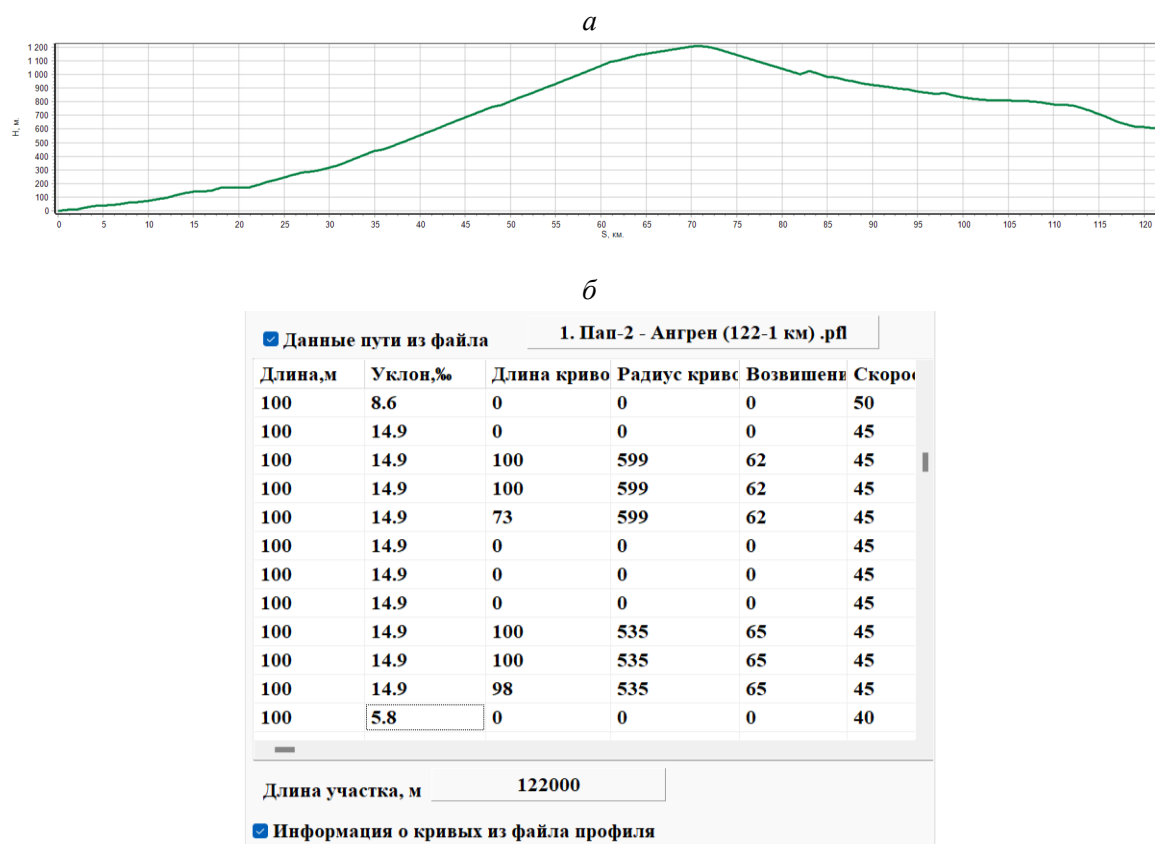


Рис. 1. Построенный горный участок Пап-2 — Ангрен (a) и таблица параметров пути (б) в программном обеспечении

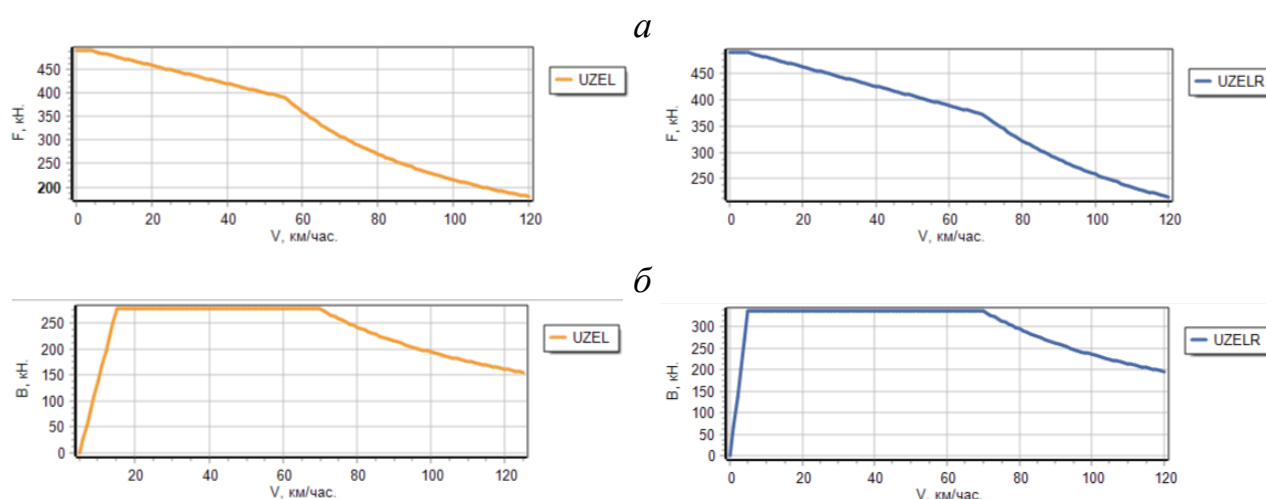


Рис. 2. Тяговая (a) и тормозная (б) характеристика локомотивов O'ZEL и O'ZELR

пасности движения представляет собой возможное опрокидывание вагонов наружу или внутрь кривой, вероятность чего значительно возрастает вследствие ветровой нагрузки на вагоны, достигающей значительных величин в указанных регионах. Таким образом, определение величин продольных растягивающих и сжимающих сил, а также оценка запаса устойчивости от опрокидывания является одним из наиболее важных аспектов исследования.

Решение уравнения движения поезда и расчет величин продольных квазистатических сил, действующих в поезде

Значительные по величине продольные растягивающие или сжимающие силы, возникающие в составе поезда, влияют как на прочность упряжных приборов и рам вагонов, так и на устойчивость против схода вагона с рельсов [4].

Для вычисления величин продольных квазистатических сил, действующих в грузовом поезде, необходимых для оценки запасов устойчивости вагонов против схода при действии растягивающих и сжимающих продольных сил, а также запаса устойчивости от опрокидывания, была применена математическая модель, реализованная в специальном программном обеспечении. В процессе расчетов учитываются типы локомотивов и вагонов, а также длина, масса каждого экипажа и его расположение на различных элементах профиля и плана пути. Подробное описание модели приведено в работах [5, 6].

Расчет величин, характеризующих запасы устойчивости вагонов при действии продольных сил, а также устойчивости от опрокидывания

При движении поезда по пути ломанного профиля, особенно в процессе торможения поезда с головного локомотива, в составе возникают значительные сжимающие силы. При этом возникает перекося вагонов в рельсовой колее, при котором значительно увеличиваются горизонтальные силы, действующие между внутренней поверхностью головки рельса и гребнем набегающей колесной пары, то есть создаются предпосылки для преодоления этими силами сил тяжести и вкатывания гребня колеса на рельс с последующим сходом.

В данной работе рассматривается устойчивость грузовых вагонов, подвергающихся действию продольных сжимающих сил. В качестве критерия устойчивости используется коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельсов при действии сжимающих сил, расчет которого выполняется в соответствии с ГОСТ 33211—2014 «Требования к прочности и динамическим качествам» следующим способом [7].

Движение железнодорожного вагона по криволинейному участку пути сопровождается действием центробежной силы и составляющей силы тяжести, которые при неблагоприятном сочетании с ветровой нагрузкой, а также продольными силами могут привести к опрокидыванию подвижного состава как наружу кривой, так и внутрь. Конструкция вагона и схема закрепления груза, а также устройство верхнего строения пути предполагают достаточный запас устойчивости от опрокидывания. Однако сильный боковой ветер, воздействуя на вагон, создает дополнительную горизонтальную силу, которая может быть направлена как наружу, так и внутрь кривой в зависимости от направления ветра. В результате сложного взаимодействия всех действующих на вагоны сил возникает

результатирующая сила, которая и создает опрокидывающий момент. Для грузовых вагонов коэффициент запаса устойчивости к опрокидыванию определяется в соответствии с ГОСТ 33211—2014 «Требования к прочности и динамическим качествам» следующим способом [7]:

$$K_{\text{yc}} = \frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{дин}}}. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{ст}} = \frac{G_{\text{в}} - 2P_N^{\text{в}}}{2n_{\text{в}}} \quad (2.1) \\ P_{\text{дин}} = \frac{F_{\text{к}}h_{\text{к}} + 2F_{\text{т}}h_{\text{т}} + F_{\text{вк}}h_{\text{вк}} + 2F_{\text{вт}}h_{\text{вт}} + 2P_N^n h_{\text{а}} + G_{\text{к}}\Delta_{\text{к}} + 2G_{\text{т}}\Delta_{\text{т}}}{2Sn_{\text{в}}}, \quad (2.2) \end{array} \right.$$

где $P_{\text{ст}}$ — статическая вертикальная сила, действующая от колеса на рельс, с учетом силы тяжести вагона, Н;

$P_{\text{дин}}$ — динамическая вертикальная сила, действующая от колеса на рельс и перемещений центров тяжести кузова вагона и тележки, Н;

$n_{\text{в}}$ — число осей вагона;

$F_{\text{к}}$ и $F_{\text{т}}$ — боковые силы, действующие соответственно на кузов и тележку, возникающие вследствие центробежного ускорения, Н;

$F_{\text{вк}}$ и $F_{\text{вт}}$ — силы давления ветра, действующие соответственно на кузов и тележку, Н;

$P_N^{\text{в}}$ — вертикальная составляющая продольной силы, действующей на вагон через автосцепку, Н;

P_N^n — боковая составляющая продольной силы, Н;

$G_{\text{в}}$ — сила тяжести вагона, Н;

$G_{\text{к}}$ и $G_{\text{т}}$ — силы тяжести кузова и тележки соответственно, Н;

$h_{\text{к}}$ и $h_{\text{т}}$ — вертикальное расстояние от уровня головок рельсов до центра масс кузова и тележки соответственно, м;

$h_{\text{вк}}$ и $h_{\text{вт}}$ — вертикальное расстояние от уровня головок рельсов до геометрического центра боковой проекции кузова и тележки соответственно, м;

$h_{\text{а}}$ — вертикальное расстояние от уровня головок рельсов до продольной оси автосцепок, м;

$2S$ — расстояние между кругами катания колес в колесной паре, м;

$\Delta_{\text{к}}$ и $\Delta_{\text{т}}$ — боковое перемещение центров тяжести кузова и тележки, м;

В данной работе при определении величины динамической составляющей вертикальной силы $P_{\text{дин}}$, учитывающей действие ветровой нагрузки $F_{\text{вк}}h_{\text{вк}} + 2F_{\text{вт}}h_{\text{вт}}$, будем определять с использованием результатов, полученных при выполнении

аэродинамических расчетов в программном пакете *Solidworks Flow Simulation*, о чем будет сказано далее в настоящем материале. Тогда выражение (2.2) приобретает вид:

$$P_{\text{дин}} = \frac{F_{\text{к}} h_{\text{к}} + 2F_{\text{т}} h_{\text{т}} + F_{\text{в}} h_{\text{к}} + 2P_{\text{н}}^n h_{\text{а}} + G_{\text{к}} \Delta_{\text{к}} + 2G_{\text{т}} \Delta_{\text{т}}}{2Sn_{\text{в}}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{в}}$ — силы давления ветра, действующие соответственно на вагон поезда, определенные с использованием результатов аэродинамического расчета, Н;

Моделирование ветровой нагрузки

Как отмечалось ранее, существенным фактором, влияющим на безопасность движения поездов в условиях движения в ряде регионов, является ветровая нагрузка. Силовой фактор от действующей ветровой нагрузки зависит от скорости и направления ветра, формы и площади поверхности объекта и ряда других факторов.

В работе для определения величин сил, действующих на вагоны поезда в поперечном направлении и вызванных ветровой нагрузкой, была выполнена серия расчетов с использованием модели поезда, разработанной в программе моделирования *SolidWorks*. Для исследования были выбраны цистерна модели 15-2132, полувагон модели 12-132 и крытый вагон модели 11-2135-01, после чего для каждого типа подвижного состава была разработана его геометрическая модель. Далее в приложении *SolidWorks Flow Simulation* был выполнен аэродинамический расчет, позволивший определить величину коэффициента аэродинамического сопротивления вагонов поезда при воздействии на них ветра [8]. Расчет был выполнен при воздействии на вагоны поезда ветра со скоростью 15 м/с при температуре окружающей среды 20 °С, в качестве примера на рис. 3 приведен график зависимости величины силы, действующей на вагоны-цистерны, от номера вагона при угле между вектором скорости ветра и осью пути, составляющем 90 градусов. При данных начальных условиях величины сил, действующих на вагоны поезда, незначительно отличаются друг от друга при изменении номера вагона (за исключением первого и последнего экипажей в поезде), однако значительно зависят от типа исследованного вагона (рис. 3).

Для определения коэффициента аэродинамического сопротивления была использована известная формула [9]:

$$F_{\text{в}} = C \frac{\rho v_{\text{в}}^2}{2} S_{\text{п}}, \quad (4)$$

где $v_{\text{в}}$ — скорость ветра, м/с;
 ρ — плотность воздуха, кг/м³;
 $S_{\text{п}}$ — площадь боковой проекции вагона, м²;
 C — коэффициент аэродинамического сопротивления.

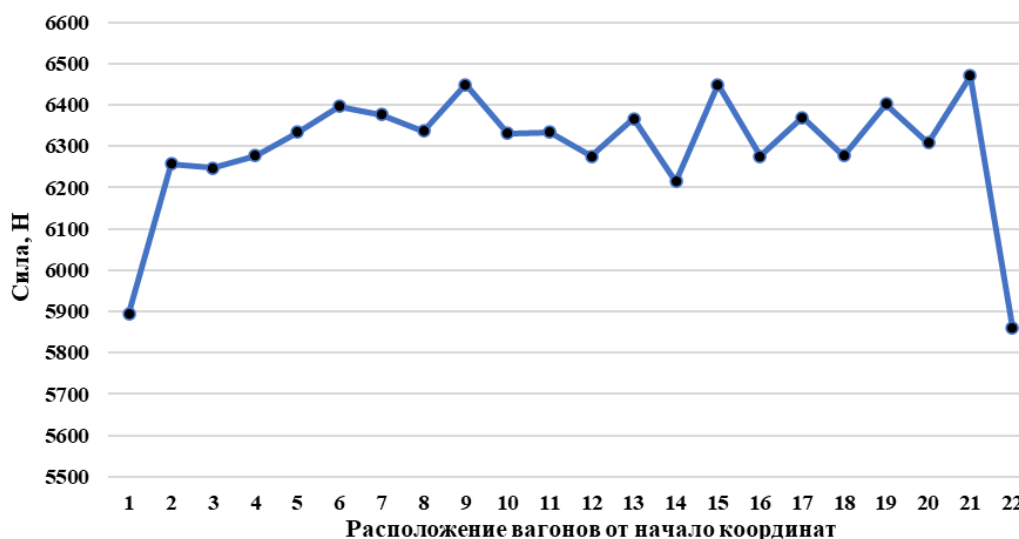


Рис. 3. Силы, действующие на состав из вагонов-цистерн

В табл. 2 приведены значения величин коэффициента аэродинамического сопротивления для вагонов исследованных типов при направлении ветра 90° относительно оси пути.

ТАБЛИЦА 2. Значения величин коэффициента аэродинамического сопротивления для вагонов разных типов

Коэффициент аэродинамического сопротивления при направлении ветра 90° к оси пути	Тип вагона		
	крытый	полувагон	цистерна
С	0,867	1,118	1,039

Как видно из таблицы, в ряде случаев величина коэффициента аэродинамического сопротивления превышает 1, поэтому величины сил, действующих на вагоны поезда и определенных с использованием найденного в результате выполнения расчета коэффициента аэродинамического сопротивления, более чем на 10 % отличаются от величин сил, определенных в соответствии со стандартной методикой, предполагающей их определение без учета данного коэффициента [9].

С использованием полученных значений коэффициента аэродинамического сопротивления для произвольного значения скорости могут быть найдены величины сил, действующих на вагоны поезда, которые в последующем используются при определении величин коэффициентов запаса устойчивости от опрокидывания (динамической составляющей вертикальной силы) в формуле (3).

С целью определения опасных климатических факторов были проанализированы погодные условия на железнодорожном участке Пап-2 — Ангрен. Из совокупности данных выделена информация о наибольшем зарегистрированном значении скорости ветра за последние 20 лет [10]. Полученные результаты приведены на рис. 4.

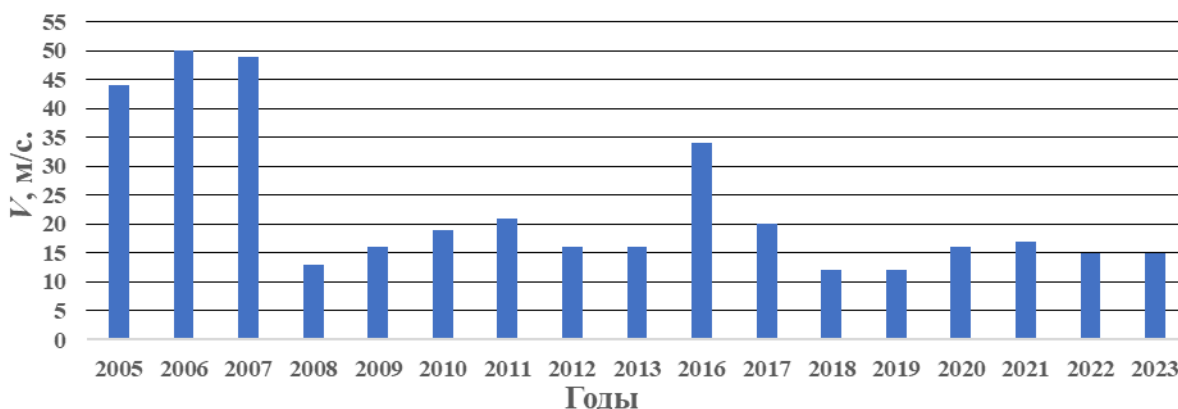


Рис. 4. Максимальные значения скорости ветра на горно-перевальном железнодорожном участке Пап-2 — Ангрен

Как видно, на протяжении последних 20 лет самые высокие скорости ветра были зафиксированы в 2006 и 2007 годах, когда они составили соответственно 50 и 49 м/с, в дальнейшем произошло практически двукратное снижение значений пиковых скоростей ветра, однако нельзя исключать повторения более опасных скоростей ветра. В связи с этим дальнейшие расчеты были выполнены с учетом скоростей ветра, составляющих 22 м/с.

Анализ результатов расчетов и моделирование

В специализированном программном обеспечении было исследовано движение грузового поезда, состоящего из двух локомотивов серии *O`ZELR* и 55 одно-типных порожних вагонов-цистерн модели 15-2132. Параметры поезда выбраны исходя из нормативной документации по условной длине и весу грузового поезда в данном участке пути [11]. Общий вес грузового поезда составил 1761 тонну, длина поезда — около 705 метров. Скорость ветра, воздействующего на грузовой поезд, принята равной 22 м/с при температуре окружающей среды 20 °С. Было исследовано движение поезда по участку с профилем и планом, соответствующим аналогичным параметрам участка Пап-2 — Ангрен (рис. 1, а). Движение поезда осуществлялось в режиме поддержания скорости в соответствии со значениями, установленными режимной картой данного участка [12]. В результате выполнения расчетов были найдены зависимости от координаты силы тяги $F_k(s)$, скорости $V(s)$, коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельсов при выжимании вагона $K_{yc}(s)$ и коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания $K_{yco}(s)$. Данные графики приведены на рис. 5, а–в, 6.1, а–в и 6.2, а–в соответственно.

Расчеты показали, что минимальное значение коэффициента запаса устойчивости от схода при выжимании достигает на всей протяженности пути величины $K_{yc} = 1,5$ (рис. 5, в) при движении по прямому участку пути на спуске $i = -25,1 \text{ ‰}$, в режиме торможения с тормозной силой $\hat{A} = 600 \text{ кН}$ (рис. 5, а) для снижения

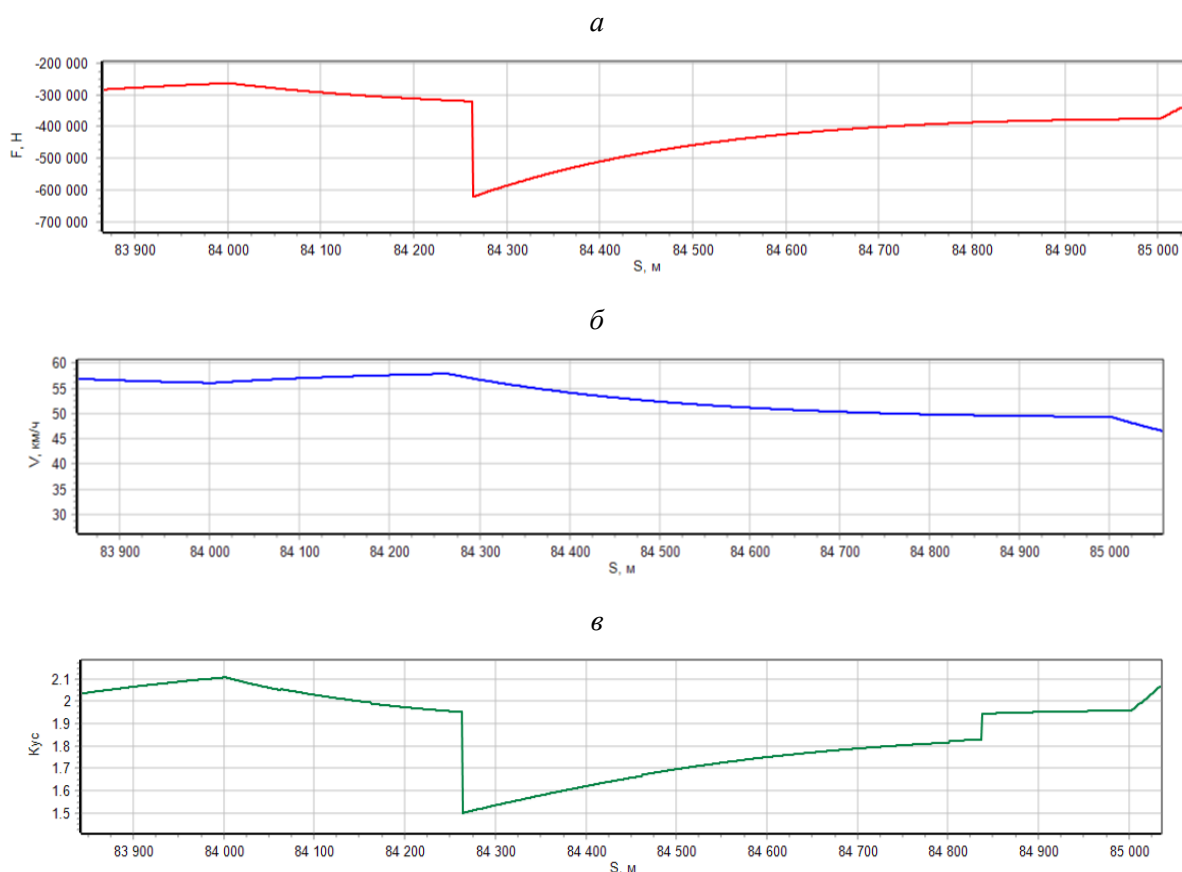


Рис. 5. Графики изменения силы тяги локомотива F_k (а), скорости подвижного состава (б), устойчивости вагона от схода при выжимании K_{yc} без влияния силы ветра (в) в пути

скорости от $v = 57,78$ км/час до $v = 45$ км/час (рис. 5, б). Таким образом, запас устойчивости грузового поезда от схода с рельсов при выжимании остается достаточным, превышая установленный предельно допустимый минимум, равный $K_{yc} = 1,3$ [7].

Приведенный анализ результатов по определению коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания в условиях движения при воздействии бокового ветра выявил 2 критических случая (рис. 6.1 и 6.2), которые могут повлиять на безопасность движения грузового поезда на данном участке пути.

В первом случае было выявлено, что коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания наружу кривой при воздействии бокового ветра на грузовой поезд снижается ниже допустимого минимального уровня, составляющего $K_{yc0} = 1,3$ и достигает $K_{yc0} = 1,21$ (рис. 6.1, в). Это происходит при движении грузового поезда по кривому участку с радиусом 308 м и возвышением наружного рельса 40 мм с максимальной скоростью $v = 59,47$ км/час (рис. 6.1, б). Величина коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания снижается при движении по площадке с максимальной установленной для данного участка скоростью [12], между отметками пути с координатами 15 200 м и 15 700 м. Сила тяги при этом сначала

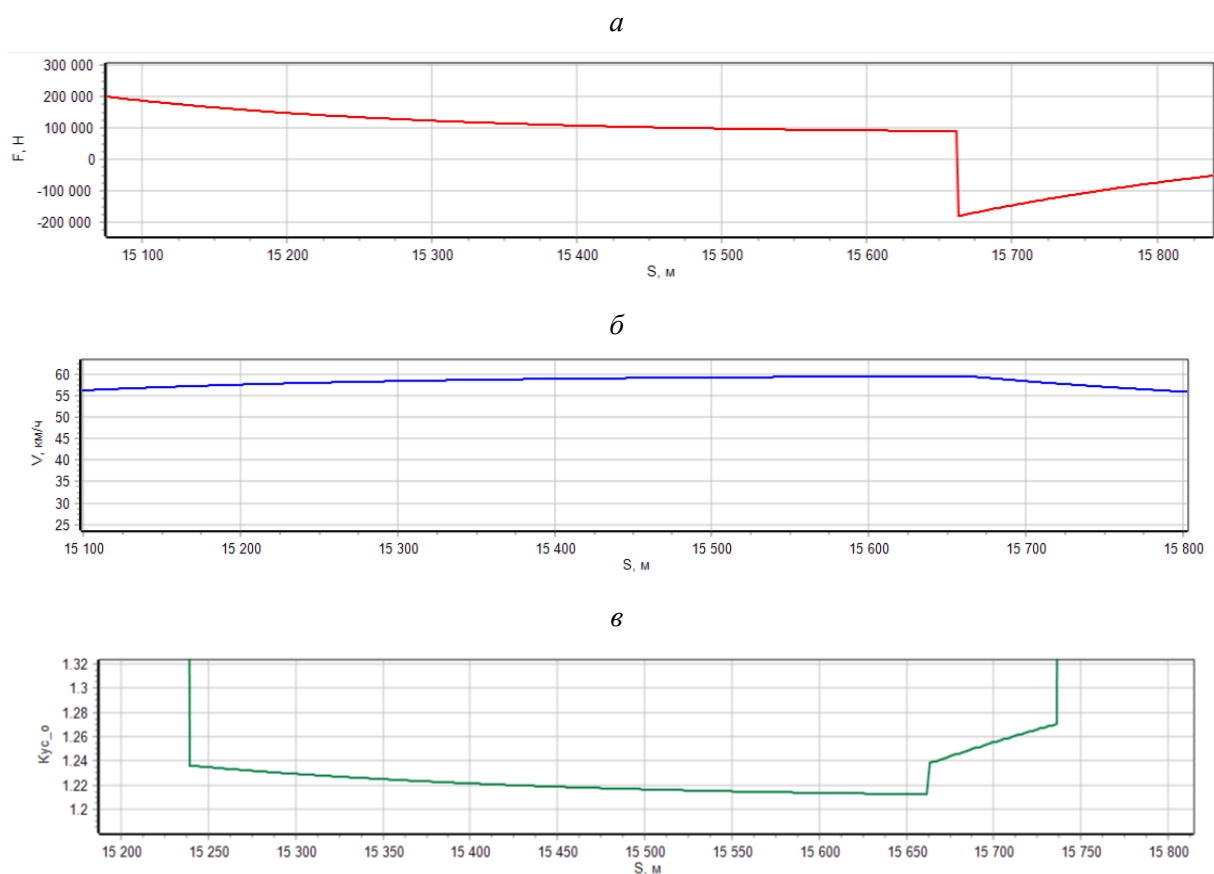


Рис. 6.1. Графики изменения силы тяги локомотива F_k (а), скорости подвижного состава (б), устойчивости вагона от опрокидывания K_{yc_0} с влиянием силы ветра (в) к пути

равномерно уменьшается от 580 до 90 кН, после чего локомотив переходит в режим торможения с увеличением тормозной силы до 180 кН, необходимой для снижения скорости движения (рис. 6.1, а).

Во втором случае также было определено, что коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания наружу кривой под воздействием бокового ветра снижается ниже допустимого минимального уровня, достигая значения $K_{yc_0} = 1,27$ и $K_{yc_0} = 1,24$ (рис. 6.2, в). Как и ранее, данная ситуация возникает при движении грузового поезда по кривым участкам пути с радиусом 307 м и 302 м, с возвышением наружного рельса 53 мм и 38 мм соответственно с максимальной скоростью $v = 58,82$ км/час (рис. 6.2, б). Снижение коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания происходит на спуске $i = -18,1 \%$, когда грузовой поезд переходит с одного кривого участка пути в другой с максимальной скоростью по координате от 83 300 до 83 850 м. График изменения силы, реализуемой тяговым электроприводом при движении по данному участку, приведен на рис. 6.2, а.

Для предотвращения возникновения ситуаций, угрожающих безопасности движения поездов, целесообразно выполнять корректировку режимов движения при нахождении поезда в кривой малого радиуса. К таким мероприятиям относятся:

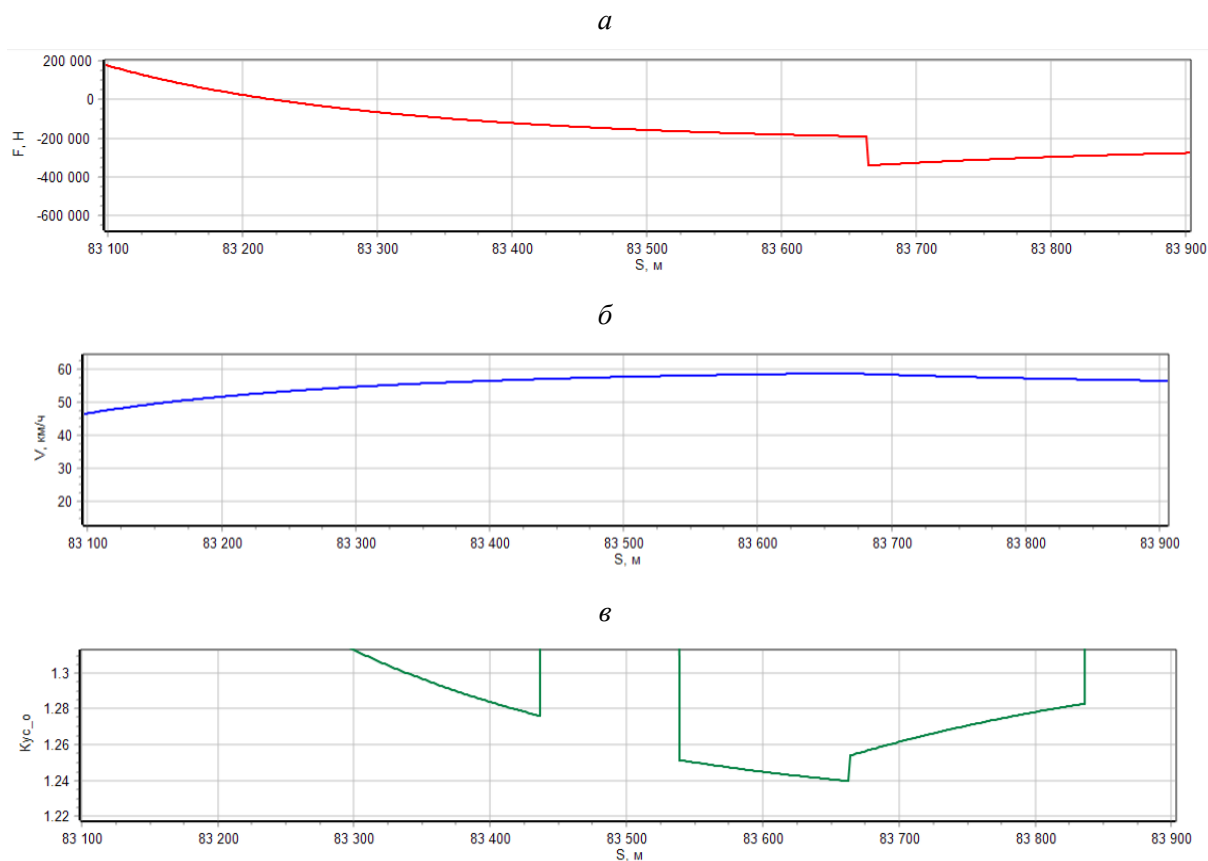


Рис. 6.2. Графики изменения силы тяги локомотива F_k (а), скорости подвижного состава (б), устойчивости вагона от опрокидывания K_{ycp} с влиянием силы ветра (в) к пути

1. Корректировка скорости грузового поезда в кривых малого радиуса для повышения коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания при воздействии бокового ветра. Выполненные расчеты показали эффективность предлагаемого мероприятия. Так, при движении по последнему из рассмотренных участков снижение величины заданной скорости с 59,47 до 49 км/ч и с 58,82 до 50 км/ч привело к соответствующему снижению величин продольных сил и увеличению коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания подвижного состава с $K_{ycp} = 1,21$ до $K_{ycp} = 1,38$ и с $K_{ycp} = 1,24$ до $K_{ycp} = 1,33$ соответственно, то есть до уровня, допустимого по условиям безопасности движения.

2. Внедрение систем мониторинга и управления движением, позволяющих заранее предсказывать и корректировать параметры движения грузового поезда в горных условиях.

Также целесообразно внедрение ряда организационных мероприятий, способствующих повышению безопасности движения поездов в горных условиях, а именно:

– проведение тренингов для локомотивных бригад по безопасному и эффективному управлению составами в условиях сложного рельефа и ветровых нагрузок, включая техники управления и реакции на изменения в поведении поезда;

– проведение регулярных проверок состояния инфраструктуры и подвижного состава для выявления и устранения недостатков, влияющих на безопасность движения;

– установка ветровых экранов: то есть использование специальных экранов вдоль железнодорожных путей в ветреных районах для уменьшения скорости ветра, действующего на грузовые поезда.

Заключение

В результате проведенного исследования устойчивости вагонов грузового поезда в условиях горно-перевального профиля и при воздействии ветровых нагрузок было установлено, что величины продольных сил существенно влияют на обеспечение безопасности движения. Разработанное специализированное программное обеспечение для цифрового имитационного моделирования позволяет эффективно анализировать поведение поездов в сложных условиях, заранее выявляет при моделировании потенциально опасные участки железнодорожной пути, что позволяет оптимизировать управление движением и улучшить режимы ведения поездов. Результаты работы подчеркивают необходимость комплексного подхода к обеспечению безопасности железнодорожного транспорта, что является особенно актуальным в условиях постоянно увеличивающихся объемов грузоперевозок при сложных природных условиях. Внедрение предложенных мероприятий может значительно снизить риски, связанные с потерей устойчивости вагонов, и повысить общую надежность грузовых перевозок. Таким образом, результаты данного исследования могут служить основой для дальнейших разработок в области повышения надежности и безопасности грузовых перевозок, что, в свою очередь, способствует устойчивому и эффективному развитию железнодорожного транспорта в сложных природно-климатических условиях.

Список источников

1. Умаров Х. К. Увеличение пропускной способности лимитирующего перегона линии Ангрен — Пап / Х. К. Умаров, Е. С. Свинцов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 2(43). — С. 84–90.

2. Постановление Президента Республики Узбекистан от 18.06.2013 № ПП-1985 «О мерах по организации строительства электрифицированной железнодорожной линии «Ангрен — Пап». — URL: <https://lex.uz/acts/2756024> (дата обращения: 09.09.2024).

3. Инструкция по эксплуатации электровозов UZEL и UZELR. — Ташкент: АО «УТЙ», 2013. — 122 с.

4. Вершинский С. В. Динамика вагона: учебник для вузов ж.-д. трансп. / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов; под ред. С. В. Вершинского. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1991. — 360 с.
5. Кахрамонов Ш. Н. Математическая модель поезда для исследования квазистатических продольных сил в грузовом поезде при движении по горно-перевальному профилю / Ш. Н. Кахрамонов, О. Е. Пудовиков, Н. О. Жухин // Повышение эффективности использования подвижного состава железных дорог. — 2024. — С. 11–23.
6. Кахрамонов Ш. Н. Влияния режимов движения и профиля пути на величины квазистатических сил в грузовом поезде на горных участках / Ш. Н. Кахрамонов, О. Е. Пудовиков, Н. О. Жухин // Молодая наука Сибири. — 2024.
7. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. — М.: Стандартиформ, 2016. — 54 с.
8. Алямовский А. А. Инженерные расчеты и SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 464 с.
9. Петров К. П. Аэродинамика тел простейшей формы / К. П. Петров. — М.: Физматлит, 1998. — 428 с.
10. Архив погоды в Камчике. — URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Камчике (дата обращения: 15.09.2024).
11. Нормативная документация по условной длине и весу грузового поезда. — Ташкент: АО «УТЙ», 2024. — 12 с.
12. Нормативная документация по установленной скорости грузовых и пассажирских поездов. — Ташкент: АО «УТЙ», 2022. — 7 с.

Дата поступления: 15.02.2025

Решение о публикации: 25.03.2025

Контактная информация:

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич — д-р техн. наук, доц.; oleger@mail.ru

КАХРАМОНОВ Шохрух Наримон угли — аспирант; qahramonovsh1995@gmail.com

A Model to Study the Stability of Freight Train Wagons Moving in Conditions of Mountain Pass Profile and Wind Loads

O. E. Pudovikov, Sh. N. Kakhramonov

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obratsova str., OCP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Pudovikov O. E., Kakhramonov Sh. N. A Model to Study the Stability of Freight Train Wagons Moving in Conditions of Mountain Pass Profile and Wind Loads. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 7–23. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-7-23

Summary

Purpose: A freight train model is presented to analyze the train stability moving on mountainous railway sections. Special attention is paid to the impact of wind loads on the safety factor against overturning. On the Angren — Pape railway, Republic of Uzbekistan, the railway sections with the most pronounced tendency of wagons to overturn, especially under the action of wind loads, have been identified based on the analysis of operational maps and information on weight standards established for this section. This article highlights the importance of efficient and safe operation of rolling stock to ensure cargo safety in difficult mountain conditions including steep climbs and descents and small-radius curves. **Methods:** The influence of longitudinal forces on the stability of wagons against overturning was investigated including the exposure to winds acting along the normal axis of the track. The authors have developed a specialized software that allows performing simulation modelling of the movement of trains of different composition on a track with variable plan and profile taking into account the construction parameters of the track superstructure for the stability analysis of the wagons. The results obtained were analyzed allowing dangerous sections to be identified and the train operating modes to be further adapted to improve transport safety. To determine the magnitude of the wind forces acting on the train wagons, an aerodynamic calculation was performed using a train model developed in the SolidWorks modelling programme. **Results:** The values of the aerodynamic drag coefficients for different types of wagons have been calculated and the dangerous sections with the most pronounced wagon overturning tendency have been identified. **Practical significance:** Specialized software has been developed for the hazard analysis. The possibility of optimizing freight train control modes to improve train safety in complex mountainous terrain under the influence of wind loads has been demonstrated.

Keywords: Mountain pass area, traction and braking characteristics, specialized software, SolidWorks, Flow Simulation, wind load, longitudinal quasi-static forces, train model, safety factor against overturning, stability of wagons.

References

1. Umarov Kh. K., Svintsov E. S. Uvelichenie propusknoy sposobnosti limitiruyushchego pereгона linii Angren — Pap [Increasing the capacity of the limiting section of the Angren — Pap line]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2015, Iss. 2(43), pp. 84–90. (In Russian)

2. *Postanovlenie Prezidenta Respubliki Uzbekistan ot 18.06.2013 № PP-1985 “O merakh po organizatsii stroitel'stva elektrifitsirovannoy zheleznodorozhnoy linii “Angren — Pap”* [Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated 18.06.2013 № PP-1985 “On measures to organize the construction of the electrified railway line “Angren — Pap”]. Available at: <https://lex.uz/acts/2756024> (accessed: September 9, 2024). (In Russian)

3. *Instruktsiya po ekspluatatsii elektrovozov UZEL i UZELR* [Operating instructions for UZEL and UZELR electric locomotives]. Tashkent: AO “UTY”, 2013, 122 p. (In Russian)
4. Vershinskiy S. V., Danilov V. N., Khusidov V. D. *Dinamika vagona: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp.; pod red. S. V. Vershinskogo, 3-e izd., pererab. i dop.* [Car dynamics: a textbook for higher education institutions of railway transport; edited by S. V. Vershinsky, 3rd ed., revised and enlarged]. Moscow: Transport Publ., 1991, 360 p. (In Russian)
5. Kakhramonov Sh. N., Pudovikov O. E., Zhukhin N. O. Matematicheskaya model’ poezda dlya issledovaniya kvazistaticheskikh prodol’nykh sil v gruzovom poezde pri dvizhenii po gornopereval’nomu profilu [Mathematical model of a train for studying quasi-static longitudinal forces in a freight train moving along a mountain pass profile]. *Povyshenie effektivnosti ispol’zovaniya podvizhnogo sostava zheleznikh dorog* [Improving the efficiency of using rolling stock of railways]. 2024, pp. 11–23. (In Russian)
6. Kakhramonov Sh. N., Pudovikov O. E., Zhukhin N. O. Vliyaniya rezhimov dvizheniya i profilya puti na velichiny kvazistaticheskikh sil v gruzovom poezde na gornykh uchastkakh [Effects of traffic modes and track profile on the magnitude of quasi-static forces in a freight train on mountainous sections]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia]. 2024. (In Russian)
7. *GOST 33211—2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST 33211—2014. Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2016, 54 p. (In Russian)
8. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety i SolidWorksSimulation* [Engineering calculations and SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2010, 464 p. (In Russian)
9. Petrov K. P. *Aerodinamika tel prosteyshyey formy* [Aerodynamics of bodies of the simplest form]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1998, 428 p. (In Russian)
10. *Arkhiv pogody v Kamchike* [Weather archive in Kamchik]. Available at: https://rp5.ru/Arkhiv_pogody_v_Kamchike (accessed: September 15, 2024). (In Russian)
11. *Normativnaya dokumentatsiya po uslovnoy dline i vesu gruzovogo poezda* [Regulatory documentation on the nominal length and weight of a freight train]. Tashkent: AO “UTY”, 2024, 12 p. (In Russian)
12. *Normativnaya dokumentatsiya po ustanovlennoy skorosti gruzovykh i passazhirskikh poezdov* [Regulatory documentation on the established speed of freight and passenger trains]. Tashkent: AO “UTY”, 2022, 7 p. (In Russian)

Received: February 15, 2025

Accepted: March 25, 2025

Author’s information:

Oleg E. PUDOVIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; olegep@mail.ru

Shohruh N. KAHRAMONOV — Postgraduate Student; qahramonovsh1995@gmail.com

УДК 629.463.62

Совершенствование методики ресурсных испытаний боковых стоек полувагона в части определения испытательной нагрузки

А. Е. Афанасьев¹, Т. А. Афанасьева², Д. М. Деркунова¹

¹ООО «Испытательный Центр продукции вагоностроения Инженерного Центра подвижного состава», Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 108

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

Для цитирования: Афанасьев А. Е., Афанасьева Т. А., Деркунова Д. М. Совершенствование методики ресурсных испытаний боковых стоек полувагона в части определения испытательной нагрузки // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 24–35. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-24-35

Аннотация

Цель: Существующая методика расчета динамической нагрузки применяется для свободностоящих стоек, на которые не влияют другие несущие элементы конструкции кузова, такие как торцевые стены, верхняя обвязка, обшивка боковой стены и др. Целью настоящей работы является совершенствование методики ресурсных испытаний боковых стоек полувагона в части определения испытательной нагрузки. **Методы:** Выполнен анализ существующих методик ресурсных испытаний узлов заделок стоек полувагонов. Для оценки напряженного состояния боковых стоек были проведены расчеты нагрузки на стойки боковой стены полувагона с учетом влияния составных частей кузова полувагона на напряженное состояние узла заделки стойки. Определено влияние верхней обвязки и торцевой стены на заделку стойки, рассчитана прочность нескольких моделей полувагонов с учетом заделки в торцевую стену и без нее. Проведено моделирование расчета прочности полувагона с помощью специализированного программного комплекса, с целью определения влияния верхней обвязки торцевых стен на напряженное состояние кузова. **Результаты:** Проведенные испытания показали валидность методики. В результате апробации данной методики был подтвержден срок службы узлов заделки стойки полувагонов 32 года. В ходе испытаний подтверждено влияние торцевых стен на снижение напряжений в стойках боковых стен. **Практическая значимость:** Боковая стойка является ключевым элементом каркаса полувагона, который принимает основную часть распорных нагрузок при транспортировке грузов. Усовершенствованная методика представляет собой комплексную систему мероприятий, направленных на проверку надежности и долговечности конструкции, и позволит обеспечить безопасность эксплуатации полувагонов.

Ключевые слова: Полувагон, ресурсные испытания, расчет, методика, боковые стойки, узел заделки стойки.

По официальным данным, грузооборот железнодорожным транспортом в 2023 году составил 2638 млрд т · км, а количество перевезенных грузов — 1365 млн т [1]. В 2024 году произошел масштабный выпуск полувагонов (28,4 тыс. ед.), рост составил 43 % относительно аналогичного периода прошлого года [2].

Успешное развитие транспортной отрасли в области перевозки грузов и развития грузооборота напрямую зависит от качества и надежности подвижного состава. В результате снижаются риски простоев и аварий, что особенно важно для своевременной доставки грузов.

Одним из важных этапов проверки качества вагонов является проведение ресурсных испытаний, которые позволяют убедиться в надежности и безопасности конструкции. Целью настоящей работы является совершенствование методики ресурсных испытаний боковых стоек полувагона в части определения испытательной нагрузки, которые соответствуют конкретной конструкции полувагона и условиям его эксплуатации.

Боковая стойка является ключевым элементом каркаса полувагона, который принимает на себя основную часть распорных нагрузок при транспортировке грузов. Для обеспечения безопасности эксплуатации вагонов определяют количественные характеристики сопротивления усталости боковой стойки в соответствии с существующей методикой, которая представляет собой комплексную систему мероприятий, направленных на проверку надежности и долговечности конструкции. Она включает в себя широкий спектр испытаний (в том числе стендовые) и требует применения современного оборудования. Эффективное проведение испытаний позволяет гарантировать безопасность эксплуатации вагонов и повышает конкурентоспособность отечественных производителей на мировом рынке.

В ходе разработки методики стендовых испытаний стоек полувагона определялись величины испытательных нагрузок, действующих на боковую стойку в соответствии с известной схемой приложения нагрузок [3–5]. Нагрузка P на боковую стойку определялась из условия равенства изгибающих моментов, возникающих в заделке стойки при фактическом нагружении в эксплуатации и при испытаниях, в соответствии со справочником [6].

Таким образом, сила P определяется по формуле (1):

$$P = \frac{qy^2}{6h}, \quad (1)$$

где q — распределенная нагрузка на стойку, Н/м;

y — высота стойки, м;

P — эквивалентная распорная сила, действующая на стойку при испытаниях, Н;

h — высота приложения силы P , рекомендуется принимать на $1/3$ высоты стойки (допускается принимать другое значение h , в данном случае принято значение $h = 0,75$ м).

Полученная по формуле (1) сила справедлива для расчета свободностоящих стоек, без учета влияния заделки верхней обвязки и торцевой стены, что может привести к недооценке или переоценке реальных нагрузок и напряжений в конструкции. Так, например, верхняя обвязка кузова полувагона создает дополнительные связи, которые могут перераспределять нагрузки и уменьшать или увеличивать изгибающие моменты на стойках. Торцевая стена может воспринимать часть распорной нагрузки, передаваемой на боковые стойки.

Отработка методики испытаний заделок стоек проведена на нескольких моделях полувагонов (новой конструкции и серийно выпускаемой). В результате необходимо было сравнить новую конструкцию с серийно выпускаемой с точки зрения ресурса рассматриваемого узла.

В рамках проведенных исследований влияния заделки верхней обвязки и торцевой стены на прочность конструкции были выполнены расчеты прочности нескольких моделей полувагонов (новой конструкции и серийно выпускаемой) от действия распорной силы с учетом заделки в торцевую стену и без нее (рис. 1), согласно требованиям норм и ГОСТ 33211 [7, 8]. Это позволило оценить, как эти элементы влияют на распределение нагрузок и напряжений в заделках стоек.

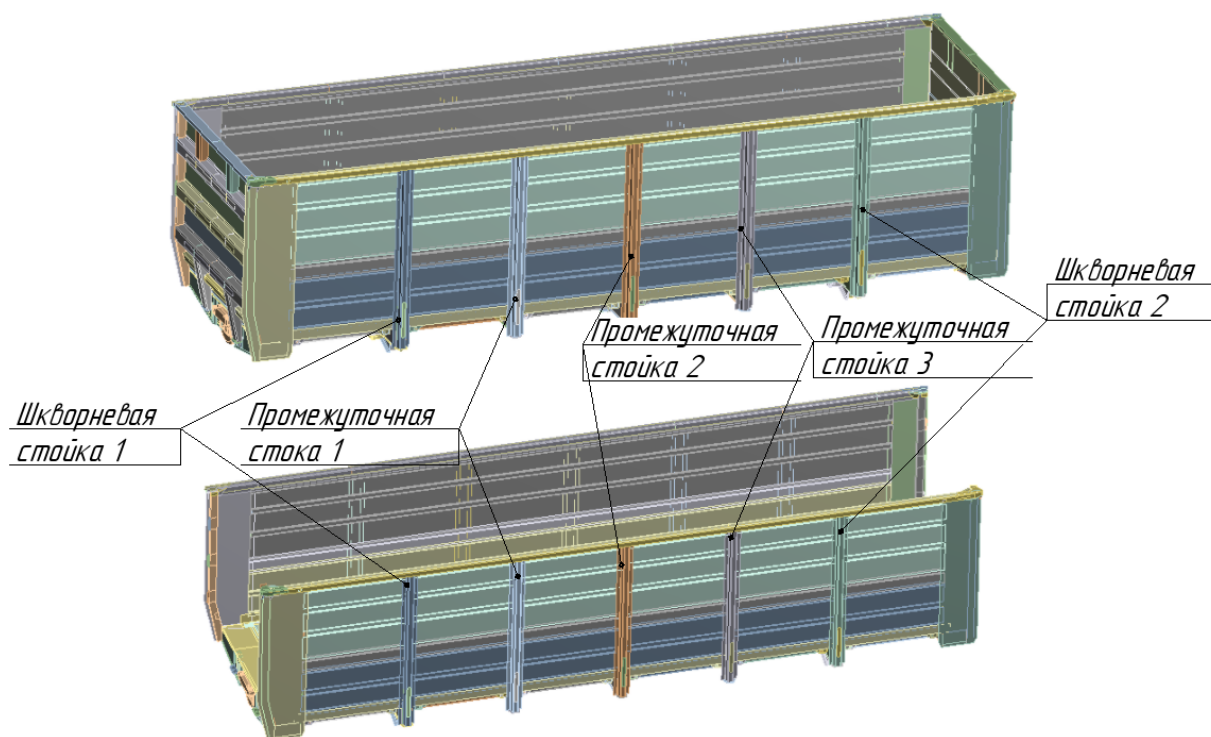


Рис. 1. Объемные твердотельные модели для расчета

Полученные результаты расчетов показали разницу в значении максимальных напряжений на внешней стороне стойки вдали от концентраторов напряжений и позволили вычислить коэффициент влияния заделки верхней обвязки и торцевых стен на напряжения в стойках (табл. 1, рис. 2, 3).

В ходе расчетов были определены коэффициенты влияния торцевых стен, которые позволяют уточнить формулу (1). При расчете были использованы наибольшие коэффициенты для промежуточных и шкворневых стоек полувагона, поскольку они рассматриваются как самый неблагоприятный случай нагружения. Эти коэффициенты отражают степень снижения или увеличения напряжений в стойках за счет взаимодействия с верхней обвязкой и торцевыми стенами.

ТАБЛИЦА 1. Эквивалентные напряжения и коэффициент влияния заделки
верхней обвязки и торцевых стен

Элемент	Эквивалентные напряжения с учетом торцевых стен, МПа		Эквивалентные напряжения без учета торцевых стен, МПа		Коэффициент влияния учета торцевых стен, W	
	Новый	Серийный	Новый	Серийный	Новый	Серийный
Шкворневая стойка 1	41,935	37,477	71,624	61,779	0,585	0,607
Промежуточная стойка 1	47,293	31,131	53,251	36,549	0,888	0,852
Промежуточная стойка 2	52,222	35,829	53,679	34,637	0,973	1,034
Промежуточная стойка 3	—	35,681	—	34,510	—	1,034
Промежуточная стойка 4	46,511	31,432	52,886	36,971	0,879	0,850
Шкворневая стойка 2	43,868	39,438	73,408	63,109	0,598	0,625

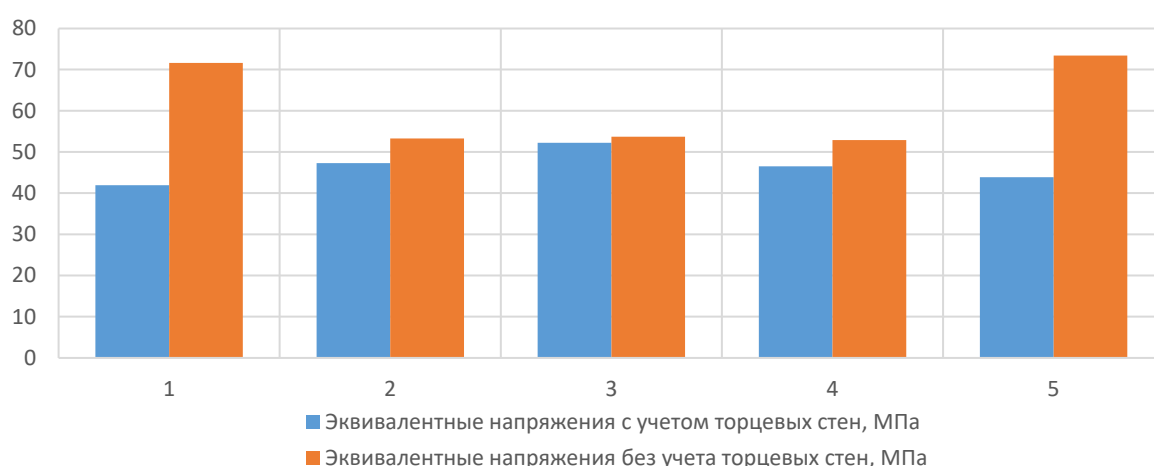


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в стойках полувагона новой конструкции:
1 — шкворневая стойка 1; 2 — промежуточная стойка 1; 3 — промежуточная стойка 2; 4 — промежуточная стойка 4; 5 — шкворневая стойка 2

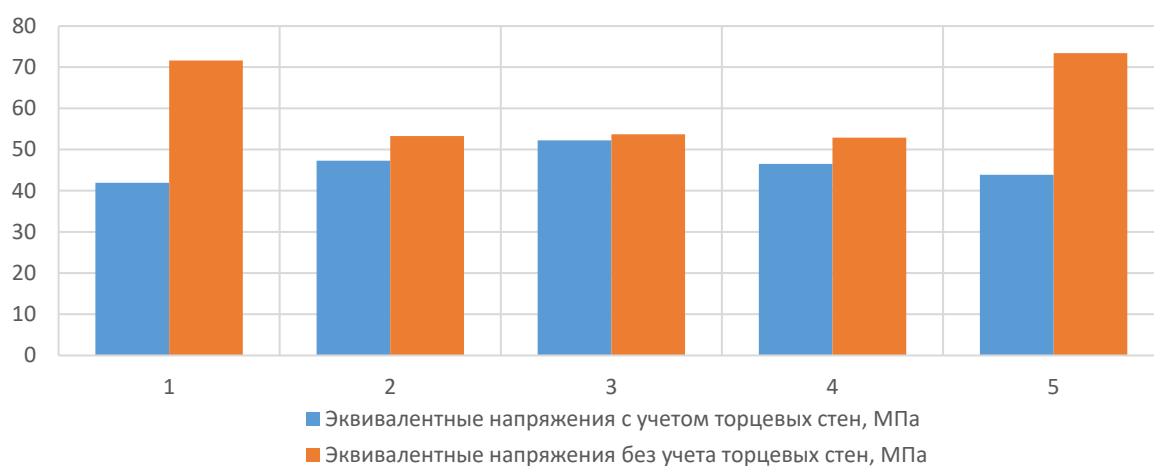


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в стойках серийно выпускаемого полувагона:
1 — шкворневая стойка 1; 2 — промежуточная стойка 1; 3 — промежуточная стойка 2; 4 — промежуточная стойка 3; 5 — промежуточная стойка 4; 6 — шкворневая стойка 2

Сила P с учетом коэффициента W определяется по формуле (2):

$$P = \frac{qy^2}{6h} W. \quad (2)$$

Полученные результаты расчета нагрузок, действующих на стойку, приведены в табл. 2 и на рис. 4.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета нагрузок на стойку

Наименование параметра	Обозначение	Значение параметра				
		шкворневая		промежуточная		
		Новый	Серийный	Новый		Серийный
				1	2	
Распределенная нагрузка на стойку, Н/м	q	28 843	25 215	26 416	26 786	22 256
Эквивалентная распорная сила, действующая на стойку при испытаниях по формуле (1), Н	P	43 529	33 251	39 866	40 242	29 349
Эквивалентная распорная сила, действующая на стойку при испытаниях по формуле (2), Н	P	26 012	20 779	35 406	39 327	30 359

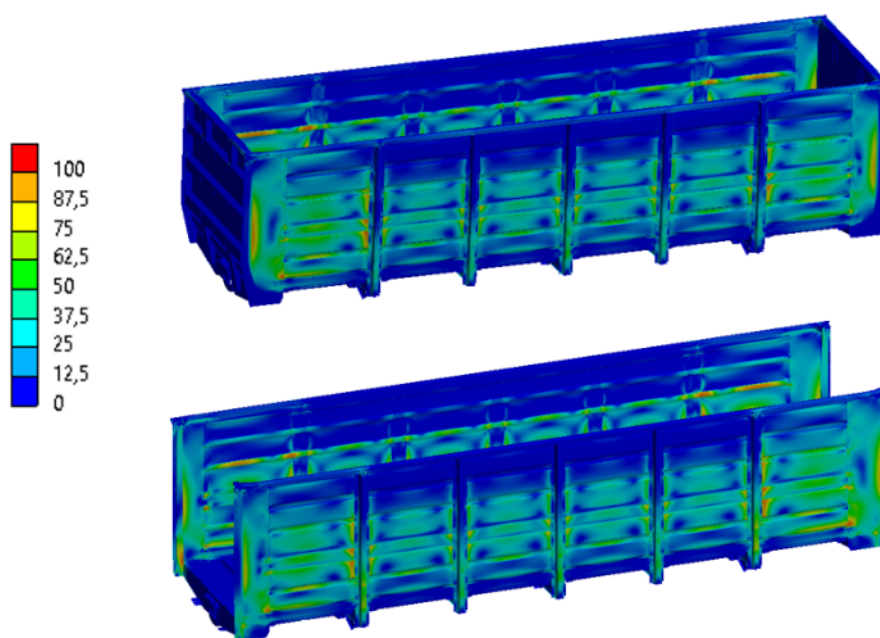


Рис. 4. Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа

Из табл. 2 и рис. 4 следует, что учет в расчете торцевых стен значительно влияет на результат напряжений. При их наличии эквивалентная распорная сила снижается до 40 %. Наибольшее отличие в напряжениях заделки зафиксировано в шкворневых стойках, расположенных ближе всего к торцевым стенам.

Определение режимов ресурсных испытаний

Для обеспечения положительного результата при оценке ресурса узла заделки стойки необходимо, чтобы количество циклов нагружений до разрушения узлов заделки стоек новой конструкции полувагона было не ниже, чем у серийно выпускаемого полувагона. Амплитудная нагрузка цикла определяется исходя из суммарного повреждающего воздействия в эксплуатации за назначенный срок службы вагона. Усталостное повреждение за срок эксплуатации вагона складывается из двух основных видов повреждающего воздействия: распорная динамическая нагрузка и центробежная нагрузка.

Для определения амплитудной нагрузки цикла используется методика расчета, описанная в статье [9], которая применяется для свободностоящих стоек, без учета влияния других несущих элементов конструкции кузова: торцевые стены, верхняя обвязка, обшивка боковой стены. Особенностью усовершенствованной методики является учет влияния частей кузова полувагона на напряженное состояние узла заделки стойки.

В результате расчетов определено накопленное усталостное повреждение за назначенный срок службы вагона, данные представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Накопленное усталостное повреждение

Узел заделки	Накопленное усталостное повреждение, кН ⁴					
	от распорной силы, $D_{\text{экспл}}^I$		от центробежной силы, $D_{\text{экспл}}^{II}$		суммарное, $D_{\text{экспл}}$	
	Нормы	ГОСТ [8]	Нормы	ГОСТ [8]	Нормы	ГОСТ [8]
Новая конструкция полувагона						
Шкворневая стойка	$4,75 \cdot 10^{10}$	$5,34 \cdot 10^{10}$	$0,41 \cdot 10^{10}$	$0,54 \cdot 10^{10}$	$5,16 \cdot 10^{10}$	$5,89 \cdot 10^{10}$
Промежуточная стойка 1	$7,87 \cdot 10^{10}$	$8,84 \cdot 10^{10}$	$1,41 \cdot 10^{10}$	$1,86 \cdot 10^{10}$	$9,27 \cdot 10^{10}$	$10,71 \cdot 10^{10}$
Промежуточная стойка 2	$11,98 \cdot 10^{10}$	$13,46 \cdot 10^{10}$	$2,14 \cdot 10^{10}$	$2,84 \cdot 10^{10}$	$14,12 \cdot 10^{10}$	$16,30 \cdot 10^{10}$
Серийно выпускаемый полувагон						
Шкворневая стойка	$1,94 \cdot 10^{10}$	$2,18 \cdot 10^{10}$	$0,22 \cdot 10^{10}$	$0,29 \cdot 10^{10}$	$2,15 \cdot 10^{10}$	$2,47 \cdot 10^{10}$
Промежуточная стойка	$4,25 \cdot 10^{10}$	$4,78 \cdot 10^{10}$	$1,00 \cdot 10^{10}$	$1,33 \cdot 10^{10}$	$5,25 \cdot 10^{10}$	$6,11 \cdot 10^{10}$

В дальнейшем при расчете эквивалентной динамической силы, приложенной к образцу, используется наибольшее из двух значений $D_{\text{экспл}}$ — то есть по ГОСТ 33211 [8], поскольку в стандарте уже пересмотрены спектры нагружения, вероятность возникновения силы и другие параметры, что позволяет более точно оценить усталостную долговечность конструкции в реальных условиях эксплуатации. При определении режима нагружения, для того чтобы все узлы были

в одинаковых условиях, количество циклов, к которому была приведена нагрузка, принималось одинаковым.

По итогам выполненных расчетов определены ключевые параметры, необходимые для проведения ресурсных испытаний и оценки долговечности конструкции. Эти параметры включают: режим нагружения для проведения ресурсных испытаний, суммарное повреждающее воздействие, количество циклов (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Рекомендованные режимы нагружения стоек полувагона для испытаний

Узел заделки	Режим нагружения, кН	Количество циклов	Суммарное повреждающее воздействие, кН ⁴
Новая конструкция полувагона			
Шкворневая стойка	26,0 ± 16,2	8,5 · 10 ⁵	5,89 · 10 ¹⁰
Промежуточная стойка 1	35,4 ± 18,8		10,71 · 10 ¹⁰
Промежуточная стойка 2	39,2 ± 20,9		16,30 · 10 ¹⁰
Серийно выпускаемый полувагон			
Шкворневая стойка	20,8 ± 13,1	8,5 · 10 ⁵	2,47 · 10 ¹⁰
Промежуточная стойка	30,4 ± 16,4		6,11 · 10 ¹⁰

Результаты испытаний

Для апробации методики были проведены усталостные испытания узлов заделок промежуточных и шкворневых стоек опытного образца полувагона новой конструкции, а также узлов заделок промежуточных и шкворневых стоек серийно выпускаемого полувагона со сроком службы 32 года, который успешно эксплуатируется на путях общего пользования в настоящее время. Испытания проведены в соответствии с разработанными и утвержденными методиками на конкретный полувагон и стандартами [10], на аттестованном оборудовании с использованием проверенных средств измерений, при температуре от 20 до 22 °С, относительной влажности воздуха от 60 до 63 %, атмосферном давлении — от 94 до 97 кПа. Для последующей корректной обработки данных каждому образцу узла заделки стойки был присвоен свой идентификационный номер.

Образцы устанавливались в стенд и испытывались при ассиметричном цикле нагружения до разрушения, т. е. до появления усталостной трещины (трещин), при котором поддержание режима работы стенда становится невозможным из-за значительного уменьшения жесткости образца. При испытании образцов на циклические нагрузки прикладывалась сила (рис. 5), полученная ранее в расчетах, также фиксировалось число циклов на момент выявления трещин и при разрушении образцов. Результаты испытаний представлены в табл. 5, 6.

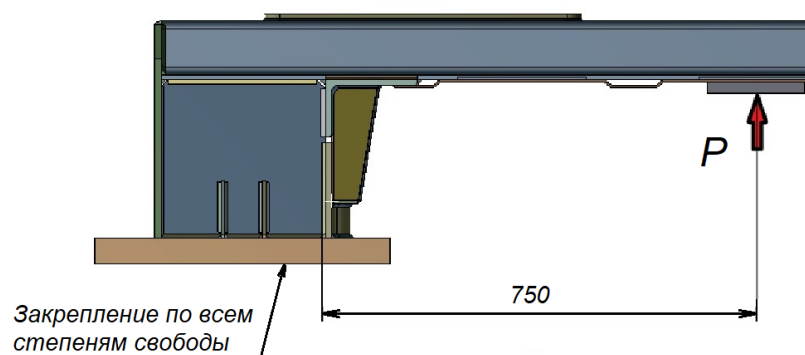


Рис. 5. Схема нагружения узлов заделок стоек

ТАБЛИЦА 5. Результаты усталостных испытаний узлов заделки стоек полувагона новой конструкции

Маркировка	Режим нагружения, кН				Количество циклов	
	P_m	P_a	$P_{\max}$	$P_{\min}$	До обнаружения трещины	До разрушения
Шкворневая стойка						
Ш1-6	26,0	16,2	42,2	9,8	524 700	2 030 700
Ш1-7					593 000	1 628 300
Ш1-8					506 200	1 964 400
Среднее значение					541 300	1 874 467
Промежуточная стойка 1						
П1-1	35,4	18,8	54,2	16,6	616 900	1 080 000
П1-2					572 500	960 000
П1-3					655 100	1 220 000
Среднее значение					614 833	1 086 667
Промежуточная стойка 2						
П1'-1	39,2	20,9	60,1	18,3	361 000	866 000
П1'-2					455 200	515 200
П1'-3					473 200	581 100
Среднее значение					429 800	654 100

ТАБЛИЦА 6. Результаты усталостных испытаний узлов заделки стоек серийно выпускаемого полувагона

Маркировка	Режим нагружения, тс				Количество циклов	
	P_m	P_a	$P_{\max}$	$P_{\min}$	До обнаружения трещины	До разрушения
Шкворневая стойка						
Ш-2	20,8	13,1	33,9	7,7	577 000	1 709 100
Ш-3					803 400	1 893 400
Ш-5					391 200	1 386 400
Среднее значение					590 533	1 662 967
Промежуточная стойка						
П-4	30,4	16,4	46,8	14,0	389 300	455 200
П-5					267 100	523 500
П-6					293 100	681 600
Среднее значение					316 500	553 433

Первая трещина (рис. 6) образуется по сварному шву в зоне приварки нижней обвязки боковой стены и накладке в каждом образце узла заделки стойки полувагонов обеих конструкций.

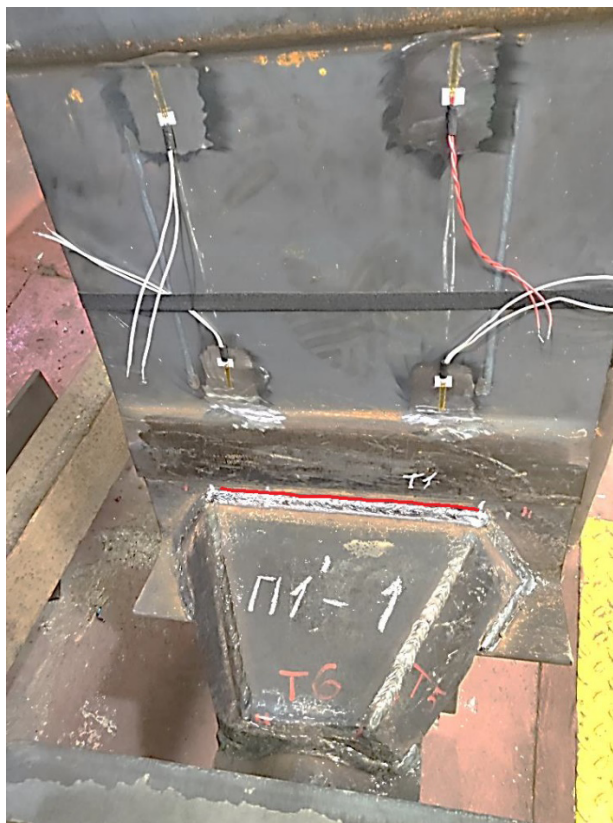


Рис. 6. Условное обозначение трещины в узле заделки стойки

Заключение

В результате испытаний установлено, что выборочное среднее значение циклов до разрушения узлов заделки стоек полувагона новой конструкции превышает среднее значение циклов до разрушения узлов заделки стоек серийно выпускаемой конструкции полувагона в диапазоне от 13 до 96 %.

Также было выявлено, что при учете торцевой стены эквивалентные напряжения в заделках стоек боковой стены изменяются следующим образом:

- в заделке шкворневых стоек реакции уменьшаются до 71 и 65 % для полувагона новой и серийно выпускаемой конструкции соответственно;
- в заделке промежуточных стоек реакции уменьшаются до 14 и 18 % для полувагона новой и серийно выпускаемой конструкции соответственно.

Разработанная методика позволила получить уточненную оценку долговечности узлов заделок стоек и оценить влияние учета заделок верхней обвязки и торцевой стены при выборе испытательных режимов нагружения.

Список источников

1. Транспорт в России. Статистический сборник. 2024: Стат. сб. / Росстат. — М., 2024. — 100 с.
2. Производство грузовых вагонов в 2024 году — Объединение вагоностроителей. — URL: <https://souzovs.com/press-center/news/proizvodstvo-gruzovykh-vagonov-v-2024-godu/> (дата обращения: 23.01.2025).
3. Битюцкий А. А. Исследование усталостной прочности заделок стоек боковой стены новой конструкции кузова полувагона / А. А. Битюцкий, А. Е. Афанасьев; под ред. А. А. Битюцкого // Сб. науч. тр.; Инженерный центр вагоностроения. — СПб.: ОМ-Пресс, 2009. — Вып. 7. — С. 62–72.
4. Битюцкий А. А. Совершенствование узла заделки стойки боковой стены полувагона модели 12-9833 по критерию усталостной прочности / А. А. Битюцкий, А. Е. Афанасьев; под ред. А. А. Битюцкого // Сб. науч. тр.; Инженерный центр вагоностроения. — СПб.: ОМ-Пресс, 2010. — Вып. 8. — С. 31–41.
5. Битюцкий А. А. Стендовые испытания на сопротивление усталости макетных узлов крытого вагона для перевозки автомобилей / А. А. Битюцкий, А. Е. Афанасьев, И. А. Хиллов, В. И. Гуськов // Транспорт Российской Федерации. — СПб., 2015. — № 3(58). — С. 81–85.
6. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев; отв. ред. Г. С. Писаренко. — 2-е изд., перераб. и доп. — Киев: Наук. думка, 1988. — 736 с.
7. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). — М.: ГосНИИВ; ВНИИЖТ, 1996. — 319 с.
8. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. — М.: Стандартинформ, 2020. — 26 с.
9. Додонов А. В. Разработка и апробация методики ресурсных испытаний узла заделки стойки вагона-платформы для лесоматериалов / А. В. Додонов, А. Е. Афанасьев, А. А. Хоменко, А. А. Иванов // Транспорт Урала. — 2019. — № 1(60). — С. 45–51.
10. ГОСТ 33788—2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. — М.: Стандартинформ, 2016. — 42 с.

Дата поступления: 27.03.2025

Решение о публикации: 12.04.2025

Контактная информация:

АФАНАСЬЕВ Александр Евгеньевич — канд. техн. наук, руководитель испытательного центра; aae@engcenter.ru

АФАНАСЬЕВА Татьяна Анатольевна — канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры «Техносферная и экологическая безопасность»; tafanaseva@pgups.ru

ДЕРКУНОВА Дарья Михайловна — инженер; ddm@engcenter.ru

Improvement of Gondola Side Pillar Resource Testing Methodology with Respect to Test Load Determination

A. E. Afanasyev¹, T. A. Afanasyeva², D. M. Derkunova¹

¹“Testing Center for Wagon-building Products of the Rolling Stock Engineering Center” LLC, 108, Fontanka River Embankment, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

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

For citation: Afanasyev A. E., Afanasyeva T. A., Derkunova D. M. Improvement of Gondola Side Pillar Resource Testing Methodology with Respect to Test Load Determination. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, Pp. 24–35. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-24-35

Summary

Purpose: The existing method of the dynamic load calculation is used for free-standing pillars that are not affected by other load-bearing elements of the car body such as end walls, cant rail, side wall paneling, etc. The purpose of this work is to improve the method of resource testing of gondola car side pillars in terms of determining the test load. **Methods:** The analysis of existing methods of resource testing of gondola car pillar sealing units has been performed. To assess the stress state of the side pillars, the load on the gondola car side wall pillars has been calculated taking into account the influence of the gondola car body components on the stress state of the pillar sealing unit. The impact of the cant rail and end wall on the pillar sealing has been determined and the strength of different gondola car models has been calculated taking into account the sealing in the end wall and without it. The modelling of the gondola car strength calculation has been performed using a specialized software package in order to determine the influence of the cant rail of the end walls on the stress state of the car body. **Results:** The tests carried out demonstrated the validity of the methodology used. This methodology has confirmed that the service life of the gondola car pillar sealing units is 32 years. The tests have shown that the end walls reduce the stress placed on the sidewall pillars. **Practical significance:** The side pillar is a key element of the gondola car frame and it supports the majority of the Rankine’s loads during cargo transportation. The improved methodology is a comprehensive system of measures designed to check the reliability and durability of the structure and will ensure the gondola car safe operation.

Keywords: Gondola car, resource tests, calculation, methodology, side pillars, pillar sealing unit.

References:

1. *Transport v Rossii. Statisticheskiy sbornik. 2024: Stat. sb. Rosstat* [Transport in Russia. Statistical Digest. 2024: Stat. Coll. Rosstat]. Moscow, 2024, 100 p. (In Russian)
2. *Proizvodstvo gruzovykh vagonov v 2024 godu — Ob’edinenie vagonostroiteley* [Freight Car Production in 2024 — Association of Carriage Builders]. Available at: <https://souzovs.com/press-center/news/proizvodstvo-gruzovykh-vagonov-v-2024-godu/> (accessed: January 23, 2025). (In Russian)
3. Bityutskiy A. A., Afanas’ev A. E. Issledovanie ustalostnoy prochnosti zadelok stoek bokovoy steny novoy konstruktsii kuzova poluvagona; pod red. A. A. Bityutskogo [Study of Fatigue Strength of Side Wall Pillar Sealings of New Gondola Car Body Design; ed. by A. A. Bityutsky]. *Sb. nauch. tr.; Inzhenernyy tsentr vagonostroeniya* [Coll. of scientific papers; Carriage Building Engineering Center]. St. Petersburg: OM-Press Publ., 2009, Iss. 7, Pp. 62–72. (In Russian)

4. Bityutskiy A. A., Afanas'ev A. E. Sovershenstvovanie uzla zadelki stoyki bokovoy steny poluvagona modeli 12-9833 po kriteriyu ustalostnoy prochnosti; pod red. A. A. Bityutskogo [Improvement of the side wall pillar sealing unit of gondola car model 12-9833 based on the fatigue strength criterion; edited by A. A. Bityutsky]. *Sb. nauch. tr.; Inzhenernyy tsentr vagonostroeniya* [Coll. sci. t.; Engineering Center of Carriage Building]. St. Petersburg: OM-Press Publ., 2010, Iss. 8, Pp. 31–41. (In Russian)
5. Bityutskiy A. A., Afanas'ev A. E., Khilov I. A., Gus'kov V. I. Stendovye ispytaniya na soprotivlenie ustalosti maketnykh uzlov krytogo vagona dlya perevozki avtomobiley [Bench tests for fatigue resistance of mock-up units of a covered car for transporting cars]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. St. Petersburg, 2015, Iss. 3(58), Pp. 81–85. (In Russian)
6. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveev V. V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov; otv. red. G. S. Pisarenko; 2-e izd., pererab. i dop.* [Handbook of Strength of Materials; 2nd ed., revised and enlarged]. Kiev: Nauk. dumka Publ., 1988, 736 p. (In Russian)
7. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Standards for the calculation and design of cars for the 1520 mm gauge MPS railways (non-self-propelled)]. Moscow: GosNIIV; VNIIZhT Publ., 1996, 319 p. (In Russian)
8. *GOST 33211—2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST 33211—2014. Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2020, 26 p. (In Russian)
9. Dodonov A. V., Afanas'ev A. E., Khomenko A. A., Ivanov A. A. Razrabotka i aprobatsiya metodiki resursnykh ispytaniy uzla zadelki stoyki vagona-platformy dlya lesomaterialov [Development and testing of the methodology for resource testing of the mounting unit of the pillar of a platform car for timber]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2019, Iss. 1(60), Pp. 45–51. (In Russian)
10. *GOST 33788—2016. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i khodovye kachestva* [GOST 33788—2016. Freight and passenger cars. Methods of testing for strength and running qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2016, 42 p. (In Russian)

Received: March 27, 2025

Accepted: April 12, 2025

Author's information:

Alexander E. AFANASYEV — PhD in Engineering, Head of the Testing Center; aae@engcenter.ru

Tatyana A. AFANASYEVA — PhD in Engineering; Senior Lecturer; tafanaseva@pgups.ru

Darya M. DERKUNOVA — Engineer; ddm@engcenter.ru

УДК 629.4.015

Теоретические и экспериментальные исследования промежуточных рельсовых скреплений

Е. В. Соломатин

ООО «Технология 69», Российская Федерация, 129075, Москва, ул. Аргуновская, 3, к. 1

Для цитирования: Соломатин Е. В. Теоретические и экспериментальные исследования промежуточных рельсовых скреплений // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 36–48. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-36-48

Аннотация

Цель: Анализ зарубежного опыта определения причин, по которым происходит выход из строя промежуточного рельсового скрепления. В настоящее время разработано достаточно много конструкций рельсовых скреплений для различных условий эксплуатации и множество расчетных и лабораторных методов определения их работоспособности. При этом остается открытым вопрос прогнозирования и подтверждения ресурса узла рельсового скрепления и сохранения его виброзащитных свойств в процессе эксплуатации. **Методы:** Сравнение и анализ расчетных моделей определения напряженного состояния элементов различных конструкций промежуточных рельсовых скреплений, а также лабораторные и полигонные испытания в различных условиях эксплуатации. Результаты стендовых испытаний на циклическую усталость не всегда совпадают с результатами натурных испытаний на действующей железнодорожной линии. При этом отказы для различных типов рельсовых скреплений происходят по причине выхода из строя различных элементов узла скрепления. В статье рассматриваются вопросы сохранения виброзащитных свойств рельсовых скреплений в эксплуатации, причины выхода из строя отдельных элементов скреплений и вопросы подтверждения эксплуатационного ресурса. **Результаты:** Определен элемент, отказ которого чаще всего приводит к отказу всего узла скрепления. Это упругая клемма. Рассмотрены исследования, утверждающие, что разрушение клеммы в значительной степени связано с резонансом, вызванным волнообразным износом рельса, а также другие исследования, заявляющие, что клеммы разрушаются вследствие повышенной нагрузки на ось. **Практическая значимость:** Созданы предпосылки для разработки мероприятий по сокращению или недопущению разрушения упругих клемм промежуточных рельсовых скреплений в эксплуатации.

Ключевые слова: Рельсовое скрепление, упругая клемма, демпфирующая прокладка, дюбель, ресурс, усталостная прочность, ресурс.

Введение

Промежуточное рельсовое скрепление (далее — скрепление) является важнейшей частью верхнего строения железного пути, определяющей динамические показатели взаимодействия с подвижным составом, надежность, работоспособность и стоимость при строительстве и техническом обслуживании. Проблема надежной работы скреплений весьма актуальна для всех железных дорог мира.

Являясь одним из важных элементов верхнего строения пути, рельсовые скрепления в значительной степени определяют эксплуатационную надежность железнодорожного пути и условия его взаимодействия с подвижным составом.

Надежность рельсового скрепления влияет на срок службы верхнего строения пути.

Основными функциями скрепления являются: надежное соединение рельсов с подрельсовым основанием, электроизоляция рельса на участках с автоматической блокировкой и электрической тягой. Кроме того, к функциям скреплений относится снижение нагрузки и вибрации, передаваемой от рельсов на шпалы и балласт, особенно в криволинейных участках пути с малым радиусом кривизны, а также при высоких скоростях движения поездов и высокой грузонапряженности.

В настоящее время разработаны перспективные конструкции промежуточных рельсовых скреплений, способные работать в условиях повышенных нагрузок до 25 тс/ось с перспективой увеличения до 27 тс/ось, а также при нормативном ресурсе 1,5 млрд тонн с перспективой увеличения до 2,5 млрд тонн. При этом остается открытым вопрос прогнозирования и подтверждения ресурса узла рельсового скрепления и сохранения его виброзащитных свойств в процессе эксплуатации. Результаты стендовых испытаний на циклическую усталость не всегда совпадают с результатами натурных испытаний на действующей железнодорожной линии. При этом отказы для различных типов рельсовых скреплений происходят по причине выхода из строя различных элементов узла скрепления.

Виброзащитные свойства скреплений

В литературе [1] представлены многочисленные исследования влияния рельсовых скреплений на рельс и основание пути в различных условиях эксплуатации. Система рельсовых скреплений является ключевым фактором, определяющим вибрационные характеристики пути. При небольшой жесткости связь между рельсом и подрельсовым основанием слабая, и скорость затухания колебаний рельса становится меньше. И наоборот, при увеличенной жесткости вибрация подрельсового основания становится интенсивнее.

Для изучения влияния рельсовых скреплений на вибрацию конструкции пути на эстакаде в статье [1] выбраны четыре вида широко используемых скреплений для сравнения и анализа. Четыре вида скреплений и их параметры: специальное виброгасящее скрепление (жесткость 10 кН/мм), скрепление GJ-III (25 кН/мм), скрепление DTVI2 (50 кН/мм) и скрепление E-clip (60 кН/мм). В публикации показано и сопоставлено влияние различных типов креплений на вибрацию пролетных строений эстакад и мостов. Влияние рельсового скрепления практически незначительно для вибрации пролетного строения в пределах 60 Гц. При вибрации в диапазоне 60–100 Гц скрепление E-clip, обладающее высокой жесткостью, оказывает минимальное воздействие на различные части конструкции моста, а наибольший эффект дает скрепление GJ-III. Однако различия между амплитудами вибрации

этих четырех видов рельсовых креплений незначительны. Многие исследования показывают, что между рельсом и креплением в определенном частотном диапазоне возникают антирезонансные вибрации, в результате чего жесткость подпутья превышает его статическую жесткость, в результате чего рельсовое крепление теряет свой демпфирующий эффект, что приводит к увеличению вибрации. При вибрации пролетного строения выше 100 Гц крепление GJ-III считается лучшим по снижению вибрации в коробчатой балке, тогда как крепление E-clip демонстрирует худшие показатели по снижению вибрации. Влияние крепления на вибрацию рельсов можно разделить на два частотных диапазона: один в пределах 100 Гц, другой — более 100 Гц. Крепление E-clip более эффективно, чем остальные три вида рельсовых креплений в пределах 100 Гц, а крепление GJ-III лучше остальных по снижению вибрации в диапазоне выше 100 Гц.

Когда волна вибрации проходит через рельс к мосту, энергия вибрации частично рассеивается за счет демпфирования рельсового крепления, а энергия, передаваемая в конструкцию моста, уменьшается, выполняя задачу гашения вибрации. Для анализа влияния демпфирования рельсовых креплений на вибрацию мостовых конструкций используются четыре показателя демпфирования рельсовых креплений: 1×10^4 , 2×10^4 , 4×10^4 и 8×10^4 Н/(м/с) с неизменной жесткостью 60 МН/м для расчета скорости прохождения различных частей моста. Отмечается [1], что увеличение демпфирования рельсовых креплений не влияет на снижение вибрации моста в пределах 100 Гц, тогда как для вибрации моста между 100 и 300 Гц демпфирование креплений оказывает определенное влияние на снижение вибрации, несмотря на то что амплитуда снижения сравнительно невелика.

Упругие клеммы

В последние годы было проведено большое количество исследований [2] механических свойств рельсовых креплений и усталостного разрушения их упругих клемм, в основном с упором на статические и динамические характеристики самих клемм, а также квазистатическую усталостную долговечность в конкретных условиях эксплуатации и резонансное усталостное повреждение упругих клемм, вызванное внешним возбуждением, таким как коротковолновой волнообразный износ и неровности на поверхности катания колеса.

В исследовании [3] измерена динамическая жесткость крепления в вертикальном и поперечном направлении в диапазоне 100–1000 Гц и предложены частотные характеристики изменения системы рельсового крепления при предварительном натяжении. То есть жесткость крепления будет постепенно увеличиваться с увеличением частоты возбуждения и оказывать существенное влияние на выход из строя клемм. Мохамадзаде и другие авторы [4, 5] исследовали

усталостную надежность и чувствительность случайных величин упругих клемм при различных осевых нагрузках посредством численного моделирования и экспериментов. Джавад Садеги и др. [6, 7] посредством экспериментов проанализировали влияние условий нагружения пути на усталостные характеристики упругих клемм и установили, что явление усталости — это основная причина выхода из строя рельсовых креплений. Чтобы изучить фактическое влияние степени затяжки крепежных элементов, жесткости элементов скрепления и частоты приложения нагрузки на механические характеристики, был разработан нелинейный пружинный элемент для моделирования вертикальных характеристик узла рельсового скрепления. Хасап и др. [8, 9] исследовали различные характеристики динамического смещения упругих клемм, вызванного ударной нагрузкой от колеса, на основе теории конечных элементов, а также провели полевые испытания на усталость. Они считали, что основной причиной разрушения упругих клемм является амплитуда механических напряжений, вызванных воздействием поездной нагрузки. Линг и др. [10] показали, что на усталостное разрушение клемм влияет сверхнормативное циклическое динамическое воздействие от подвижного состава, при этом расчеты и эксперименты проводились при различных значениях затяжки крепежных элементов.

При дальнейшем развитии исследований в части моделирования динамических характеристик рельсовых креплений в сочетании с натурными измерениями некоторые ученые полагают, что резонанс упругих клемм, вызванный высокочастотным возбуждением, является основной причиной выхода их из строя. Ван и другие авторы в работах [11, 12] на основе измеренных данных волнообразного износа рельсов исследовали влияние периодических коротких неровностей рельсов на повреждение упругих клемм и определили режимы шлифования рельсов. Кроме того, исследованы динамические характеристики клемм с различными свойствами материалов, а также усталостные повреждения при волнообразном износе рельсов. Сяо и др. [13] изучили высокочастотную вибрацию пути, вызванную неровностями на поверхности катания рельсов и колес при высокоскоростном движении. Они полагали, что упругие клеммы будут резонировать, когда частота возмущающей вибрации приблизится к собственной частоте колебаний клемм, что приведет к их усталостному разрушению. Гао и др. в работе [14] проанализировали передаточные функции упругих клемм, частоту возбуждения от неровностей рельса в зависимости от крутящего момента крепежителей рельсового скрепления SKL. Путем анализа испытаний и моделирования обнаружено, что частота возбуждения системы «колесо — рельс» очень близка к собственной частоте клемм SKL в рабочем состоянии, что может привести к их резонансу и усталостному повреждению. Кроме того, исследована [15] взаимосвязь между параметрами высокоскоростных креплений для скорости 300–350 км/ч, такими как амплитудно-частотные

характеристики упругих клемм, динамические напряжения клемм, износ рельсов. Объяснен механизм динамического разрушения клемм при высокочастотном (580–680 Гц) возбуждении, а также проведена оптимизация их геометрических параметров.

Исследователи уделяют все большее внимание динамическим характеристикам клемм и резонансным усталостным повреждениям, вызванным высокочастотным ударом колеса о рельс. Исследования основаны на динамическом анализе с детерминированными условиями, при которых состояние и параметры конструкции пути постоянны, а источники возбуждения случайны [16, 17], что непосредственно вызывает случайные динамические взаимодействия системы «колесо — рельс» и дополнительно влияет на динамические характеристики креплений и усталостное повреждение клемм.

В лаборатории путевой инженерии Пекинского университета Цзяотун проведены лабораторные исследования [18] усталостной долговечности клеммы E-clip при различном ее положении относительно анкера.

При зазоре между анкером и клеммой 3 мм и прогибе клеммы 14 мм усталостная долговечность составляет 323 000 циклов, что существенно меньше нормируемого значения 5 000 000 циклов. Кроме того, установлено, что усталостная долговечность нелинейно снижается при увеличении прогиба клеммы.

В исследовании [19] предложен метод прогнозирования усталостной долговечности упругих клемм путем установления зависимости между приложенными нагрузками и напряжениями на клеммы при лабораторных испытаниях. С применением предложенного метода была оценена усталостная долговечность рельсового скрепления, и с использованием этой оценки была получена допустимая боковая сила.

В исследовании Шанхайского научно-исследовательского института материалов [20] в качестве объекта исследования взята W-образная клемма от скрепления Vossloh 300-1, которое обычно используется для высокоскоростных железных дорог. Вначале проведена серия испытаний на одноосное растяжение. Затем на основе измеренных эксплуатационных характеристик материала клеммы была построена конечно-элементная модель узла скрепления. Срок службы до зарождения усталостной трещины крепежного зажима был предсказан в соответствии с критерием Брауна — Миллера.

В исследовании [20] определено влияния механических свойств на зарождение трещины в клемме. Результаты показали, что зарождение и прогрессирование усталостных трещин в клемме происходит в плоскости максимальной сдвиговой деформации. Срок службы клеммы чрезвычайно чувствителен к модулю упругости и к прочности на растяжение. Усталостная прочность клеммы может быть повышена за счет увеличения предела прочности материала на разрыв до 1450 МПа и уменьшения модуля упругости до 160 ГПа.

На Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» в Щербинке проведены эксплуатационные испытания различных типов промежуточных рельсовых скреплений при наработке тоннажа до 900 млн т брутто на безбалластной конструкции пути [21]. Были испытаны следующие типы промежуточных рельсовых скреплений:

W 30 HH (heavy-haul) (Vossloh);
System DFF 301 (Vossloh);
SBS W SL 1-900-R65 (Schwihag);
Pandrol Fastclip SFC (Pandrol).

Результаты показывают [22, 23], что упругие клеммы различных типов промежуточных рельсовых скреплений выходили из строя только по причине сверхнормативной затяжки шурупов.

В исследовании [24] показано влияние сопротивления горизонтальному повороту рельса в узле рельсового скрепления на устойчивость бесстыкового пути против температурного выброса.

Демпфирующие прокладки

Для анализа напряженно-деформированного состояния эластомерных рельсовых прокладок и контактных напряжений на их поверхностях [25] рассмотрены две характерные конструкции эластомерных накладок: с синусоидальным рифлением поверхностей (синусоидальные желоба) и трапециевидным рифлением (трапециевидные желоба).

В исследовании показаны фактические прочностные характеристики эластомерных накладок с синусоидальной и трапециевидной формой рифлей, полученные в ходе экспериментальных исследований серийных и опытных образцов. Модуль упругости материала прокладок составляет 55,0 МПа, а коэффициент Пуассона 0,45. Испытательные нагрузки составляли от 0,0 кН до 200,0 кН.

Анализ исследований показывает, что оба типа прокладок характеризуются значительной упругой деформацией при приложении и снятии напряжений с образцов. При нагрузке до 100,0 кН прокладки с рифлями синусоидальной и трапециевидной формы демонстрируют значения упругой деформации 4,62 мм и 2,71 мм соответственно; при нагрузке 200,0 кН значения будут равны 6,0 мм и 5,0 мм соответственно.

Величина деформации прокладок с синусоидальными рифлями превышает величину деформации трапециевидных прокладок в 1,7 раза при нагрузке до 100,0 кН; при нагрузке до 200,0 кН значение будет выше в 1,2 раза. Причина повышенной деформации прокладок с синусоидальными рифлями по сравнению с трапециевидными заключается в повышенной деформируемости вершин

синусоидальных рифлей при незначительной величине контактной поверхности и конической форме рифлей.

Установлено [25], что наибольшие расчетные напряжения 26,0 МПа наблюдаются в угловых точках контакта «рельс — прокладка». Достигнутое напряжение 26,0 МПа при нагрузке 100,0 кН сохраняется при дальнейшем росте нагрузки до 200,0 кН. При этом происходит перераспределение деформаций и напряжений на другие области прокладки.

Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния синусоидальных и трапециевидных прокладок показывает, что в пределах вершин синусоидальных рифлей деформируемость увеличивается на 1,5–2,0 мм, т. е. в 1,7 раза по сравнению с рифлями трапециевидной прокладки. При этом сжимающие напряжения внутри синусоидальных рифлей в верхней и нижней плоскостях достигают 54,6 МПа, а сжимающие напряжения в вершинах и внутри трапециевидных рифлей 26,0 МПа, т. е. в 2,1 раза меньше.

В ходе проведения испытаний [26] на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» в Щербинке при наработке тоннажа 900 млн т брутто выхода из строя демпфирующих прокладок не наблюдалось. Однако отмечено [27], что упругие свойства демпфирующих прокладок существенно зависят от температуры, что оказывает значительное влияние на условия взаимодействия колеса и рельса.

Дюбели

Предметом исследования [28] стали прочностные характеристики дюбелей различных производителей и влияние конструкции дюбеля на прочностные характеристики шпал.

Расчет напряжений в дюбелях при растяжении показал максимальные напряжения во всех дюбелях, которые составляют 85–100 МПа. Все дюбеля испытывают максимальные нагрузки на относительно небольшой площади. Характер распределения напряжений примерно одинаков у всех дюбелей.

Чтобы выяснить, достаточна ли прочность, был рассчитан коэффициент запаса прочности. В самых слабых сечениях минимальное значение коэффициента запаса было равно 0,58, максимальное — 9,16.

Исследования [28] показали, что напряжения, возникающие в дюбелях в процессе эксплуатации, значительно ниже, чем при испытаниях на растяжение, проводимых по утвержденным методикам. В частности, максимальное напряжение в теле дюбеля составило 8 МПа без видимых повреждений. Поэтому прочностные характеристики всех дюбелей не вызывают сомнений и имеют значительный запас прочности в эксплуатации.

Максимальные значения напряжений во всех дюбелях при эксплуатации не превышают 10 МПа, что существенно меньше, чем при испытаниях.

Согласно расчетам, при испытаниях дюбелей на растяжение, проводимых в телах всех рассматриваемых дюбелей, возникают напряжения 85–100 МПа, которые значительно превышают напряжения, возникающие в дюбелях при эксплуатации, причем характер и распределение таких напряжений не в полной мере соответствуют эксплуатационным напряжениям.

Анализ напряжений, возникающих в шпалах с дюбелями рассматриваемых производителей, показал, что их предельное значение составляет 75 МПа. Кроме того, в шпалах максимальные напряжения находятся в теле шпалы, что позволяет осуществить их перераспределение и предотвратить выдергивание дюбеля из шпалы.

Заключение

Как видно из проведенного обзора, большинство исследований усталости рельсового скрепления сосредоточены на таких аспектах, как свойства материала, технология обработки и условия нагружения. Однако имеют место такие проблемы, как чрезмерное упрощение математических моделей, необоснованность граничных условий и невозможность количественного прогнозирования срока службы рельсового скрепления. До сих пор еще не разработан метод расчета и анализа эксплуатационного ресурса, который можно было бы считать стандартизированным и широко использовать.

Ряд исследователей [10–16] утверждают, что разрушение клеммы в значительной степени связано с резонансом, вызванным волнообразным износом рельса, а другие исследователи [17, 29, 30] заявляют, что клеммы разрушаются вследствие повышенной нагрузки на ось. Логично предположить, что разрушение клемм является результатом воздействия совокупности факторов с разной степенью влияния.

Наиболее критичным элементом узла рельсового скрепления с точки зрения надежности является упругая клемма. Именно ее выход из строя приводит к прекращению работоспособности узла в целом. Изменение свойств демпфирующих прокладок в процессе эксплуатации приводит к ухудшению демпфирующих свойств узла скрепления. Выход из строя анкеров, шурупов и электроизолирующих элементов скреплений случается значительно реже, чем клемм и прокладок.

Список источников

1. Kun L. Influence analysis on the effect of rail fastening parameters on the vibration response of track-bridge system / L. Kun, X. Lei, Sh. Zeng // *Advances in Mechanical Engineering*. — 2017. —

Vol. 9(8). — Pp. 1–8. — DOI: 10.1177/1687814017702839. — URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814017702839>.

2. Ma D. Failure analysis of fatigue damage for fastening clips in the ballastless track of high-speed railway considering random track irregularities / D. Ma, J. Shi, Z. Yan, L. Sun // *Engineering Failure Analysis*. — January 2022. — Vol. 131. — DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105897.

3. Ali S. A. Railway noise levels, annoyance and countermeasures in Assiut, Egypt / S. A. Ali // *Applied Acoustics*. — January 2005. — Vol. 66. — Iss. 1. — Pp. 105–113. — DOI: 10.1016/j.apacoust.2004.06.005.

4. Kerr A. D. Analysis and tests of boned insulated rail joints subjected to vertical wheel loads / A. D. Kerr, J. E. Cox // *International Journal of Mechanical Sciences*. — October 1999. — Vol. 41. — Iss. 10. — Pp. 1253–1272. — DOI: 10.1016/S0020-7403(98)00042-3.

5. Kaewunruen S. Field trials for dynamic characteristics of railway track and its components using impact excitation technique / S. Kaewunruen, A. M. Remennikov // *NDT & E International*. — October 2007. — Vol. 40(7). — Pp. 510–519. DOI: 10.1016/j.ndteint.2007.03.004.

6. Li Z. An investigation into the causes of squats — Correlation analysis and numerical modeling / Z. Li, Zh. Xin, C. Esveld, R. Dollevoet et al. // *Wear*. — 30 October 2008. — Vol. 265. — Iss. 9–10. — Pp. 1349–1355. — DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.037.

7. Mandal N. K. Sub-modelling for the ratchetting failure of insulated rail joints / N. K. Mandal, M. Dhanasekar // *International Journal of Mechanical Sciences*. — October 2013. — Vol. 75. — Pp. 110–122. — DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.06.003.

8. Pomboa J. Influence of track conditions and wheel wear state on the loads imposed on the infrastructure by railway vehicles / J. Pomboa, J. Ambrósio, M. Pereira, R. Verardi et al. // *Computers & Structures*. — November 2011. — Vol. 89. — Iss. 21–22. — Pp. 1882–1894. — DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.05.009.

9. Varandas J. N. Dynamic behaviour of railway tracks on transitions zones / J. N. Varandas, P. Hölscher, M. A. G. Silva // *Computers & Structures*. — July 2011. — Vol. 89. — Iss. 13–14. — Pp. 1468–1479. — DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.02.013.

10. Luo Y. Numerical investigation of nonlinear properties of a rubber absorber in rail fastening systems / Y. Luo, Y. Liu, H. P. Yin // *International Journal of Mechanical Sciences*. — April 2013. — Vol. 69. — Pp. 107–113. — DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.01.034.

11. Klaus H. An extended linear model for the prediction of short pitch corrugation / H. Klaus, K. Klaus // *Wear*. — January 1996. — Vol. 191. — Iss. 1–2. — Pp. 161–169. — DOI: 10.1016/0043-1648(95)06747-7.

12. Ilias H. The influence of railpad stiffness on wheelset/track interaction and corrugation growth / H. Ilias // *Journal of Sound and Vibration*. — 11 November 1999. — Vol. 227. — Iss. 5. — Pp. 935–948. — DOI: 10.1006/jsvi.1999.2059.

13. Nielsen J. C. O. Numerical prediction of rail roughness growth on tangent railway tracks / J. C. O. Nielsen // *Journal of Sound and Vibration*. — 23 October 2003. — Vol. 267. — Iss. 3. — Pp. 537–548. — DOI: 10.1016/S0022-460X(03)00713-2.

14. Gry L. Dynamic modelling of railway track based on wave propagation / L. Gry // *Journal of Sound and Vibration*. — 22 August 1996. — Vol. 195. — Iss. 3. — Pp. 477–505. — DOI: 10.1006/jsvi.1996.0438.
15. Mandal N. K. On the low cycle fatigue failure of insulated rail joints (IRJs) / N. K. Mandal // *Engineering Failure Analysis*. — May 2014. — Vol. 40. — Pp. 58–74. — DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.02.006.
16. Benson D. J. A single surface contact algorithm for the post-buckling analysis of shell structures / D. J. Benson, J. O. Hallquist // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. — January 1990. — Vol. 78. — Iss. 2. — Pp. 141–163. DOI: 10.1016/0045-7825(90)90098-7.
17. Thompson D. J. Developments of the indirect method for measuring the high frequency dynamic stiffness of resilient elements / D. J. Thompson, W. J. van Vliet, J. W. Verheij // *Journal of Sound and Vibration*. — 28 May 1998. — Vol. 213. — Iss. 1. — Pp. 169–188. DOI: 10.1006/jsvi.1998.1492.
18. Hong X. Fatigue damage analysis and life prediction of e-clip in railway fasteners based on ABAQUS and FE-SAFE / X. Hong, G. Xiao, W. Haoyu, L. Xing et al. // *Advances in Mechanical Engineering*. — 2018. — Vol. 10(3). — Pp. 1–12. — DOI: 10.1177/1687814018767249.
19. Deshimaru T. Permissible lateral force and fatigue life for rail fastening system / T. Deshimaru, S. Tamagawa, H. Kataoka // *Quarterly Report of RTRI*. — 2017. — Vol. 58. — Pp. 236–241. — URL: https://www.researchgate.net/publication/319324842_Permissible_Lateral_Force_and_Fatigue_Life_for_Rail_Fastening_System.
20. Liu Y. The Effect of Material Static Mechanical Properties on the Fatigue Crack Initiation Life of Rail Fastening Clips / Y. Liu, Q. Li, X. Jiang, H. Liu et al. // *Hindawi Advances in Civil Engineering*. — Vol. 2021. — Article ID 1366007. — 14 p. — DOI: 10.1155/2021/1366007.
21. Савин А. В. Безбалластный путь / А. В. Савин. — М.: РАС, 2017. — 192 с.
22. Савин А. В. Технические требования к элементам верхнего строения пути / А. В. Савин, А. В. Кузнецова, А. В. Петров, С. А. Васильева // *Транспортное строительство: Сборник статей второй всероссийской научно-технической конференции*. — М.: Перо, 2021. — С. 23–32.
23. Savin A. V. The Service Life of Ballastless Track / A. V. Savin // *Procedia Engineering*. — 2017. — Vol. 189. — Pp. 379–385. — DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.060.
24. Савин А. В. Влияние рельсовых креплений на устойчивость бесстыкового пути / А. В. Савин, Е. В. Соломатин // *East European Scientific Journal*. — 2023. — № 12(97). — С. 13–18. — URL: <https://archive.eesa-journal.com/index.php/eesa/issue/view/93/142>.
25. Hovorukha V. Studying and improving intermediate rail fastening of rail transport / V. Hovorukha // *E3S Web of Conferences* 109, 00028 (2019) *Essays of Mining Science and Practice* 2019. — DOI: 10.1051/e3sconf/201910900028.
26. Петров А. В. Жесткость рельсовых креплений безбалластной конструкции пути / А. В. Петров, С. В. Михайлов, А. В. Савин // *Путь и путевое хозяйство*. — 2022. — № 1. — С. 8–10.

27. Savin A. Acoustic impact on bridges / A. Savin, V. Ermakov, M. Egorov. — URL: <https://authors.elsevier.com/sd/article/S2352146522003106>.
28. Nikitin D. Analysis of strength characteristics in railroad dowels produced by various manufacturers / D. Nikitin, L. Nikitina, A. Asoyan, A. Marusin // *Architecture and Engineering*. — 2019. — Vol. 4. — Iss. 1. — Pp. 23–31. — DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-1-23-31.
29. Klaus H. An extended linear model for the prediction of short pitch corrugation / H. Klaus, K. Klaus // *Wear*. — January 1996. — Vol. 191. — Iss. 1–2. — Pp. 161–169. — DOI: 10.1016/0043-1648(95)06747-7.
30. Ilias H. The influence of railpad stiffness on wheelset/track interaction and corrugation growth / H. Ilias // *Journal of Sound and Vibration*. — 11 November 1999. — Vol. 227. — Iss. 5. — Pp. 935–948. — DOI: 10.1006/jsvi.1999.2059.

Дата поступления: 23.03.2025

Решение о публикации: 07.04.2025

Контактная информация:

СОЛОМАТИН Евгений Викторович — генеральный директор, соискатель; 2604136@mail.ru

Theoretical and Experimental Studies of Intermediate Rail Fasteners

E. V. Solomatin

ООО “Technologiya 69”, bld. 1, 3, Argunovskaya str., Moscow, 129075, 3, Russian Federation

For citation: Solomatin E. V. Theoretical and Experimental Studies of Intermediate Rail Fasteners. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, Pp. 36–48. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-36-48

Summary

Purpose: To analyze international experience in detecting the causes of the intermediate rail fastener failure. Currently, quite a lot of rail fastener designs have been developed for various operating conditions and many computational and laboratory methods for determining their operability have been created. At the same time, the issue of predicting and verifying the service life of the rail fastener and maintaining its vibration resistant properties remains open. **Methods:** Comparative analysis of computational models for determining the stress state of intermediate rail fastener elements; laboratory and field tests in various operating conditions. The results of cyclic fatigue bench tests do not always agree with the results of in-situ tests on a railway line in operation. At the same time, failures of rail fasteners different types occur due to the failure of different elements of the fastener assembly. The article discusses the issues of maintaining the vibration resistant properties of rail fasteners in service, the causes of fastener failure and the issues of service life verification. **Results:** An elastic clip has been identified as the element causing the majority of the entire fastener unit failures. Research papers claiming that the resonance vibration due to rail undulatory wear is the main cause of the elastic clip failure have been considered, as well as those claiming that the clamp failure is due to increased axle loads. **Practical significance:** The foundations have been laid for the development of measures to reduce or prevent the destruction of elastic clips of intermediate rail fasteners in service.

Keywords: Rail fastener, elastic clip, damping gasket, dowel, service life, fatigue strength, service life.

References

1. Kun L., Lei X., Zeng Sh. Influence analysis on the effect of rail fastening parameters on the vibration response of track-bridge system. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9(8), Pp. 1–8. DOI: 10.1177/1687814017702839. Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814017702839>.
2. Ma D., Shi J., Yan Z., Sun L. Failure analysis of fatigue damage for fastening clips in the ballastless track of high-speed railway considering random track irregularities. *Engineering Failure Analysis*, January 2022, vol. 131. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105897.
3. Ali S. A. Railway noise levels, annoyance and countermeasures in Assiut, Egypt. *Applied Acoustics*, January 2005, vol. 66, Iss. 1, Pp. 105–113. DOI: 10.1016/j.apacoust.2004.06.005.
4. Kerr A. D., Cox J. E. Analysis and tests of boned insulated rail joints subjected to vertical wheel loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, October 1999, vol. 41, Iss. 10, Pp. 1253–1272. DOI: 10.1016/S0020-7403(98)00042-3.
5. Kaewunruen S., Remennikov A. M. Field trials for dynamic characteristics of railway track and its components using impact excitation technique. *NDT & E International*, October 2007, vol. 40(7), Pp. 510–519. DOI: 10.1016/j.ndteint.2007.03.004.
6. Li Z., Xin Zh., Esveld C., Dollevoet R. et al. An investigation into the causes of squats — Correlation analysis and numerical modeling. *Wear*, 30 October 2008, vol. 265, Iss. 9–10, Pp. 1349–1355. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.037.
7. Mandal N. K., Dhanasekar M. Sub-modelling for the ratchetting failure of insulated rail joints. *International Journal of Mechanical Sciences*, October 2013, vol. 75, Pp. 110–122. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.06.003.
8. Pomboa J., Ambrósio J., Pereira M., Verardi R. et al. Influence of track conditions and wheel wear state on the loads imposed on the infrastructure by railway vehicles. *Computers & Structures*, November 2011, vol. 89, Iss. 21–22, Pp. 1882–1894. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.05.009.
9. Varandas J. N., Hölscher P., Silva M. A. G. Dynamic behaviour of railway tracks on transitions zones. *Computers & Structures*, July 2011, vol. 89, Iss. 13–14, Pp. 1468–1479. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.02.013.
10. Luo Y., Liu Y., Yin H. P. Numerical investigation of nonlinear properties of a rubber absorber in rail fastening systems. *International Journal of Mechanical Sciences*, April 2013, vol. 69, Pp. 107–113. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.01.034.
11. Klaus H., Klaus K. An extended linear model for the prediction of short pitch corrugation. *Wear*, January 1996, vol. 191, Iss. 1–2, Pp. 161–169. DOI: 10.1016/0043-1648(95)06747-7.
12. Ilias H. The influence of railpad stiffness on wheelset/track interaction and corrugation growth. *Journal of Sound and Vibration*, 11 November 1999, vol. 227, Iss. 5, Pp. 935–948. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2059.
13. Nielsen J. C. O. Numerical prediction of rail roughness growth on tangent railway tracks. *Journal of Sound and Vibration*, 23 October 2003, vol. 267, Iss. 3, Pp. 537–548. DOI: 10.1016/S0022-460X(03)00713-2.
14. Gry L. Dynamic modelling of railway track based on wave propagation. *Journal of Sound and Vibration*, 22 August 1996, vol. 195, Iss. 3, Pp. 477–505. DOI: 10.1006/jsvi.1996.0438.
15. Mandal N. K. On the low cycle fatigue failure of insulated rail joints (IRJs). *Engineering Failure Analysis*, May 2014, vol. 40, Pp. 58–74. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.02.006.
16. Benson D. J., Hallquist J. O. A single surface contact algorithm for the post-buckling analysis of shell structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, January 1990, vol. 78, Iss. 2, Pp. 141–163. DOI: 10.1016/0045-7825(90)90098-7.

17. Thompson D. J., Vliet van W. J., Verheij J. W. Developments of the indirect method for measuring the high frequency dynamic stiffness of resilient elements. *Journal of Sound and Vibration*, 8 May 1998, vol. 213, Iss. 1, Pp. 169–188. DOI: 10.1006/jsvi.1998.1492.
18. Hong X., Xiao G., Haoyu W., Xing L. et al. Fatigue damage analysis and life prediction of e-clip in railway fasteners based on ABAQUS and FE-SAFE. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10(3), Pp. 1–12. DOI: 10.1177/1687814018767249.
19. Deshimaru T., Tamagawa S., Kataoka H. Permissible lateral force and fatigue life for rail fastening system. *Quarterly Report of RTRI*, 2017, vol. 58, Pp. 236–241. Available at: https://www.researchgate.net/publication/319324842_Permissible_Lateral_Force_and_Fatigue_Life_for_Rail_Fastening_System.
20. Liu Y., Li Q., Jiang X., Liu H. et al. The Effect of Material Static Mechanical Properties on the Fatigue Crack Initiation Life of Rail Fastening Clips. *Hindawi Advances in Civil Engineering*, Vol. 2021, article ID 1366007, 14 p. DOI: 10.1155/2021/1366007.
21. Savin A. V. *Bezballastnyy put'* [Ballastless track]. Moscow: RAS Publ., 2017, 192 p. (In Russian)
22. Savin A. V., Kuznetsova A. V., Petrov A. V., Vasil'eva S. A. Tekhnicheskie trebovaniya k elementam verkhnego stroeniya puti [Technical requirements for track superstructure elements]. *Transportnoe stroitel'stvo: Sbornik statey vtoroy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Transport construction: Collection of articles from the second all-Russian scientific and technical conference]. Moscow: Pero Publ., 2021, Pp. 23–32. (In Russian)
23. Savin A. V. The Service Life of Ballastless Track. *Procedia Engineering*, 2017. vol. 189, Pp. 379–385. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.060.
24. Savin A. V., Solomatin E. V. *Vliyanie rel'sovykh skrepleny na ustoychivost' besstykovogo puti* [East European Scientific Journal]. *East European Scientific Journal*, 2023, Iss. 12(97), Pp. 13–18. Available at: <https://archive.eesa-journal.com/index.php/eesa/issue/view/93/142>. (In Russian)
25. Hovorukha V. Studying and improving intermediate rail fastening of rail. *E3S Web of Conferences* 109, 00028 (2019) *Essays of Mining Science and Practice* 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201910900028.
26. Petrov A. V., Mikhaylov S. V., Savin A. V. Zhestkost' rel'sovykh skrepleny bezballastnoy konstruktssii puti [Rigidity of rail fastenings of ballastless track structures]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Track and track facilities]. 2022, Iss. 1, Pp. 8–10. (In Russian)
27. Savin A., Ermakov V., Egorov M. Acoustic impact on bridges. Available at: <https://authors.elsevier.com/sd/article/S2352146522003106>.
28. Nikitin D., Nikitina L., Asoyan A., Marusin A. Analysis of strength characteristics in railroad dowels produced by various manufacturers. *Architecture and Engineering*, 2019, vol. 4, Iss. 1, Pp. 23–31. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-1-23-31.
29. Klaus H., Klaus K. An extended linear model for the prediction of short pitch corrugation. *Wear*, January 1996, vol. 191, Iss. 1–2, Pp. 161–169. DOI: 10.1016/0043-1648(95)06747-7.
30. Ilias H. The influence of railpad stiffness on wheelset/track interaction and corrugation growth. *Journal of Sound and Vibration*, 11 November 1999, vol. 227, Iss. 5, Pp. 935–948. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2059.

Received: March 23, 2025

Accepted: April 07, 2025

Author's information:

Evgeny V. SOLOMATIN — General Director, Applicant; 2604136@mail.ru

УДК 621.315.23

Подземная трехфазная линия электропередачи

Т. З. Сиукаев, Б. А. Дудин, Ю. Л. Беньяш, М. В. Шевлюгин, В. В. Варичева

Российский университет транспорта, Российская Федерация, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9ф, ГСП-4

Для цитирования: Сиукаев Т. З., Дудин Б. А., Беньяш Ю. Л., Шевлюгин М. В., Варичева В. В. Подземная трехфазная линия электропередачи // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 49–56. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-49-56

Аннотация

Цель: Рассмотрение конструктивно-технологического решения для компенсации реактивной мощности в кабельной линии, позволяющего снизить потери электроэнергии и повысить надежность системы электроснабжения. **Методы:** Метод аналитического обзора преимуществ и недостатков использования подземных кабельных линий электропередачи; расчетно-аналитическое исследование проводилось с применением теории длинных линий. **Результаты:** Проведены расчеты параметров трехфазной системы электроснабжения при различных межфазных расстояниях: результаты расчетов показывают емкостной характер комплекса входного сопротивления в режиме холостого хода и характер зависимости емкости кабельной линии от межфазного расстояния. **Практическая значимость:** Результаты работы подчеркивают преимущества использования подземных трехфазных линий электропередачи и обосновывают применение предлагаемой конструкции.

Ключевые слова: Подземная кабельная линия электропередачи, емкостной ток, реактивная мощность, трехфазная система электроснабжения, теория длинных линий, потери электроэнергии.

Кабельные линии электропередачи играют важную роль в обеспечении надежного и безопасного электроснабжения в различных условиях. Кабельная линия электропередачи — это система, используемая для передачи электроэнергии с помощью подземных или подводных кабелей. Такие линии обеспечивают надежную и безопасную передачу электроэнергии, особенно в условиях, где воздушные линии не могут быть использованы.

Подземные кабели могут быть одножильными или многожильными, с различными типами изоляции. Подводные кабели имеют дополнительную защиту от влаги и коррозии.

К преимуществам использования подземных кабельных линий относятся отсутствие необходимости в вырубке деревьев для прокладки линий и эстетика их прокладки, позволяющая не портить внешний вид и ландшафт городской среды: например, в природных заповедниках и парках, где важно минимизировать воздействие на окружающую среду. Такие кабельные линии менее подвержены влиянию погодных условий, что снижает риски повреждений от природных явлений, и, соответственно, реже происходят обрывы и повреждения проводов. Подземные линии менее заметны и могут использоваться для электроснабжения объектов, требующих скрытности, таких как военные базы и стратегические объекты [1].

Основным недостатком подземных кабельных линий является большая емкость между проводами кабеля, наличие которой приводит к генерации линейной реактивной мощности даже при отсутствии нагрузки (режим холостого хода) [2, 3]. Это явление называется «емкостной ток», который может вызывать дополнительные потери энергии и снижать общую эффективность системы электроснабжения. Например, в [4] показано, что в кабельной линии длиной 100 км ток холостого хода в начале линии составляет 9 А на 1 кВ питающего напряжения, т. е. при $U_{\text{л}} = 10$ кВ ток линии составит 90 А. Для компенсации, генерируемой емкостью линии реактивной мощности, применяют специальные индуктивные реакторы, устанавливаемые в начале линии [5].

Индуктивные реакторы играют ключевую роль в компенсации реактивной мощности, генерируемой емкостью кабельной линии. Они работают следующим образом [6, 7]:

- индуктивные реакторы потребляют индуктивную реактивную мощность, которая компенсирует емкостную реактивную мощность, потребляемую кабельной линией, что позволяет снизить общий реактивный ток в системе;
- для правильного выбора реактора необходимо провести расчет реактивной мощности, потребляемой кабельной линией, и подобрать реактор с соответствующей индуктивностью;
- компенсация реактивной мощности снижает нагрузку на генераторы и трансформаторы, что повышает надежность всей системы электроснабжения [8, 9].

В связи с вышеизложенным авторами предлагается подземная система электроснабжения объектов, которая представляет собой систему трех одножильных кабелей, расположенных на специальной, удерживающей их по вершинам равностороннего треугольника, конструкции (рис. 1).

Также эта система может быть помещена в пластиковый короб или кабельный канал. Дополнительно в предлагаемой системе предусмотрена прокладка информационных оптоволоконных кабелей.

Авторами были проведены расчеты первичных параметров такой системы электроснабжения при различных расстояниях между проводами трехфазной системы. Каждая фаза рассматривалась как «длинная линия», и расчет производился с применением теории длинных линий, известных из курса теоретических основ электротехники [10].

Для расчета были определены первичные параметры линии:

$R_{\text{л(м)}}$ — продольное активное сопротивление проводов линии на единицу длины (1 метр);

$L_{\text{л(м)}}$ — индуктивность двух противостоящих друг другу участков линии на единицу длины (1 метр);

$C_{\text{л(м)}}$ — емкость, образованная противостоящими друг другу участками линии на единицу длины (1 метр);

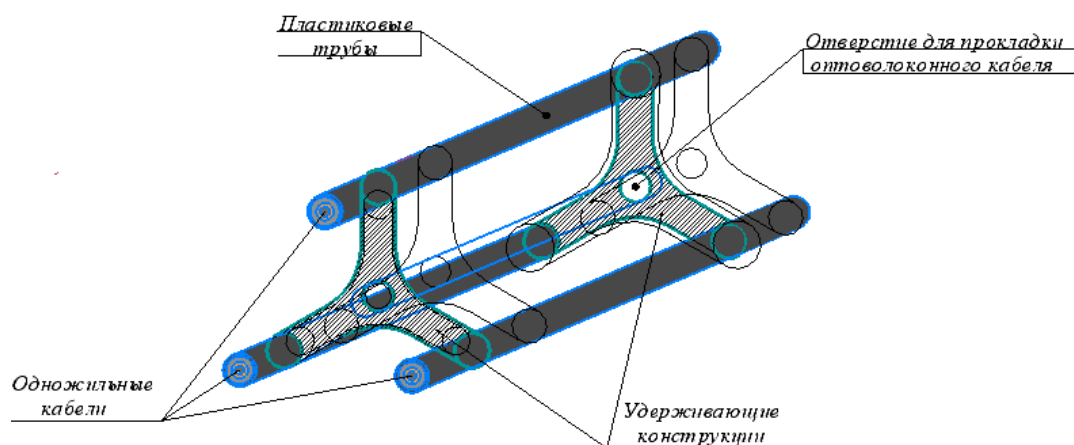


Рис. 1. Предлагаемая модернизация подземной трехфазной системы электроснабжения

$G_{л(м)}$ — поперечная проводимость, появляющаяся вследствие несовершенства изоляции между проводами линии на единицу длины (1 метр), причем она не является обратной величиной продольного активного сопротивления; А также вторичные параметры линии:

– продольное комплексное сопротивление линии на единицу длины (1 метр) на частоте $f(\omega = 2\pi f)$ определяется через $R_{л(м)}$ и $L_{л(м)}$ по формуле:

$$\underline{Z}_{0л(м)} = R_{л(м)} + j\omega \cdot L_{л(м)}. \quad (1)$$

– поперечная комплексная проводимость линии на единицу длины (1 метр) на частоте $f(\omega = 2\pi f)$ определяется через $G_{л(м)}$ и $C_{л(м)}$ по формуле:

$$\underline{Y}_{0л(м)} = G_{л(м)} + j\omega \cdot C_{л(м)}. \quad (2)$$

Непосредственно вторичными параметрами линии являются ее волновое сопротивление и постоянная распространения, которые определяются через продольное комплексное сопротивление и поперечную комплексную проводимость.

Волновое сопротивление:

$$\underline{Z}_{ВЛ} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{0л(м)}}{\underline{Y}_{0л(м)}}}. \quad (3)$$

Постоянная распространения:

$$\underline{\gamma}_{л(м)} = \sqrt{\underline{Z}_{0л(м)} \cdot \underline{Y}_{0л(м)}} = \alpha_{л(м)} + j\beta_{л(м)}, \quad (4)$$

где α — коэффициент затухания, который характеризует собой затухание падающей волны на единицу длины линии;

β — коэффициент фазы, который характеризует изменение фазы падающей волны на единицу длины линии.

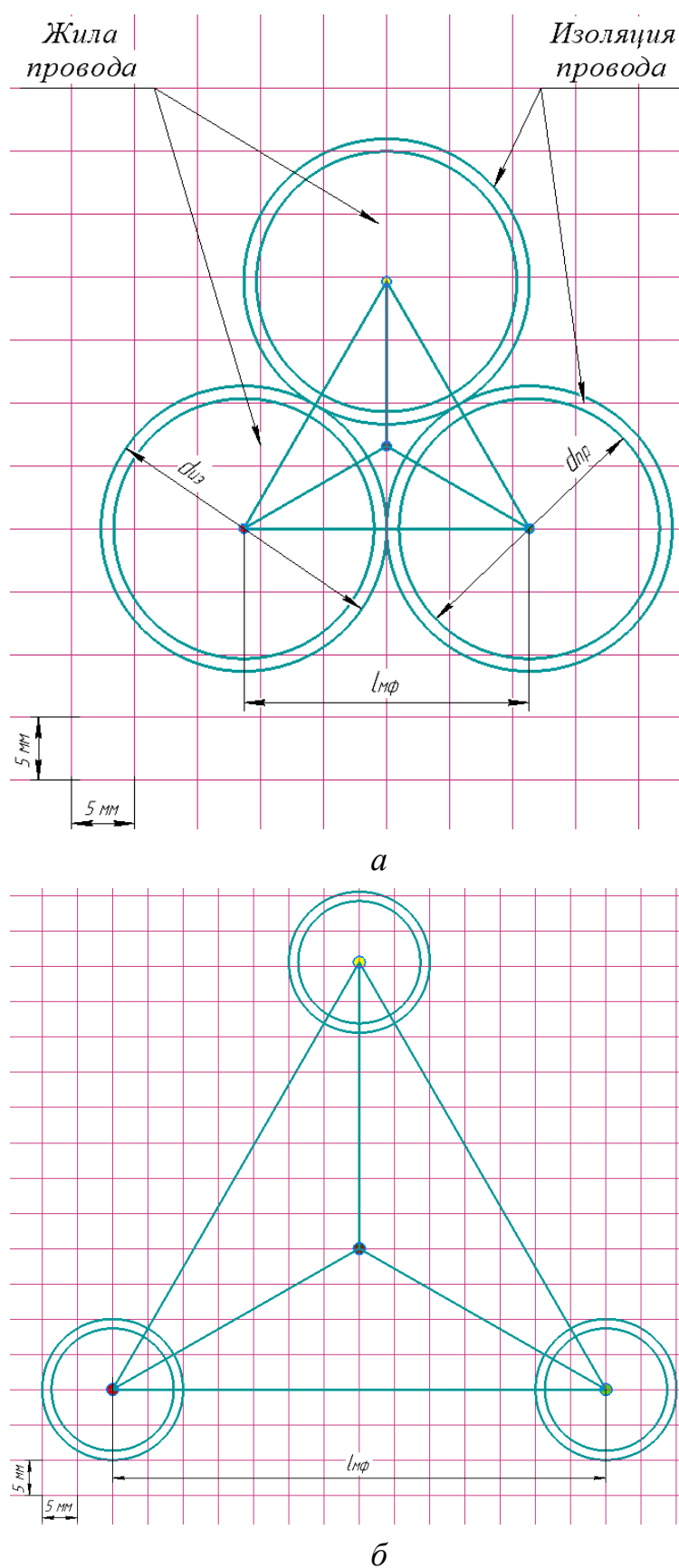


Рис. 2. Положение проводов подземной ЛЭП при различных расстояниях между геометрическими осями проводов: *a* — $l_{мф} = 22,5$ мм; *б* — $l_{мф} = 70$ мм

Для определения распределения напряжений и токов вдоль линии были записаны уравнения линии в гиперболических функциях:

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_1 \cdot ch(\gamma_{Л(м)} \cdot x) - \dot{I}_1 \cdot Z_{ВЛ} \cdot sh(\gamma_{Л(м)} \cdot x). \quad (5)$$

$$\dot{I}(x) = \dot{I}_1 \cdot ch(\gamma_{Л(м)} \cdot x) - \frac{\dot{U}_1}{Z_{ВЛ}} \cdot sh(\gamma_{Л(м)} \cdot x). \quad (6)$$

Эта система уравнений, записанная в комплексной форме, применима для каждой пары фаз трехфазной системы напряжений.

В табл. 1 и 2 приведены результаты расчетов комплексов входного сопротивления, модуля тока в начале и напряжения в конце линии, а также комплексной мощности в режиме холостого хода при различном межфазном расстоянии ($l_{мф}$, см) и при различных длинах линий (табл. 1 при $l_{л} = 100$ км, табл. 2 при $l_{л} = 20$ км). Сечение проводов фаз принималось $S_{пр} = 300$ мм² ($R_{пр} = 9,8$ мм), напряжение на входе линии $U_{л} = 1$ кВ.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчетов первичных параметров
подземной трехфазной системы электроснабжения при длине линии $l_{л} = 100$ км

$l_{мф}$, см	$Z_{ВХ}$, Ом	$ I_1 $, А	$ U_2 $, В	S_1 , В·А	$C_{л}$, мкФ
2,25	$2 - j \cdot 109$	9,1	1061	$172 - j \cdot 9177$	28,4
2,5	$2 - j \cdot 237$	4,2	1031	$37 - j \cdot 4216$	13,2
3,0	$2,1 - j \cdot 403$	2,5	1021	$13 - j \cdot 2483$	7,8
4,0	$2,2 - j \cdot 617$	1,6	1017	$5,8 - j \cdot 1620$	5,1
6,0	$2,4 - j \cdot 910$	1,1	1014	$2,9 - j \cdot 1099$	3,5
10,0	$2,7 - j \cdot 1314$	0,8	1013	$1,6 - j \cdot 761$	2,4
20,0	$3,7 - j \cdot 2124$	0,5	1010	$0,8 - j \cdot 471$	1,5
30,0	$5 - j \cdot 2892$	0,35	1008	$0,6 - j \cdot 346$	1,1
40,0	$7 - j \cdot 3836$	0,26	1007	$0,5 - j \cdot 261$	0,8

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов первичных параметров
подземной трехфазной системы электроснабжения при длине линии $l_{л} = 20$ км

$l_{мф}$, см	$Z_{ВХ}$, Ом	$ I_1 $, А	$ U_2 $, В	S_1 , В·А	$C_{л}$, мкФ
2,25	$0,5 - j \cdot 562$	1,8	1002	$1,6 - j \cdot 1779$	5,7
2,5	$0,67 - j \cdot 1213$	0,83	1001	$0,45 - j \cdot 824,6$	2,6
3,0	$0,96 - j \cdot 2055$	0,49	1001	$0,23 - j \cdot 486,7$	1,55
4,0	$1,5 - j \cdot 3134$	0,32	1001	$0,15 - j \cdot 319,1$	1,02
6,0	$2,4 - j \cdot 4598$	0,22	1001	$0,11 - j \cdot 217,5$	0,69
10,0	$4,1 - j \cdot 6670$	0,15	1000	$0,09 - j \cdot 149,9$	0,48
20,0	$8,9 - j \cdot 10\,710$	0,09	1000	$0,08 - j \cdot 93,3$	0,3
30,0	$15,3 - j \cdot 14\,540$	0,07	1000	$0,07 - j \cdot 68,8$	0,22
40,0	$25,6 - j \cdot 19\,260$	0,05	1000	$0,07 - j \cdot 51,9$	0,17

Расчеты показывают, что комплекс входного сопротивления в режиме холостого хода носит емкостной характер. Комплекс полной мощности практически чисто реактивный и составляет от 2 до 10 кВА (при $l_{\text{л}} = 20$ км и $l_{\text{л}} = 100$ км соответственно) при минимальных межфазных расстояниях. Также при увеличении расстояния между фазными проводами на удерживающей конструкции до 30–40 см емкостной ток уменьшается в 20–30 раз. Это связано с тем, что зависимость емкости линии от межфазного расстояния ($l_{\text{мф}}$, см) носит ярко выраженный гиперболический характер.

Таким образом, в первом приближении применение предлагаемой системы электроснабжения позволяет сохранить преимущества кабельных линий и исключить недостатки, присущие последним.

Список источников

1. Сюрсин Е. С. Особенности эксплуатации и анализ технического состояния кабельных линий в РВСН: сб. научных трудов 4 ЦНИИ МО РФ / Е. С. Сюрсин, А. С. Верещагин. — Королев, 2018. — Вып. 139. — Т. 1, Ч. 2. — С. 181–185.
2. Иоссель Ю. А. Расчет электрической емкости / Ю. А. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 288 с.
3. Хренков Н. Н. Расчет и измерение емкости двухжильных кабелей / Н. Н. Хренков // Кабели и провода. — 2022. — № 4. — С. 23–29.
4. Дмитриев М. В. Особенности передачи мощности по протяженным КЛ 6–500 кВ переменного напряжения / М. В. Дмитриев // Электроэнергия передача и распределение. — 2017. — № 2(41). — С. 28–34.
5. Грешняков Г. В. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей / Г. В. Грешняков, Г. Г. Ковалев, С. Д. Дубицкий // Кабели и провода. — 2011. — С. 12–16.
6. Белоруссов Н. И. Электрические кабели и провода / Н. И. Белоруссов. — М.: Энергия, 1971. — 512 с.
7. Солуянов Ю. И. Энергосберегающие решения в распределительных электрических сетях на основе анализа их фактических нагрузок / Ю. И. Солуянов, А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин, В. А. Халтурин // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2020. — № 5(62). — С. 68–73.
8. Кучеренко Д. Е. Минимизация потерь электроэнергии / Д. Е. Кучеренко, Р. Е. Кучеренко, И. П. Петрушенко // Энергосбережение и водоподготовка. — 2023. — № 6(146). — С. 27–29.
9. Воротницкий В. Э. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях энергоснабжающих организаций / В. Э. Воротницкий, М. А. Калинкина, В. Н. Апрыткин // Энергосбережение. — 2000. — № 3. — С. 53–56.
10. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Т. 1. Электрические цепи: учебник для вузов / Л. А. Бессонов. — 12-е изд., испр. и доп. — М.: Юрайт, 2023. — 831 с.

Дата поступления: 23.03.2025

Решение о публикации: 15.05.2025

Контактная информация:

СИУКАЕВ Тамерлан Заурович — аспирант; stz777@mail.ru

ДУДИН Борис Алексеевич — канд. техн. наук, доц.; dubodin@mail.ru

БЕНЬЯШ Юрий Леонидович — ст. преподаватель; yurlbe@mail.ru

ШЕВЛЮГИН Максим Валерьевич — д-р техн. наук, доц.; mx_sh@mail.ru

ВАРИЧЕВА Вероника Владимировна — аспирант; veronicka.varicheva@yandex.com

Underground Three-Phase Power Transmission Line

T. Z. Siukaev, B. A. Dudin, Yu. L. Ben'yash, M. V. Shevlyugin, V. V. Varicheva

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., OCP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Siukaev T. Z., Dudin B. A., Ben'yash Yu. L., Shevlyugin M. V., Varicheva V. V. Underground Three-Phase Power Transmission Line. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 49–56. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-49-56

Summary

Purpose: To consider a design and technological solution for reactive power compensation in a cable line. Firstly, to reduce power losses and, secondly, to increase the reliability of the power supply system. **Methods:** The method of analytical review of the advantages and disadvantages of underground cable transmission lines was employed; the calculation and analytical research was carried out using the theory of long lines. **Results:** The calculations for the three-phase power supply system parameters were conducted at varying interphase distances. The calculation results have demonstrated the capacitive nature of the input resistance complex in the idle mode and the dependence of the cable line capacitance on the interphase distance. **Practical significance:** The research results emphasize the advantages of using underground three-phase power transmission lines and justify the application of the proposed design.

Keywords: Underground power line, capacitive current, reactive power, three-phase power supply system, long line theory, power losses.

References

1. Syursin E. S., Vereshchagin A. S. *Osobennosti ekspluatatsii i analiz tekhnicheskogo sostoyaniya kabel'nykh liniy v RVSN: sb. nauchnykh trudov 4 TsNII MO RF* [Features of operation and analysis of the technical condition of cable lines in the Strategic Missile Forces: collection of scientific papers of the 4th Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation]. Korolev, 2018, Iss. 139, vol. 1, part 2, pp. 181–185. (In Russian)
2. Iossel' Yu. A., Kochanov E. S., Strunskiy M. G. *Raschet elektricheskoy emkosti. 2-e izd., pererab. i dop.* [Calculation of electrical capacity. 2nd ed., revised. and additional]. L.: Energoizdat Publ., 1981, 288 p. (In Russian)

3. Khrenkov N. N. Raschet i izmerenie emkosti dvukhzhil'nykh kabeley [Calculation and measurement of the capacity of two-core cables]. *Kabeli i provoda* [Cables and wires]. 2022, Iss. 4, pp. 23–29. (In Russian)
4. Dmitriev M. V. Osobennosti peredachi moshchnosti po protyazhennym KL 6–500 kV peremennogo napryazheniya [Features of power transmission over extended 6–500 kV AC cable lines]. *Elektroenergiya peredacha i raspredelenie* [Electric power transmission and distribution]. 2017, Iss. 2(41), pp. 28–34. (In Russian)
5. Greshnyakov G. V., Kovalev G. G., Dubitskiy S. D. K voprosu o vybore predel'no dopustimyykh tokov silovykh kabeley [On the issue of selecting maximum permissible currents of power cables]. *Kabeli i provoda* [Cables and wires]. 2011, pp. 12–16. (In Russian)
6. Belorussov N. I. *Elektricheskie kabeli i provoda* [Electrical cables and wires]. Moscow: Energiya Publ., 1971, 512 p. (In Russian)
7. Soluyanov Yu. I., Fedotov A. I., Akhmetshin A. R., Khalturin V. A. Energoberegayushchie resheniya v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh na osnove analiza ikh fakticheskikh nagruzok [Energy-saving solutions in distribution electrical networks based on the analysis of their actual loads]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric power. Transmission and distribution]. 2020, Iss. 5(62), pp. 68–73. (In Russian)
8. Kucherenko D. E., Kucherenko R. E., Petrushenko I. P. Minimizatsiya poter' elektroenergii [Minimization of electric power losses]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy saving and water treatment]. 2023, Iss. 6(146), pp. 27–29. (In Russian)
9. Vorotnitskiy V. E., Kalinkina M. A., Apryatkin V. N. Meropriyatiya po snizheniyu poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh energosnabzhayushchikh organizatsiy [Measures to reduce electric power losses in electrical networks of energy supplying organizations]. *Energoberezhenie* [Energy saving]. 2000, Iss. 3, pp. 53–56. (In Russian)
10. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. V 2 t. T. 1. Elektricheskie tsepi: uchebnik dlya vuzov. 12-e izd., ispr. i dop.* [Theoretical foundations of electrical engineering. In 2 volumes. Volume 1. Electrical circuits: textbook for universities. 12th ed., corrected. and additional]. Moscow: Yurayt Publ., 2023, 831 p. (In Russian)

Received: March 23, 2025

Accepted: May 15, 2025

Author's information:

Tamerlan Z. SIUKAEV — Postgraduate Student; stz777@mail.ru

Boris A. DUDIN — PhD in Engineering, Associate Professor; dubodin@mail.ru

Yury L. BEN'YASH — Senior Lecturer; yurlbe@mail.ru

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

Veronika V. VARICHEVA — Postgraduate student; veronicka.varicheva@yandex.com

УДК 629.4.015:629.4.027.25

Влияние упругого элемента буксового узла на ресурс боковой рамы тележки с осевой нагрузкой 25 тс

В. А. Чернов¹, Л. В. Цыганская¹, Д. Г. Бейн²

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

²АО «НВЦ «Вагоны», Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр-кт, 22, литера М,

Для цитирования: Чернов В. А., Цыганская Л. В., Бейн Д. Г. Влияние упругого элемента буксового узла на ресурс боковой рамы тележки с осевой нагрузкой 25 тс // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 57–68. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-57-68

Аннотация

Цель: Оценка влияния упругих элементов в буксовых узлах тележки модели 18-9891 на ресурс боковой рамы на основании цифрового моделирования, экспериментально полученных пределов выносливости и результатов ходовых испытаний. **Методы:** Ходовые динамико-прочностные испытания, ускоренные стендовые испытания усталостной прочности боковых рам тележки, цифровое моделирование динамики с использованием программного продукта «Универсальный механизм». На основании теоретически полученных зависимостей коэффициента динамической добавки необрессоренных частей и экспериментально полученных значений предела выносливости определено влияние упругой связи в буксовом узле на эквивалентную амплитуду динамических напряжений. **Результаты:** По результатам динамического моделирования на цифровых моделях получены зависимости значений коэффициента динамической добавки необрессоренных частей тележки под груженным и порожним вагоном от статических прогибов упругой скобы в буксовом узле. Экспериментально получены значения предела выносливости и амплитуд динамических напряжений для боковых рам с упругими элементами в буксовом узле, на основании которых спрогнозирован ресурс боковых рам. Расхождение между экспериментальными данными по коэффициенту динамической добавки необрессоренных частей тележки и результатам цифрового моделирования показало сходимость результатов в пределах 5–8 %. На основании теоретических и экспериментальных исследований оценено влияние упругих скоб в буксовом узле тележки на ресурс боковых рам, на основании которого обоснована возможность снижения их металлоемкости. **Практическая значимость:** Подтвержден увеличенный ресурс боковой рамы тележки с упругими элементами, обоснована возможность увеличения срока службы и межремонтных пробегов для грузовой тележки модели 18-9891 по критерию запаса сопротивления усталости литых элементов. Показана возможность снижения металлоемкости боковой рамы.

Ключевые слова: Грузовая тележка, рама боковая, ресурс, срок службы, сопротивление усталости.

Введение

Основными критериями предельного состояния литых деталей трехэлементных тележек грузовых вагонов, ограничивающими их ресурс, являются износы и визуально обнаруживаемые трещины. По статистике, возникновение трещин в несущих конструкциях тележек — основная причина серьезных аварийных ситуаций: сходов и крушений поездов. При этом гарантированно исключить

возможность трещинообразования на всех этапах жизненного цикла тележки не представляется возможным.

Задача минимизации рисков, угрожающих безопасности движения, может быть решена путем комплексного подхода к проектированию и испытаниям ходовых частей. Подтверждение ресурса литых деталей тележек выполняется на основании комплекса расчетов, стендовых ускоренных испытаний и ходовых динамико-прочностных испытаний.

Уменьшение износов, улучшение динамических показателей и повышение ресурса ходовых частей — основные задачи, решение которых позволяет повысить конкурентоспособность грузовой тележки на рынке и безопасность ее эксплуатации. В 2022 году была поставлена на производство новая тележка модели 18-9891 компании «РМ Рейл» с осевой нагрузкой 25 тс [1]. При проектировании указанной тележки решались задачи не только обеспечения необходимых нормативных динамических и прочностных характеристик, но и улучшения целого ряда показателей в сравнении с серийно выпускаемыми тележками.

Тележка модели 18-9891 компании «РМ Рейл» разработана при участии специалистов ПГУПС [2–4].

Для уменьшения износов колесных пар и повышения трещиностойкости боковых рам в тележке были применены упругие скобы [5, 6], основной задачей которых было обеспечение центрирования колесной пары в буксовом проеме, и дополнительно рассматривался вопрос снижения динамической нагруженности боковой рамы тележки. Общий вид упругой скобы буксового узла тележки 18-9891 приведен на рис. 1.

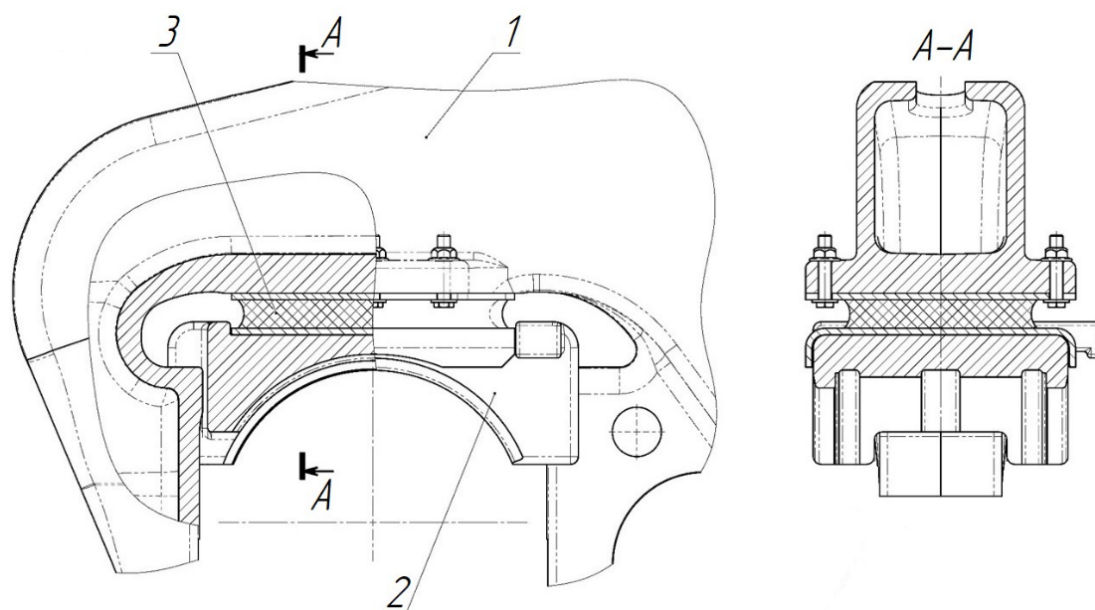


Рис. 1. Общий вид упругой скобы буксового узла тележки 18-9891:
1 — боковая рама тележки; 2 — адаптер; 3 — упругая скоба буксового узла

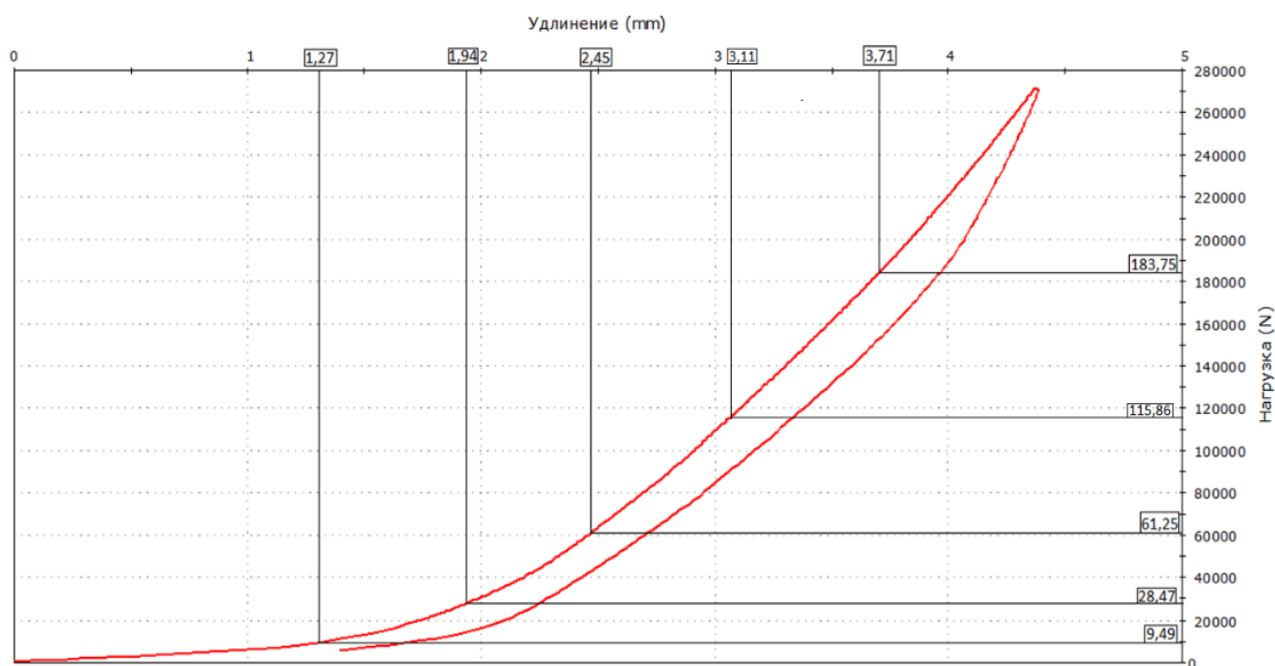


Рис. 2. Силовая характеристика материала упругой скобы

Силовая характеристика материала упругой скобы (поз. 3 на рис. 1) приведена на рис. 2. Указанная характеристика получена с помощью экспериментальных исследований при разработке и постановке на производство тележки 18-9891.

Теоретическая оценка динамических показателей

Оценка динамических показателей тележки модели 18-9891 с упругими вставками в буксовом узле выполнялась на этапе проектирования по результатам моделирования с использованием известного программного продукта «Универсальный механизм». Расчет динамических качеств производился для диапазона вертикальных статических прогибов упругого элемента в буксовом узле тележки, установленной под вагон-хоппер модели 19-1299.

Результаты моделирования показали, что статический прогиб упругого элемента в буксовом узле в пределах 1–3 мм позволяет снизить значение коэффициента динамической добавки K_d необрессоренных частей грузовой тележки на 25–30 % для порожнего вагона и 8–10 % для груженого вагона.

Зависимость коэффициента динамической добавки K_d необрессоренных частей от статического прогиба f упругого элемента представлена на рис. 3 (для порожнего вагона) и на рис. 4 (для груженого вагона).

Снижение коэффициента динамической добавки необрессоренных частей тележки свидетельствует о снижении их нагруженности с эксплуатации при наличии упругого элемента в буксовом узле тележки.

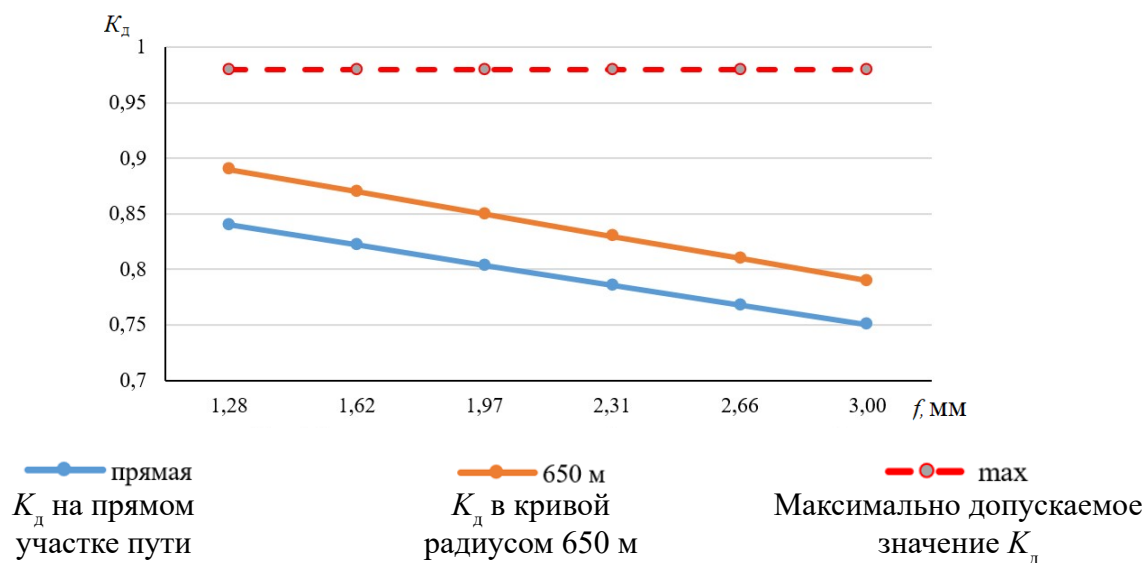


Рис. 3. Зависимость коэффициента динамической добавки K_d необрессоренных частей от статического прогиба f упругого элемента для порожнего вагона

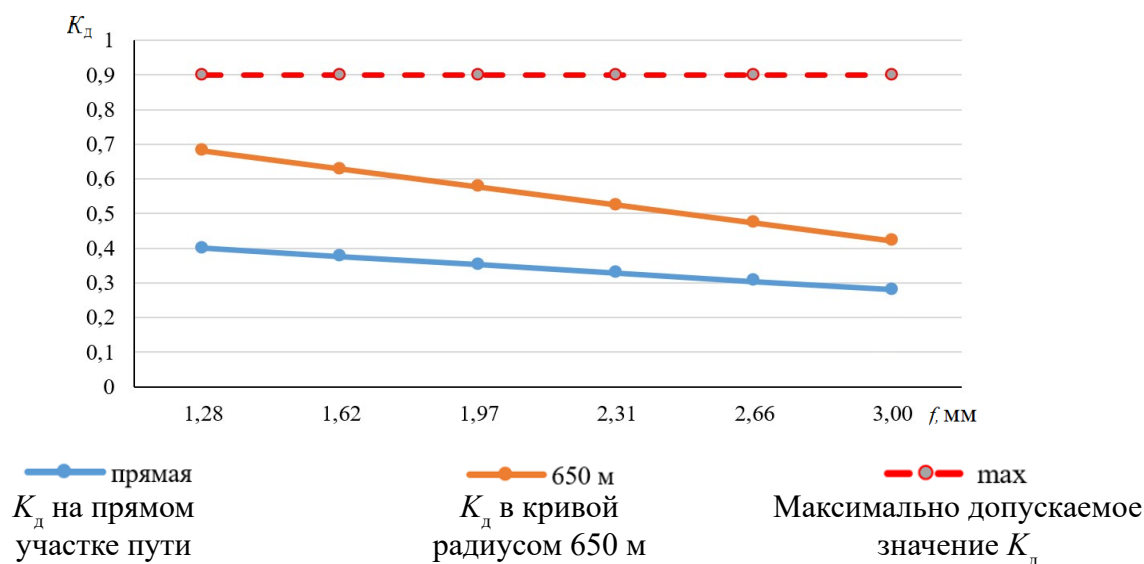


Рис. 4. Зависимость коэффициента динамической добавки K_d необрессоренных частей от статического прогиба f упругого элемента для груженого вагона

Экспериментальное определение предела выносливости

Экспериментальное определение пределов выносливости литых боковых рам тележки модели 18-9891 изготовления ООО «ВКМ-Сталь» выполнялось в рамках проведения приемочных и квалификационных испытаний. Перед каждым видом испытаний производился отбор девяти боковых рам методом «вслепую» по ГОСТ 18321 [7], после их приемки отделом технического контроля предприятия-изготовителя на соответствие требованиям конструкторской документации и ГОСТ 32400 [8].

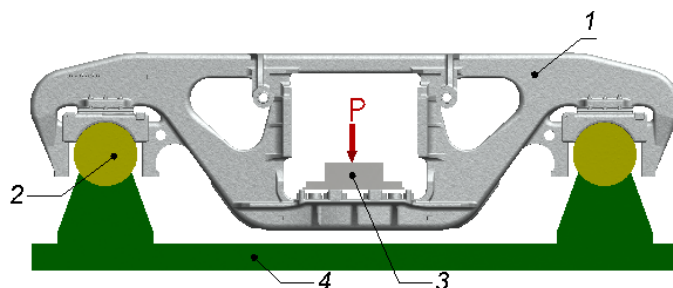


Рис. 5. Схема нагружения боковой рамы:
 1 — рама боковая; 2 — катковая опора; 3 — силовой стол с опорными тумбами;
 4 — приспособление для приложения нагрузки с сегментами

Схема нагружения боковой рамы при проведении усталостных испытаний приведена на рис. 5. Усталостные испытания боковых рам проведены по разработанной программе — методике испытаний, с учетом требований методики [9].

Испытания были проведены в лабораторном корпусе при нормальных климатических условиях. Каждую деталь испытывали при асимметричном цикле до разрушения или достижения базового числа циклов нагружения $N_0 = 10^7$. Режимы испытаний: $P_m = 42$ тс — средняя нагрузка цикла; P_{ai} — амплитуда переменной силы изменялась в пределах от 26 до 34 тс. Средняя нагрузка цикла (P_m) принималась одинаковой в процессе проведения полных усталостных испытаний всех деталей партии боковых рам. Испытания проведены на 4 уровнях амплитуд переменных нагрузок. Частота действия переменных нагрузок находилась в пределах 5–6 Гц [10].

Испытания проводились в непрерывном режиме с визуальным контролем усталостных трещин на испытательной машине ЦДМ — 200 ПУ. После обнаружения трещины длиной 15–25 мм испытания продолжались до разрушения детали или до потери несущей способности. Под потерей несущей способности понималось такое повреждение детали циклической нагрузкой, при котором дальнейшее нагружение детали становилось невозможным из-за значительного уменьшения жесткости.

Результаты усталостных испытаний первой и второй партии боковых рам приведены в табл. 1.

По полученным статистическим характеристикам построена кривая усталости в логарифмических координатах $\lg P_a - \lg N$, описываемая уравнением линии регрессии пределов выносливости детали и отражающая средневероятное положение кривой усталости для испытанных деталей:

$$\lg P_a, N = (\lg P_a)_{cp} + \frac{1}{m} \left[\lg N - (\lg P_a)_{cp} \right].$$

ТАБЛИЦА 1. Результаты усталостных испытаний первой и второй партии боковых рам тележки 18-9891

Лаб. № образца	Амплитуда переменной силы уровня i , P_{ai} , кН (тс)	Число циклов нагружения	
		до трещины, $N_{тр}$	до потери несущей способности, N_i
Первая партия			
01	333 (34)	1 821 000	2 622 000
02	333 (34)	1 205 000	1 512 000
03	314 (32)	5 491 000	5 493 000
04	314 (32)	2 883 000	3 611 000
05	294 (30)	3 692 000	4 905 000
06	294 (30)	5 208 000	5 421 000
07	274 (28)	6 025 000	6 130 000
08	274 (28)	4 474 000	5 624 000
09	264 (27)	Более 10 000 000 (трещины отсутствуют)	Более 10 000 000 (без потери несущей способности)
Вторая партия			
01	334 (34)	1 594 000	1 821 000
02	334 (34)	985 000	1 205 000
03	314 (32)	5 236 000	5 491 000
04	314 (32)	2 652 000	2 883 000
05	294 (30)	3 437 000	3 692 000
06	294 (30)	5 026 000	5 208 000
07	275 (28)	5 781 000	6 025 000
08	275 (28)	4 252 000	4 474 000
09	264 (27)	Более 10 000 000 (трещины отсутствуют)	Более 10 000 000 (без потери несущей способности)

Кривые выносливости боковых рам при вероятности неразрушения ($\alpha = 50\%$) и ($\alpha = 95\%$) показаны на рис. 6. Влияние на предел выносливости упругих элементов, показанное в работе [11], в настоящей работе не учитывалось ввиду малых статических прогибов упругой связи буксового узла тележки 18-9891 (порядка 2 мм).

Ходовые динамико-прочностные испытания проводились на скоростном испытательном полигоне АО «ВНИИЖТ» (СИП), направление Белореченская — Майкоп, по методикам, разработанным в соответствии с ГОСТ 33788 [12]. Фактический статический прогиб упругого элемента буксового узла тележки 18-9891, замеренный перед проведением испытаний, составил 2 мм.

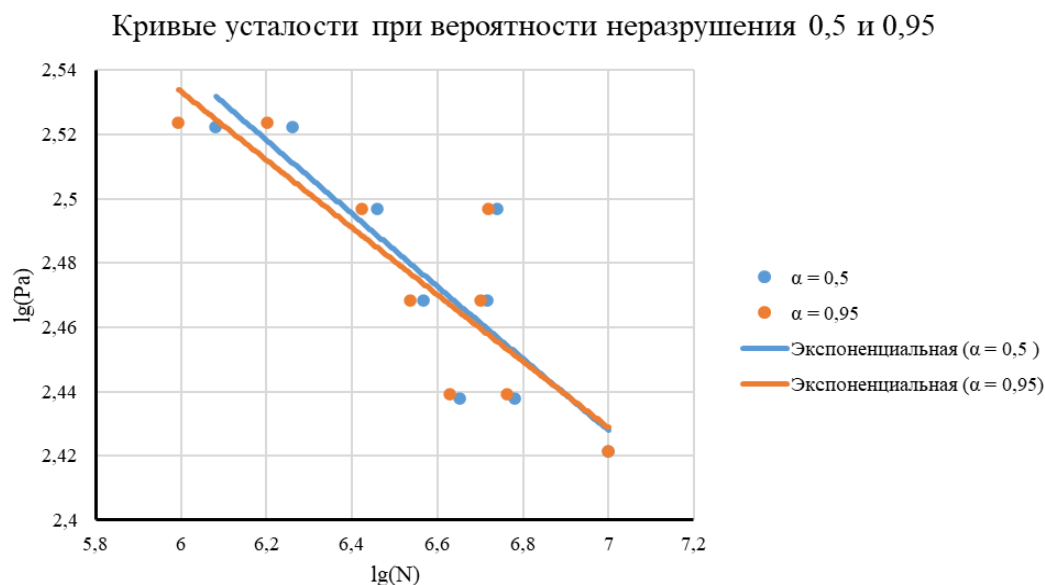


Рис. 6. Кривые усталости боковых рам тележки модели 18-9891 по результатам полных усталостных испытаний (9 деталей): вероятность неразрушения $\alpha = 0,5$

По результатам ходовых динамико-прочностных испытаний получены экспериментальные показатели динамики и прочности, по которым определены амплитуды динамических напряжений, эквивалентные по повреждающему действию за расчетный ресурс 32 года и 40 лет, и коэффициенты запаса сопротивления усталости в соответствии с ГОСТ 33211 [13].

Минимальный коэффициент запаса сопротивления усталости боковой рамы тележки 18-9891 составил 4,4, при расчетном ресурсе 3,1 млн км и 4,1 при 4,0 млн км, что подтверждает значительный запас прочности боковых рам с упругим элементом.

Расхождение между экспериментальными данными по коэффициенту динамической добавки необрессоренных частей тележки и результатам цифрового моделирования показало сходимость результатов в пределах 5–8 %. При этом эквивалентные амплитуды напряжений в зоне внутреннего радиуса буксового проема ниже, чем показанные в работе [14] для тележки-аналога, с назначенным сроком службы 40 лет.

На основании теоретически полученных зависимостей коэффициента динамической добавки необрессоренных частей и экспериментально полученных значений предела выносливости определено влияние упругой связи в буксовом узле на эквивалентную амплитуду динамических напряжений. Зависимость амплитуды динамических напряжений в зоне внутреннего радиуса буксового проема, эквивалентная по повреждающему действию за расчетный ресурс 40 лет, от прогиба упругого элемента показана на рис. 7.

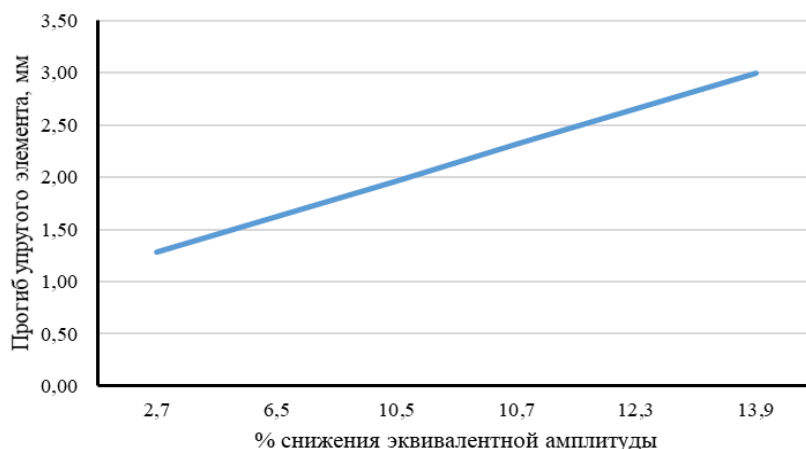


Рис. 7. Зависимость эквивалентной амплитуды от статического прогиба упругой скобы буксового узла

Заключение

По результатам динамического моделирования на цифровых моделях получены зависимости значений коэффициента динамической добавки необрессоренных частей трехэлементной тележки под груженным и порожним вагоном от статических прогибов упругой скобы в буксовом узле.

Экспериментально получены значения предела выносливости и амплитуд динамических напряжений для боковых рам с упругими элементами в буксовом узле, на основании которых спрогнозирован ресурс боковых рам.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований оценено влияние упругих скоб в буксовом узле трехэлементной тележки на ресурс боковых рам, на основании которого обоснована возможность снижения их металлоемкости.

Список источников

1. Цыганская Л. В. Тележка с осевой нагрузкой 25 тс. Концепция уменьшения воздействия на рельсы и износ колес / Л. В. Цыганская, А. Л. Ставский, И. О. Морозова, В. С. Коршунов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2022. — № 4(60). — С. 44–50.
2. Титова Т. С. «От идеи — до внедрения»: 25 лет работы над инновациями в подвижном составе / Т. С. Титова, Ю. П. Бороненко, Л. В. Цыганская // Транспорт Российской Федерации. — 2021. — № 4(95). — С. 31–35.
3. Ученые ПГУПС разработали новую модель тележки грузовых вагонов // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2023. — № 1(73). — С. 15.
4. Зимакова М. В. Тележка для грузового подвижного состава с осевой нагрузкой 25 Тс / М. В. Зимакова, А. В. Третьяков, В. С. Коршунов // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Второй Международной научно-технической кон-

ференции, Ташкент, 19–22 апреля 2023 года. — Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2023. — С. 176–182.

5. Патент на полезную модель № 215663 U1 Российская Федерация, МПК B61F 5/26, B61F 5/52. Тележка грузового вагона: № 2022131002. — Заявл. 29.11.2022: опубл. 21.12.2022 / А. Л. Ставский, А. А. Шмыгин, Ю. П. Бороненко и др.; заявитель акционерное общество «Рузаевский завод химического машиностроения».

6. Патент № 2781500 C1 Российская Федерация, МПК B61F 5/26. Тележка грузового вагона: № 2022110913: заявл. 21.04.2022: опубл. 12.10.2022 / А. Л. Ставский, А. А. Шмыгин, Ю. П. Бороненко и др.; заявитель акционерное общество «Рузаевский завод химического машиностроения».

7. ГОСТ 18321—73. Статистический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции. — М.: Стандартиформ, 2008.

8. ГОСТ 32400—2013. Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 2013.

9. Надрессорные балки и боковые рамы литые двухосных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методики испытаний на усталость. — М.: ОАО «ВНИИЖТ»; ОАО «НИИ вагоностроения», 2010. — 14 с.

10. Даниленко Д. В. Методика и результаты ресурсных (на усталость) испытаний боковых рам тележки модели 18-9891 / Д. В. Даниленко, В. А. Чернов, В. П. Ефимов, Т. М. Чернова // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XVII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 21–24 августа 2023 года. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. — С. 146–151.

11. Ефимов В. П. Исследование влияния упругой вставки адаптера на усталостную прочность боковой рамы тележки модели 18-194-1 / В. П. Ефимов, А. Н. Баранов, С. М. Буторин // Транспорт Российской Федерации. — 2015. — № 3(58). — С. 75–77.

12. ГОСТ 33788—2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. — М.: Изд-во стандартов, 2016.

13. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. — М.: Изд-во стандартов, 2014.

14. Орлова А. М. Результаты поездных испытаний тележки 18-9855 / А. М. Орлова, Д. В. Шевченко, Т. С. Куклин, С. В. Дмитриев // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2015. — № 1(41). — С. 44–45.

Дата поступления: 23.03.2025

Решение о публикации: 12.04.2025

Контактная информация:

ЧЕРНОВ Владимир Александрович — доц. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»;
chernov-nt@mail.ru

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»;
tcyganskaya@gmail.com

БЕЙН Дмитрий Григорьевич — канд. техн. наук, заместитель главного конструктора;
dgbain@mail.ru

Influence of the Axle Box Elastic Element on the Life of the Bogie Side Frame at 25 Tonnes Axial Load

V. A. Chernov¹, L. V. Tsyganskaya¹, D. G. Bein²

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

²“Scientific Research Center “Vagony” JSC, 22, Litera M, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Tsyganskaya L. V., Chernov V. A., Bein D. G. Influence of the Axle Box Elastic Element on the Life of the Bogie Side Frame at 25 Tonnes Axial Load. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, Pp. 57–68. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-57-68

Summary

Purpose: To assess the influence of the elastic elements of the axle box unit in the 18-9891 model bogie on the service life of the side frame based on the digital modelling, experimentally determined fatigue limits and the results of running tests. **Methods:** Running-dynamic-strength tests, accelerated bench tests of the fatigue strength of the bogie side frames, dynamic digital modelling using the Universal Mechanism software product. Theoretically obtained dependencies of the dynamic coefficient of the unsprung parts and the experimentally obtained values of the fatigue limit allowed determining the influence of the elastic connection in the axle box unit on the dynamic stress equivalent amplitude. **Results:** Based on the results of the digital dynamic modelling, the dependencies of the vertical dynamics coefficient of the bogie unsprung parts, both in a loaded and in an empty car, on the elastic bracket deflections in the axle box unit were obtained. The fatigue limit and the amplitudes of the dynamic stresses for the side frames with elastic elements in the axle box unit were determined experimentally, from which the service life of the side frames was predicted. The discrepancy between the experimental data on the dynamic stress coefficient of the unsprung parts of the bogie and that of the digital modelling showed that the results converged within 5-8%. Based on theoretical and experimental studies, the influence of the elastic brackets in the bogie axle box unit on the service life of the side frames has been estimated and the possibility of reducing their metal consumption has been demonstrated. **Practical significance:** The increased service life of the bogie side frame with elastic elements has been confirmed, and the possibility of increasing the service life and inter-repair runs for the 18-9891 freight bogie according to the criterion of the fatigue limit of cast elements has been demonstrated. The possibility of reducing the metal consumption of the side frame has been demonstrated.

Keywords: Cargo bogie, side frame of the car bogie, resource, service life, fatigue resistance.

References

1. Tsyganskaya L. V., Stavskiy A. L., Morozova I. O., Korshunov V. S. Telezhka s osevoy nagruzkoj 25 ts. Kontseptsiya umen'sheniya vozdeystviya na rel'sy i iznos [Bogie with an axle load of 25 tf. Concept of reducing the impact on rails and wheel wear]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolij: Tekhnika zheleznykh dorog* [Bulletin of the Institute for Natural Monopoly Problems: Railway Engineering]. 2022, Iss. 4(60), Pp. 44–50. (In Russian)
2. Titova T. S., Boronenko Yu. P., Tsyganskaya L. V. “Ot idei — do vnedreniya”: 25 let raboty nad innovatsiyami v podvizhnoy sostav [“From idea to implementation”: 25 years of work on

innovations in rolling stock]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2021, Iss. 4(95), Pp. 31–35. (In Russian)

3. Uchenye PGUPS razrabotali novuyu model' telezhki gruzovykh vagonov [Scientists from PGUPS have developed a new model of a freight car bogie]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo* [Cars and wagon fleet]. 2023, Iss. 1(73), Pp. 15. (In Russian)

4. Zimakova M. V., Tret'yakov A. V., Korshunov V. S. Telezhka dlya gruzovogo podvizhnogo sostava s osevoy nagruzkoy 25 TS [Bogie for freight rolling stock with an axle load of 25 TS]. *Zheleznodorozhnyy podvizhnyy sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy Vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Tashkent, 19–22 aprelya 2023 goda* [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: materials of the Second International Scientific and Technical Conference, Tashkent, April 19–22, 2023]. Tashkent: Tashkentskiy gosudarstvennyy transportnyy universitet Publ., 2023, Pp. 176–182. (In Russian)

5. Stavskiy A. L., Shmygin A. A., Boronenko Yu. P. et al. *Telezhka gruzovogo vagona* [Freight car bogie]. Patent RF, no. 215663, 2022. (In Russian)

6. Stavskiy A. L., Shmygin A. A., Boronenko Yu. P. et al. *Telezhka gruzovogo vagona* [Freight car bogie]. Patent RF, no. 2781500, 2022. (In Russian)

7. *GOST 18321—73. Statisticheskii kontrol' kachestva. Metody sluchaynogo otbora vyborok shtuchnoy produktsii* [GOST 18321—73. Statistical quality control. Methods of random sampling of individual products]. Moscow: Standartinform Publ., 2008. (In Russian)

8. *GOST 32400—2013. Rama bokovaya i balka nadressornaya litye telezhok zheleznodorozhnykh gruzovykh vagonov. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 32400—2013. Side frame and cast bolster beam of freight car bogies. Technical conditions]. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 2013. (In Russian)

9. *Nadressornye balki i bokovye ramy litye dvukhosnykh telezhok gruzovykh vagonov kolei 1520 mm. Metodiki ispytaniy na ustalost'* [Cast bolster beams and side frames of two-axle freight car bogies with a gauge of 1520 mm. Fatigue test methods]. Moscow: OAO "VNIIZhT"; OAO "NII vagonostroeniya", 2010, 14 p. (In Russian)

10. Danilenko D. V., Chernov V. A., Efimov V. P., Chernova T. M. Metodika i rezul'taty resursnykh (na ustalost') ispytaniy bokovykh ram telezhki modeli 18-9891 [Methodology and results of resource (fatigue) tests of side frames of bogie model 18-9891]. *Podvizhnyy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy KhVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 21–24 avgusta 2023 goda* [Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: materials of the XVII International scientific and technical conference, St. Petersburg, August 21–24, 2023]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2024, Pp. 146–151. (In Russian)

11. Efimov V. P., Baranov A. N., Butorin S. M. Issledovanie vliyaniya uprugoy vstavki adaptera na ustalostnuyu prochnost' bokovoy ramy telezhki modeli 18-194-1 [Study of the influence of the elastic insert of the adapter on the fatigue strength of the side frame of the bogie model 18-194-1]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2015, Iss. 3(58), Pp. 75–77. (In Russian)

12. *GOST 33788—2016. Vagony грузовые i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva* [GOST 33788—2016. Freight and passenger cars. Strength and dynamic quality test methods]. Moscow.: Izd-vo standartov Publ., 2016. (In Russian)

13. *GOST 33211—2014. Vagony грузовые. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST 33211—2014. Freight cars. Strength and dynamic quality requirements]. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 2014. (In Russian)

14. Orlova A. M., Shevchenko D. V., Kuklin T. S., Dmitriev S. V. Rezul'taty poezdnykh ispytaniy telezhki 18-9855 [Results of train tests of bogie 18-9855]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo* [Cars and car fleet]. 2015, Iss. 1(41), Pp. 44–45. (In Russian)

Received: March 23, 2025

Accepted: April 12, 2025

Author's information:

Vladimir A. CHERNOV — Associate Professor, Department of Wagons and Wagon Industries; chernov-nt@mail.ru

Lyudmila V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Wagons and Wagon Industries; tcyganskaya@gmail.com

Dmitry G. BEIN — PhD in Engineering, Deputy Chief Designer; dgbain@mail.ru

УДК 621.3.051.024

Инженерная методика определения ЭДС холостого хода тяговых подстанций постоянного тока

В. В. Варичева, Т. З. Сиукаев, Б. А. Дудин

Российский университет транспорта, Российская Федерация, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ГСП-4

Для цитирования: Варичева В. В., Сиукаев Т. З., Дудин Б. А. Инженерная методика определения ЭДС холостого хода тяговых подстанций постоянного тока // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 69–76. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-69-76

Аннотация

Цель: Предложение методики выбора регулируемых значений ЭДС холостого хода тяговых подстанций по заданной мощности и обоснование применения данного алгоритма на железных дорогах, электрифицированных постоянным током 3,0 кВ. **Методы:** Использовался графический метод для определения значений тока через напряжение, позволяющий вычислить соответствующие значения ЭДС холостого хода подстанций. С помощью расчетно-аналитического метода были установлены значения токов ЭПС, позволяющие вычислить мощности тяговых подстанций. **Результаты:** Расчет, проводимый графическим методом, демонстрирует зависимость напряжения на токоприемнике от тока ЭПС при условии постоянства мощности. Результаты расчетов, выполненных с помощью системы MathCAD, позволяют установить характер зависимости токов и мощностей тяговых подстанций от расстояний от ЭПС до подстанций. **Практическая значимость:** Результаты работы показывают, что выбор оптимальных значений ЭДС холостого хода тяговых подстанций позволяет уменьшить потери электроэнергии в тяговой сети, что особенно важно в условиях пропуска тяжеловесных и скоростных поездов.

Ключевые слова: Тяговые подстанции, система постоянного тока, тяжеловесное грузовое движение, ЭДС холостого хода, потери электрической энергии.

Одними из важнейших устройств системы тягового электроснабжения являются тяговые подстанции, получающие электрическую энергию от системы внешнего электроснабжения и преобразующие ее в конкретный род тока и уровень напряжения, необходимые для питания электроподвижного состава. Помимо электроподвижного состава, питание от тяговых подстанций получают городской электрический транспорт, электропоезда метрополитена, нетяговые потребители железнодорожного транспорта, районные и сельскохозяйственные потребители электроэнергии [1].

Тяговые подстанции классифицируются по ряду признаков:

по схеме присоединения к системе внешнего электроснабжения:

- опорные;
- промежуточные (транзитные и отпаечные);
- тупиковые;

по системе электрической тяги:

постоянного тока 3,3 кВ: подразделяются, в свою очередь, по типу преобразователей (выпрямительные и выпрямительно-инверторные) и по способу трансформации (одно- и двухступенчатые, классифицируемые по величине первичного напряжения);

переменного тока 25 кВ;

переменного тока 2×25 кВ;

стыковые (переменно-постоянного тока);

по способу управления:

– телеуправляемые;

– нетелеуправляемые;

по способу обслуживания:

– с постоянным дежурным персоналом;

– с дежурством на дому;

– без дежурного персонала;

по возможности перемещения:

– стационарные;

– подвижные [2].

Система постоянного тока положила начало электрификации российских железных дорог и впоследствии получила широкое применение в городском и промышленном электротранспорте благодаря хорошим тяговым и скоростным характеристикам, присущим двигателям постоянного тока с последовательным возбуждением [3].

Участки, электрифицированные на постоянном токе 3,0 кВ, имеют определенные ограничения пропускной способности при вождении скоростных и тяжеловесных поездов: при нагреве проводов контактной сети снижается их механическая прочность, а в случае понижения напряжения на токоприемнике электровоза ниже эксплуатируемого значения 2700 В происходит снижение скорости движения поездов, но если потребляемая мощность сохраняется — возрастает ток, потребляемый электровозом, равно как и увеличиваются потери электрической энергии в тяговой сети [4].

Согласно [5], тяжеловесное грузовое движение заключается в пропуске грузовых поездов с массой состава не менее 6300 т и вагонами с осевыми нагрузками не менее 25 тс. Отмечено, что повышение среднего веса поезда является важнейшим показателем эксплуатационной работы железнодорожного транспорта и определяет уровень эффективности перевозочного процесса [6].

Таким образом, при росте объема перевозок задача повышения пропускной способности железных дорог, электрифицированных постоянным током 3,0 кВ, является особенно актуальной, поскольку увеличение количества тяжеловесных поездов на таких участках неизменно сопряжено с возрастанием токовой нагрузки

в системе, снижением уровня напряжения в контактной сети, увеличением потерь электроэнергии и сокращением ресурса тяговой подстанции. Кроме того, из-за разности выходных напряжений тяговых подстанций, обусловленной различными значениями их внутреннего сопротивления и отклонениями напряжения питающей сети, при наличии тяговой нагрузки на фидерной зоне происходит появление «уравнительных токов» между подстанциями, приводящее к дополнительным потерям электрической энергии. К примеру, разница мгновенных значений выпрямленного напряжения смежных тяговых подстанций величиной 300–500 В обуславливает возникновение «уравнительных токов», достигающих 20–40 % тяговой нагрузки [7, 8].

Выбор оптимальных значений ЭДС холостого хода тяговых подстанций (ТП) постоянного тока является задачей технико-экономической, так как неправильный выбор этих значений приводит к удлинению плеч питания подстанций с большим E_{xx} и, как следствие, к увеличению потерь электроэнергии в тяговой сети. Особенно это проявляется на межподстанционных зонах, питаемых подстанциями, у которых внутренние сопротивления различаются в 2 и более раз [9].

Известно, что потери в тяговой сети будут минимальны, если токи между ТП распределяются обратно пропорционально расстояниям от электроподвижного состава (ЭПС) до подстанции [10].

Авторами предлагается инженерная методика определения E_{xx} подстанций, при которых нагрузка ТП будет оптимальной. Это особенно важно в современных условиях при пропуске тяжеловесных и высокоскоростных поездов.

Методика основана на том, что схема замещения источников питания для ЭПС представляет собой последовательное соединение E_{xx} ТП и внутреннего сопротивления, включающего в себя внутреннее сопротивление ТП r_0 и сопротивление участка тяговой сети r_i до ЭПС.

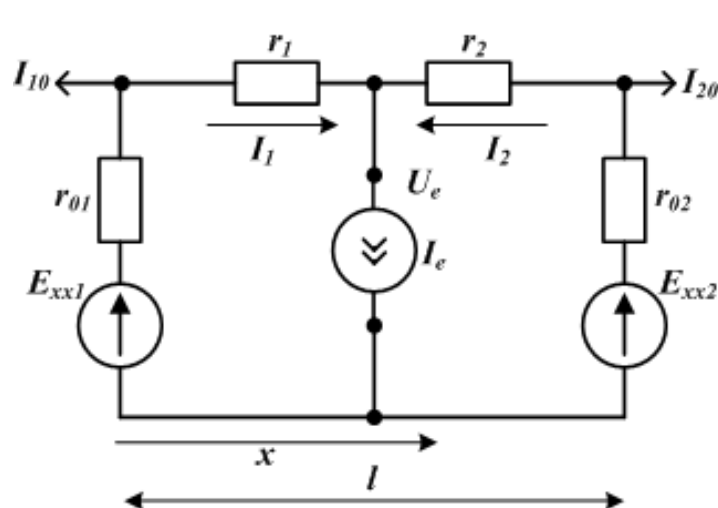


Рис. 1. Схема замещения источников питания для ЭПС

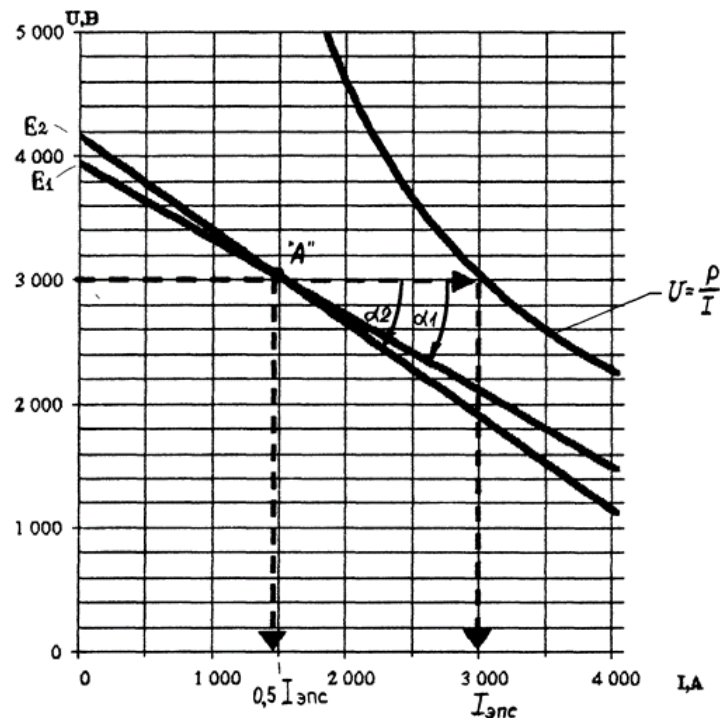


Рис. 2. Результаты расчета, проводимого графическим методом

Рассмотрим конкретный пример (рис. 1): тяговые подстанции $ТП_1$ и $ТП_2$ имеют внутренние сопротивления $r_{01} = 0,11$ [Ом] и $r_{02} = 0,25$ [Ом] соответственно. Сопротивление тяговой сети между $ТП_1$ и $ТП_2$ длиной l равно $R_{TC} = r_1 + r_2 = 1$ [Ом]. Мощность нагрузки постоянна и равна $P_e = 9$ МВт (два двухсекционных ВЛ-11, при силе тяги 583,2 кН, скорости 50 км/ч и КПД 0,9). В середине зоны внутренние сопротивления эквивалентных источников составят $r_{1(0,5)} = r_{01} + 0,5R_{TC} = 0,11 + 0,5 = 0,61$ [Ом], $r_{2(0,5)} = r_{02} + 0,5R_{TC} = 0,25 + 0,5 = 0,75$ [Ом]. Углы наклона внешних характеристик соответственно равны $\alpha_1 = \arctg 0,61 = 31,4^\circ$ и $\alpha_2 = \arctg 0,75 = 36,9^\circ$. Расчет можно произвести графическим методом.

На рис. 2. показана зависимость напряжения на токоприемнике от тока ЭПС при условии постоянства мощности (кривая $U = P/I$). Задаемся необходимым напряжением в середине зоны ($U_{\text{ЭПС}} = U_e = 3000$ В) и по кривой находим ток ($I_{\text{ЭПС}} = I_e = 3000$ А). На плоскости фиксируем рабочую точку «А» с координатами $U_A = 3000$ В, $I_A = 0,5 I_{\text{ЭПС}} = 1500$ А и проводим через нее прямые под углами α_1 и α_2 к оси абсцисс (как показано на рис. 2) до пересечения с осью ординат и находим значения соответствующих E_{xx} $ТП_1$ и $ТП_2$ ($E_{xx1} = 3915$ В, $E_{xx2} = 4125$ В).

Если $ТП_1$ и $ТП_2$ имеют нагрузки на смежных зонах I_{10} , I_{20} , то E_{xx} необходимо увеличить на величину произведения тока этой нагрузки на внутреннее сопротивление подстанции.

Также расчет можно произвести аналитически с помощью, например, системы компьютерной математики MathCAD. Так, ЭДС холостого хода для $ТП_1$ определится по формуле:

$$E_{xx1} = U_e + 0,5 I_e (r_1 + r_{01}) + I_{10} r_{01}, \quad (1)$$

а для ТП₂ — по формуле:

$$E_{xx2} = U_e + 0,5 I_e (r_2 + r_{02}) + I_{20} r_{02}. \quad (2)$$

Для определения токов подстанций, тока ЭПС, а также мощностей подстанций и ЭПС при нахождении его в других точках межподстанционной зоны в зависимости от координаты ЭПС x_e необходимо:

– выразить сопротивления участков тяговой сети $r_1(x)$ и $r_2(x)$:

$$r_1(x) = x R_{TC1km},$$

$$r_2(x) = (l - x) R_{TC1km},$$

где R_{TC1km} — активное сопротивление 1-го км тяговой сети;

– выразить токи плеч тяговой сети между подстанциями и ЭПС:

$$I_1(x) = \frac{I_e [r_2(x) + r_{02}] + E_{xx1} - E_{xx2}}{r_1(x) + r_{01} + r_2(x) + r_{02}}, \quad (3)$$

$$I_2(x) = \frac{I_e [r_1(x) + r_{01}] + E_{xx2} - E_{xx1}}{r_1(x) + r_{01} + r_2(x) + r_{02}}. \quad (4)$$

При этом ток ЭПС равен:

$$I_e(x) = I_1(x) + I_2(x). \quad (5)$$

– выразить мощности тяговых подстанций ТП₁ и ТП₂:

$$P_{1S}(x) = U_e I_1(x). \quad (6)$$

$$P_{2S}(x) = U_e I_2(x). \quad (7)$$

При этом мощность ЭПС равна:

$$P_e(x) = P_{1S}(x) + P_{2S}(x). \quad (8)$$

На рис. 3. приведены результаты расчетов по формулам (3)–(8), выполненные с помощью системы компьютерной математики MathCAD.

Из рис. 3. видно, что при выбранных ЭДС холостого хода токи и мощности ТП₁ и ТП₂ распределяются обратно пропорционально расстояниям от ЭПС до подстанций, а также соблюдается постоянство тока и потребляемой мощности ЭПС.

Такая упрощенная методика позволяет по заданной мощности нагрузки выбрать регулируемые значения E_{xx} смежных ТП, при которых потери электроэнергии в тяговой сети будут минимальными.

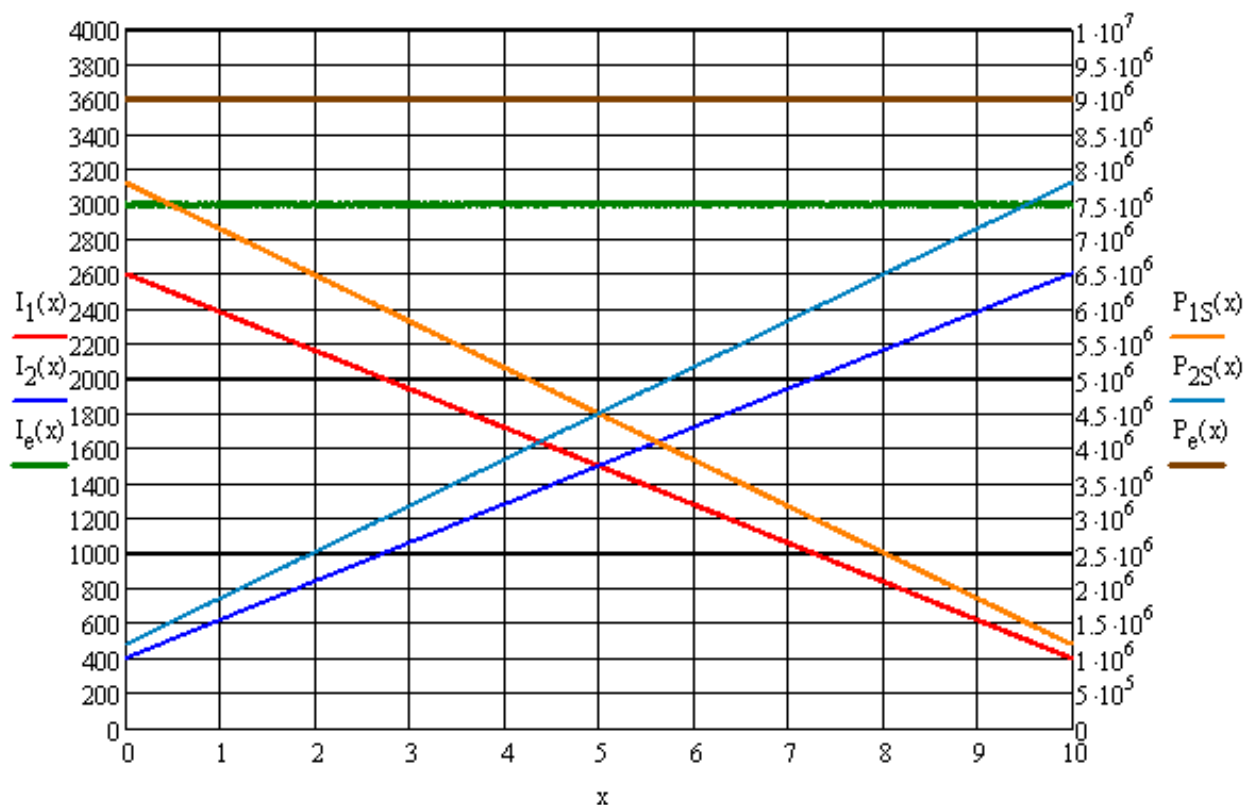


Рис. 3. Результаты расчетно-аналитического метода, выполненного в MathCAD

Список источников

1. Бей Ю. М. Тяговые подстанции: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Ю. М. Бей, Р. Р. Мамошин, В. Н. Пупынин, М. Г. Шалимов. — М.: Транспорт, 1983. — 319 с.
2. Почаевец В. С. Электрические подстанции: учебник / В. С. Почаевец. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. — 491 с.
3. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. — М.: Транспорт, 1982. — 207 с.
4. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока / Б. А. Аржанников. — 2005. — 176 с.
5. Бондаренко О. А. Вопросы развития тяжеловесного движения грузовых поездов / О. А. Бондаренко // Наука и образование транспорту. — 2016. — № 1. — С. 91–93.
6. Широкова В. В. Исследование влияния пропуска тяжеловесных поездов на пропускную и провозную способности железнодорожных участков / В. В. Широкова, Н. А. Кузьмина, Г. В. Санькова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — № 4.
7. Ковалев А. А. Анализ показателей качества электроэнергии в сетях нетяговых потребителей железнодорожного транспорта / А. А. Ковалев, Т. Т. Шаюхов, С. А. Чебаков, Т. Т. Шарапов // Транспорт Урала. — 2020. — № 4(67). — С. 86–90.

8. Климова Е. В. Исследование сфер эффективности применения технологии пропуска соединенных и тяжеловесных поездов / Е. В. Климова // Вестник Сиб. гос. ун-та путей сообщения. — 2017. — № 4(43). — С. 66–73.

9. Проектирование систем энергоснабжения электрических железных дорог: учебное пособие для высших учебных заведений ж.-д. транспорта / Под общей ред. Л. М. Перцовского. — М.: Трансжелдориздат, 1963. — 471 с.

10. Караев Р. И. Электрические сети и энергосистемы: учебник для вузов / Р. И. Караев, С. Д. Волобровский. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1978. — 312 с.

Дата поступления: 04.04.2025

Решение о публикации: 15.05.2025

Контактная информация:

ВАРИЧЕВА Вероника Владимировна — аспирант; veronicka.varicheva@yandex.com

СИУКАЕВ Тамерлан Заурович — аспирант; stz777@mail.ru

ДУДИН Борис Алексеевич — канд. техн. наук, доц.; dubodin@mail.ru

Engineering Methodology for Determining EMF in Idling DC Traction Substations

V. V. Varicheva, T. Z. Siukaev, B. A. Dudin

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., OCP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Varicheva V. V., Siukaev T. Z., Dudin B. A. Engineering Methodology for Determining EMF of Idling at DC Traction Substations. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 69–76. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-69-76

Summary

Purpose: To propose a method for selecting adjustable EMF values in idling traction substations for a given power, and the justification of this algorithm application on railways electrified with 3.0 kV direct current. **Methods:** The graphical method was used to ascertain the values of current through voltage, thereby facilitating the calculation of the corresponding EMF values in idling substations. Utilising the calculation and analytical method, the electric current values at the traction substations were established, thus enabling the calculation of the traction substation power. **Results:** The calculation conducted utilising the graphical method, has elucidated the dependence of the current collector voltage on the electric rolling stock current in the case of constant power. The calculation performed in the MathCAD system facilitates the determination of the nature of the dependence of the traction substation current and power on the distance between the electric train and the substations. **Practical significance:** The findings of the research demonstrate that the selection of optimal EMF values in idling traction substations enables the reduction of losses of electric power in the traction network. This is of particular significance in the context of heavy and high-speed trains.

Keywords: Traction substations, direct current system, heavy-duty freight traffic, EMF in idling, electric energy losses.

References

1. Bey Yu. M., Mamoshin R. R., Pupynin V. N., Shalimov M. G. *Tyagovye podstantsii: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta* [Traction substations: a textbook for higher education institutions of railway transport]. Moscow: Transport Publ., 1983, 319 p. (In Russian)
2. Pochaevets V. S. *Elektricheskie podstantsii: uchebnik* [Electrical substations: a textbook]. Moscow: FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zhelezнодорожном транспорте" Publ., 2012, 491 p. (In Russian)
3. Miroshnichenko R. I. *Rezhimy raboty elektrifitsirovannykh uchastkov* [Operating modes of electrified sections]. Moscow: Transport Publ., 1982, 207 p. (In Russian)
4. Arzhannikov B. A. *Sistema upravlyaemogo elektroobrazovaniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postoyannogo toka* [Controlled power supply system of electrified DC railways]. 2005, 176 p. (In Russian)
5. Bondarenko O. A. Voprosy razvitiya tyazhelovesnogo dvizheniya gruzovykh poezdov [Issues of development of heavy-haul traffic of freight trains]. *Nauka i obrazovanie transport* [Science and education in transport]. 2016, Iss. 1, pp. 91–93. (In Russian)
6. Shirokova V. V., Kuz'mina N. A., San'kova G. V. Issledovanie vliyaniya propuska tyazhelovesnykh poezdov na propusknyuyu i provoznyuyu sposobnosti zhelezнодорожных uchastkov [Study of the influence of heavy-haul trains on the throughput and carrying capacity of railway sections]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2021, Iss. 4. (In Russian)
7. Kovalev A. A., Shayukhov T. T., Chebakov S. A., Sharapov T. T. Analiz pokazateley kachestva elektroenergii v setyakh netyagovykh potrebiteley zhelezнодорожного transporta [Analysis of power quality indicators in the networks of non-traction consumers of railway transport]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2020, Iss. 4(67), pp. 86–90. (In Russian)
8. Klimova E. V. Issledovanie sfer effektivnosti primeneniya tekhnologii propuska soedinennykh i tyazhelovesnykh poezdov [Study of the spheres of efficiency of application of the technology of passing connected and heavy trains]. *Vestnik Sib. gos. un-ta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Railway Engineering]. 2017, Iss. 4(43), pp. 66–73. (In Russian)
9. *Proektirovanie sistem energosnabzheniya elektricheskikh zheleznykh dorog: uchebnoe posobie dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy zh.-d. transporta. Pod obshchey red. L. M. Pertsovskogo* [Design of power supply systems of electric railways: a textbook for higher educational institutions of railway transport. Under the general editorship of L. M. Pertsovsky]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1963, 471 p. (In Russian)
10. Karaev R. I., Volobriniski S. D. *Elektricheskie seti i energosistemy: uchebnik dlya vuzov. Izd. 2-e, pererab. i dop.* [Electrical networks and power systems: a textbook for universities]. Moscow: Transport Publ., 1978, 312 p. (In Russian)

Received: April 04, 2025

Accepted: May 15, 2025

Author's information:

Veronika V. VARICHEVA — Postgraduate Student; veronicka.varicheva@yandex.com

Tamerlan Z. SIUKAEV — Postgraduate Student; stz777@mail.ru

Boris A. DUDIN — PhD in Engineering, Associate Professor; dubodin@mail.ru

УДК 629.4.027.4:539.431

Оценка ресурса несущей конструкции маневрового локомотива ТЭМ2 железных дорог Республики Узбекистан

П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров

Российский университет транспорта, Российская Федерация, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ГСП-4

Для цитирования: Григорьев П. С., Кодиров Н. С. Оценка ресурса несущей конструкции маневрового локомотива ТЭМ2 железных дорог Республики Узбекистан // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 77–92. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-77-92

Аннотация

Цель: Оценка остаточного ресурса несущей конструкции маневрового локомотива ТЭМ2 на примере рамы тележки с учетом действующих эксплуатационных нагрузок и деградации материала конструкции. **Методы:** В статье рассмотрена оценка остаточного ресурса несущей конструкции маневрового локомотива на примере его рамы тележки с позиций усталостной прочности. Определено напряженно-деформированное состояние конструкции при сочетании статических и динамических нагрузок на основе динамических воздействий от неровностей пути. Построена скорректированная кривая усталости материала с учетом деградации его свойств в результате 40–45-летней эксплуатации. Проведен расчет коэффициента запаса сопротивления усталости. **Результаты:** Показано, что учет переменных нагрузок, пробега и технического состояния пути критически важен для точного прогноза долговечности базовых частей локомотива. Результаты могут быть применены при продлении срока службы подвижного состава, а также при разработке нормативных требований к его прочности. **Практическая значимость:** Предложенный подход способствует совершенствованию методов определения срока службы несущих конструкций. Показана необходимость применения конечно-элементного анализа при оценке технического состояния конструкций. Их использование позволит на ранней стадии выявлять усталостные повреждения, что значительно повысит долговечность рамных конструкций. Предложенный подход оценки ресурса несущей конструкции может быть рекомендован к практическому использованию. Подход позволяет повысить безопасность эксплуатации подвижного состава, снизить затраты на ремонт и модернизацию.

Ключевые слова: Маневровый локомотив, тележка, динамическая нагруженность, кривая усталости, напряженно-деформированное состояние, многоцикловая усталость, коэффициент запаса прочности, усталостная долговечность, остаточный ресурс, неровности пути.

Введение

Старение парка маневровых локомотивов, эксплуатируемых на железных дорогах Республики Узбекистан, обостряет проблему надежности их несущих конструкций. Ключевым объектом технического риска становятся несущие конструкции, подвергаемые многолетнему воздействию переменных нагрузок. Эти

нагрузки, в условиях превышения нормативных сроков службы, приводят к усталостным разрушениям и потере прочностных характеристик. При этом высокая стоимость нового тягового подвижного состава усиливает актуальность задач, связанных с обоснованием его дальнейшей безопасной эксплуатации [1].

На основании нормативных документов [2, 3] ресурс несущих элементов локомотивов определяется через прочностные критерии, включая сопротивление усталости. Однако в существующих подходах расчет запаса прочности не учитывает в полном объеме переменный характер эксплуатационных воздействий. Интересно, что даже при наличии достаточного коэффициента запаса (n) конструкции могут быть подвержены разрушению из-за накопления усталостных повреждений, особенно в сварных соединениях и других зонах концентрации напряжений.

Анализ состояния несущих конструкций должен опираться не только на расчет НДС, но и на полную оценку их несущей способности по сопротивлению усталости [4]. В последние годы для решения этой задачи находят широкое применение конечно-элементные пакеты — такие как Ansys, NASTRAN и т. д., позволяющие моделировать поведение конструкций при многовариантных сценариях нагружения [5].

В отличие от упрощенных моделей усталостной прочности, рассматриваемых в работах [6, 7], в настоящем исследовании предлагается подход, основанный на учете реальных эксплуатационных характеристик: геометрии и материала конструкции, ежегодного пробега, а также динамических нагрузок, обусловленных неровностями пути. Использование уточненных данных о механических свойствах позволяет построить скорректированную кривую усталости и выявить наиболее уязвимые зоны конструкции. Применение такой методологии дает возможность количественно оценить остаточный ресурс и спрогнозировать сроки безопасной эксплуатации [8].

Целью настоящего исследования является количественная оценка остаточного ресурса несущей конструкции маневрового локомотива ТЭМ2 на примере рамы тележки с учетом действующих эксплуатационных нагрузок и деградации материала конструкции.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- произведен анализ существующих подходов к расчету усталостной прочности конструкций;
- определено напряженно-деформированное состояние рамы тележки в условиях статических и динамических нагрузок;
- построена кривая усталости на основе механических характеристик металла, взятого из зоны максимальных нагрузок после длительной эксплуатации;
- выполнено численное моделирование переменных нагрузок, возникающих при проезде тележки по расчетным профилям неровностей пути;

– рассчитан коэффициент запаса прочности и предельный пробег до появления усталостных повреждений с прогнозом остаточного срока безопасной эксплуатации.

Материалы и методы

Объектом исследования является несущая конструкция маневрового локомотива, представляющая собой раму тележки тепловоза ТЭМ2, выполненной из стали марки Ст3 и эксплуатировавшейся на железных дорогах Республики Узбекистан более 40 лет. Конструкция рамы представляет собой сварной силовой элемент, включающий боковины, поперечные коробчатые связи, концевые балки и литую шкворневую часть. В условиях многолетней эксплуатации данная конструкция подвергается переменным нагрузкам, возникающим при взаимодействии с верхним строением пути, что в совокупности с деградацией металла приводит к снижению ее сопротивления усталости.

Современные методы анализа долговечности опираются на линейную гипотезу накопления повреждений Майнера [9], в которой основным инструментом прогноза выступает кривая усталости ($S—N$ кривая). При этом более полный анализ ресурса требует учета не только предела выносливости, но и характеристик нагружения в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации.

В настоящее время по требованиям [2, 3] коэффициенты запаса сопротивления усталости (n) для рамы тележки маневрового локомотива следует определять по формулам:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma d} \sigma_a + \psi_{\sigma} \frac{\sigma_T}{\alpha_{\sigma}}} \geq [n] \quad \text{или} \quad n = \frac{\sigma_{-1p}}{K_{\sigma d} \sigma_a + \psi_{\sigma} \frac{\sigma_T}{\alpha_{\sigma}}} \geq [n]. \quad (1)$$

В данной работе основной акцент ставится на применении метода конечно-элементного анализа с использованием современных программных комплексов. Геометрическая модель рамы тележки построена по данным технической документации с учетом реального коррозионного износа, а расчетная сетка включает более 280 000 тетраэдрических элементов со средним размером 20 мм (рис. 1). Расчеты выполнялись в двух режимах: статическая нагрузка и комбинированное нагружение, учитывающее нагружение от прохождения по профилям неровностей рельсов, заданных по нормативам ПНСТ 511—2020 и РД 32.68—96.

Чтобы учесть рессорное подвешивание, в модель были введены 12 упругих элементов, имитирующих характеристики пружин с заданной жесткостью и геометрией. Это позволило воспроизвести реалистичное распределение реакций на опоры тележки (точки A, E, F, G) и адекватно смоделировать реакцию конструкции на вертикальные воздействия, возникающие при проезде по стыкам (рис. 2).

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные для оценки сопротивления усталости рам тележек ТЭМ2 согласно нормативными требованиям [10, 11]

Обозначение	Параметр	Значение параметра
σ_{-1}	предел выносливости стандартного образца при изгибе с симметричным циклом нагружения	для Ст3 $\sigma_{-1} = 180^\circ \text{МПа}$
σ_{-1p}	предел выносливости стандартного образца при растяжении-сжатии с симметричным циклом нагружения	для Ст3 $\sigma_{-1p} = 140^\circ \text{МПа}$
k_σ	коэффициент, характеризующий понижение предела выносливости конструкции по отношению к пределу выносливости стандартного образца (коэффициент концентрации)	$k_\sigma = \frac{k_1 k_2}{\gamma k_m} k_3$ По принятым значениям коэффициентов k_σ
k_1	коэффициент, учитывающий влияние неоднородности материала детали; проката, поковки и штамповки	принимаем 1,1
k_2	коэффициент, учитывающий влияние внутренних напряжений в детали, принимаем в зависимости от ее наибольшего поперечного размера	принимаем: 1,0 — при размере до 250 мм
k_m	коэффициент, учитывающий состояние поверхности детали, для поверхностей после черновой станочной обработки, поверхностей с окалиной и поверхностей стальных литых деталей после пескоструйной обработки	принимаем 0,8
γ	коэффициент, учитывающий масштабный фактор и выбираемый в зависимости от наибольшего поперечного размера сечения детали h	при высоте сечения до 100 мм включительно принимаем — 0,8
k_3	корректировочный коэффициент. для углеродистых прокатных сталей марок Ст3	принимаем — 1,0
K_σ	обобщающий коэффициент, учитывающий влияние неоднородности материала, размерного фактора, состояния поверхности	$K_{сд} = K_\sigma \beta_k$ По принятым значениям коэффициентов K_σ
β_k	эффективный коэффициент концентрации напряжений, учитывающий форму детали	принимаем 2,1 от связи $\beta_k = 1 + q(\alpha_\sigma - 1)$
q	коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений	Для сталей Ст3 $q = 0,7$
α	теоретический коэффициент концентрации напряжений	2,57
σ	амплитуда переменных напряжений (максимальных в зоне концентрации) цикла	25 МПа
ψ_σ	коэффициент, характеризующий влияние асимметрии цикла	$\psi_\sigma = 0,3$ для $\sigma_m > 0$

Граничные условия моделирования заданы следующим образом:

- точка *B*: зафиксированы перемещения по осям x и z (ось y свободна);
- точка *C*: перемещения по осям y и z свободны (перемещения по оси x зафиксированы);
- точка *D*: перемещения по осям y и z свободны (перемещения по оси x зафиксированы).

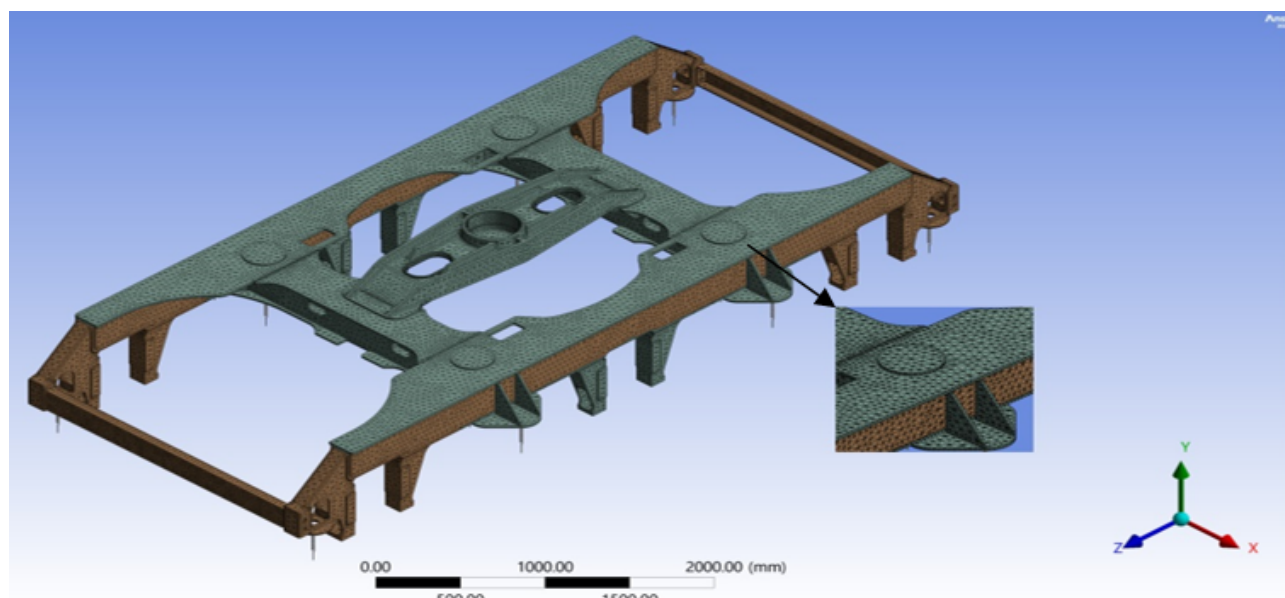


Рис. 1. Конечно-элементная сетка рамы тележки

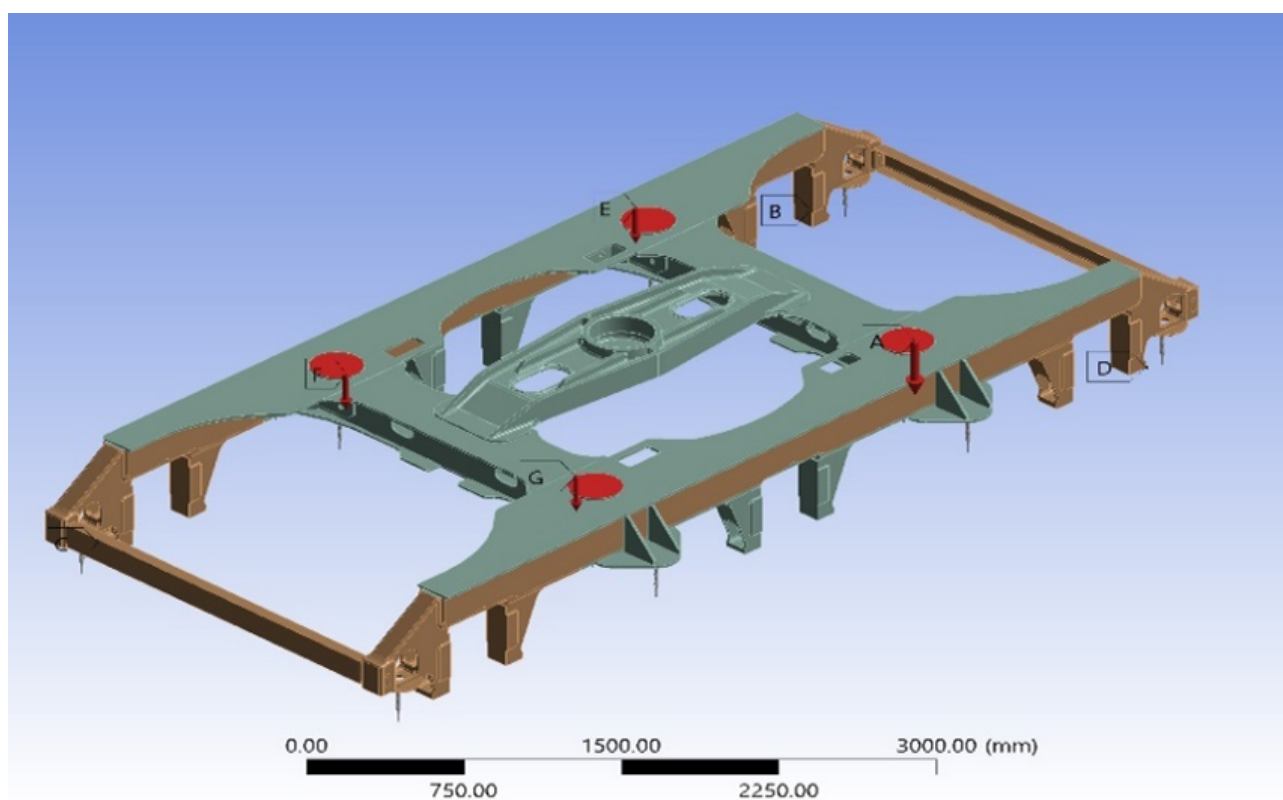


Рис. 2. Закрепление рамы тележки и прикладываемые силы

Нагрузки рассчитывались на основе массы тепловоза ТЭМ2 (120 т) и массы одной тележки (23,6 т). Вертикальная нагрузка от кузова, приходящаяся на одну тележку, составляла 36,4 кН. Данная нагрузка распределена между опорами с учетом конструктивной схемы.

ТАБЛИЦА 2. Механические свойства образца стали от рамы тележки ТЭМ2

Параметр	Значение	Размерность
Предел текучести, σ_t	235	МПа
Временное сопротивление, σ_b	395	МПа
Модуль упругости, E	213	ГПа
Коэффициент Пуассона, μ	0,286	—
Модуль сдвига, G	82,8	ГПа
Твердость по Бринеллю, НВ	111	МПа
Ударная вязкость КСЧ	145,3	Дж/см ²
Относительное удлинение, δ	40,7	%

Механические свойства стали Ст3, использованные в расчетах, получены на основе лабораторных испытаний образцов, вырезанных из наиболее нагруженных зон рамы тепловоза [12]. Особое внимание уделялось деградированным участкам, подверженным длительному действию эксплуатационных напряжений. Полученные значения приведены в табл. 2.

На следующем этапе была построена кривая усталости Веллера по уравнению Басквина (2), учитывающему два наклонных участка, соответствующих разным режимам усталостного разрушения. Для описания поведения материала в многоцикловом режиме (при напряжениях, не превышающих предел текучести) на основании работы [6] был использован наклон $m = 5$ на первом участке и показатель степени $m = 9$ на втором участке.

$$N_3 = \left(\frac{\sigma_{-1д}}{\sigma_{a3}} \right)^m N_0 = n_\sigma^m N_0, \quad (2)$$

где m — показатель степени уравнения наклона второй ветви кривой усталости.

В отличие от общепринятых значений предела выносливости, в работе применен скорректированный уровень $\sigma_{-1} = 35$ МПа (для изгиба при симметричном цикле), что соответствует данным, полученным при испытаниях деградированного материала [6]. Значение учитывает масштабный и поверхностный факторы, коэффициенты концентрации напряжений, а также особенности сварных соединений конструкции.

Для расчета амплитудных напряжений использовалась методология «дождевого потока» [13] и коррекция среднего напряжения по критерию Гудмана (3). Такая связка методик позволяет выявить зоны вероятного зарождения трещин и установить максимально опасные участки на основе накопления усталостных повреждений [14–17].

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{fat}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}} = 1, \quad (3)$$

где σ_m — амплитуда напряжения;
 σ_{fat} — предел усталости при симметричном цикле;
 σ_a — среднее напряжение;
 σ_{uts} — предел прочности материала при растяжении.

Результаты

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) рамы тележки маневрового тепловоза ТЭМ2 был проведен в два этапа [15], каждый из которых имитирует определенные условия эксплуатации. Первый этап — статическое нагружение — позволяет определить равновесное распределение напряжений без учета временных изменений. Второй — многоцикловое нагружение, учитывающее динамическую составляющую, обусловленную воздействием неровностей пути при движении локомотива.

В рамках первого этапа нагрузка от массы кузова тепловоза (72,8 т), проходящая на тележку, распределялась между четырьмя опорными точками конструкции. Учет рессорного подвешивания позволил отразить реалистичную кинематику конструкции и зафиксировать характер деформаций при вертикальном давлении. Конечно-элементная модель имела достаточную для данного расчета детализацию: 280 376 элементов, тетраэдрическая сетка с шагом 20 мм. На рис. 3 представлены результаты моделирования НДС и локализация критических зон.

Наибольшие напряжения были определены в сварных соединениях поперечной балки с боковыми элементами рамы, а также в области сопряжения коробчатых челюстей с нижним поясом. В этих участках наблюдаются максимальные значения эквивалентных напряжений до 47,7 МПа. Эти зоны, по сути, представляют собой «концентраторы усталости», формирующие потенциальные очаги разрушения при циклических воздействиях.

Интересно, что расчет коэффициентов запаса сопротивления усталости (n) по методике [2, 3] показывает снижение прочностного запаса даже при классическом подходе:

при изгибе: $n = 1,70$,

при растяжении: $n = 1,32$.

Такие значения считаются низкими, особенно для конструкций, отработавших более четырех десятилетий. Снижение сопротивления усталости напрямую связано с деградацией свойств материала: накопленные дефекты микроструктуры, остаточные напряжения и усталостные повреждения на сварных швах приводят к резкому падению долговечности конструкции.

Второй этап анализа учитывает воздействия на тележки от движения по пути с характерными неровностями, заданными в соответствии с нормативами РД 32.68—96 и ПНСТ 511—2020. Для каждого варианта принята история нагружения,

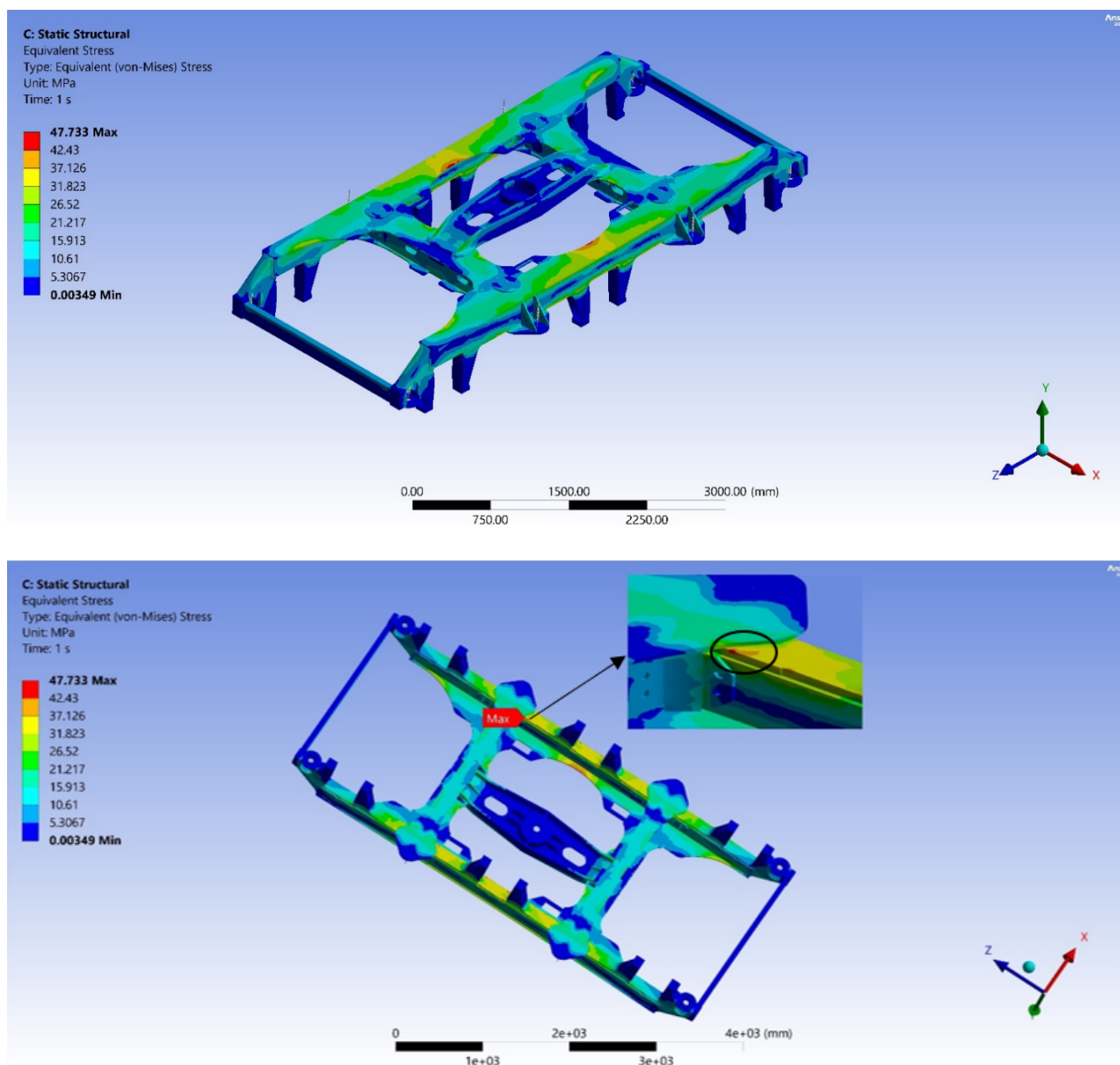


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние рамы тележки (верхний рисунок) и критическая точка в статическом состоянии (нижний рисунок)

полученная на основе математической модели, созданной в программном комплексе «Универсальный механизм». Такой подход позволил построить гистограммы нагружений, полученных с использованием метода «дождевого потока», и реализована коррекция средних напряжений по критерию Гудмана. Эти методы, в совокупности с конечно-элементным анализом, позволили получить пространственно-временное распределение усталостной прочности конструкции.

На рис. 4 представлены реалистичные временные диаграммы нагружения при прохождении тележкой 1 км пути, полученные на основе математической модели по двум вариантам неровностей. Эти данные легли в основу оценки остаточного ресурса.

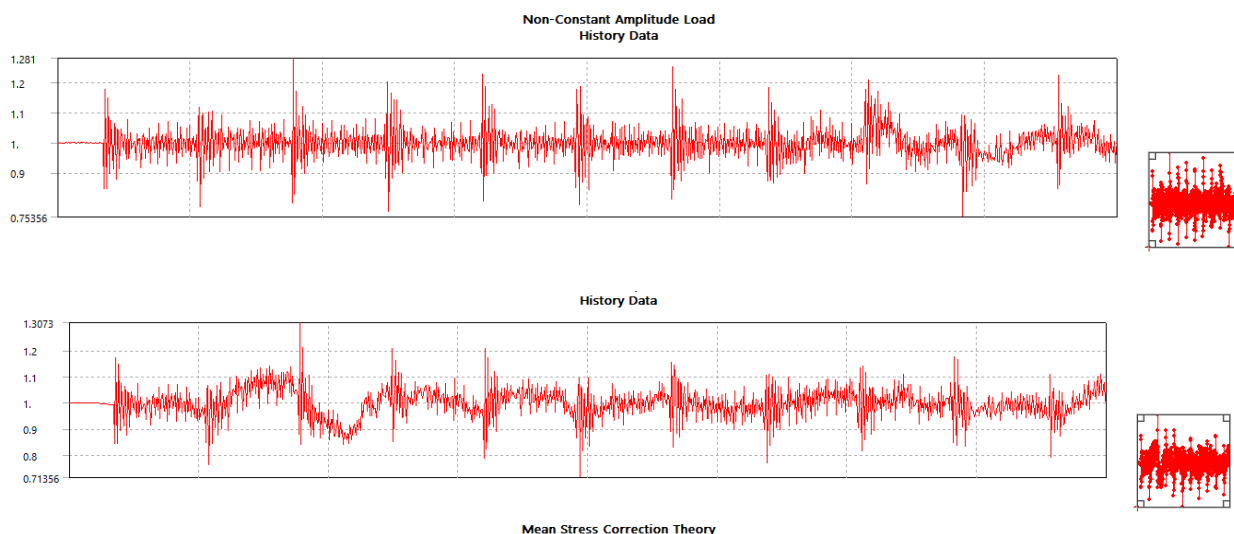


Рис. 4. Гистограммы нагружения при проезде сгенерированных расчетных неровностей на 1 км железнодорожного пути по РД 32.68—96 (верхний рисунок) и ПНСТ 511—2020 (нижний рисунок)

Построенная кривая усталости Веллера (рис. 5) для материала, отобранного из тележки, эксплуатировавшейся более 40 лет, показала резкое снижение выносливости — предельное значение σ_{-1} , как было сказано ранее, составило всего 35 МПа при базе 10^7 циклов. Это значение легло в основу дальнейших расчетов остаточного ресурса.

Приведем результаты расчета на усталость рамы тележки локомотива ТЭМ2 (рис. 6).

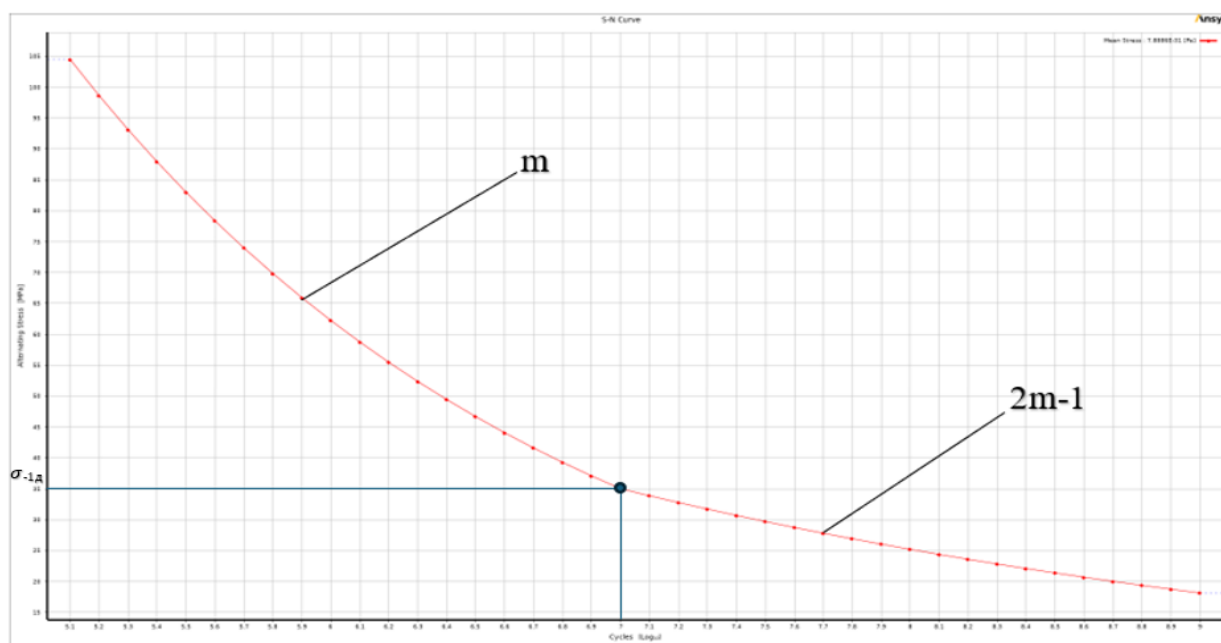


Рис. 5. Кривая усталости Веллера, применяемая в расчетах

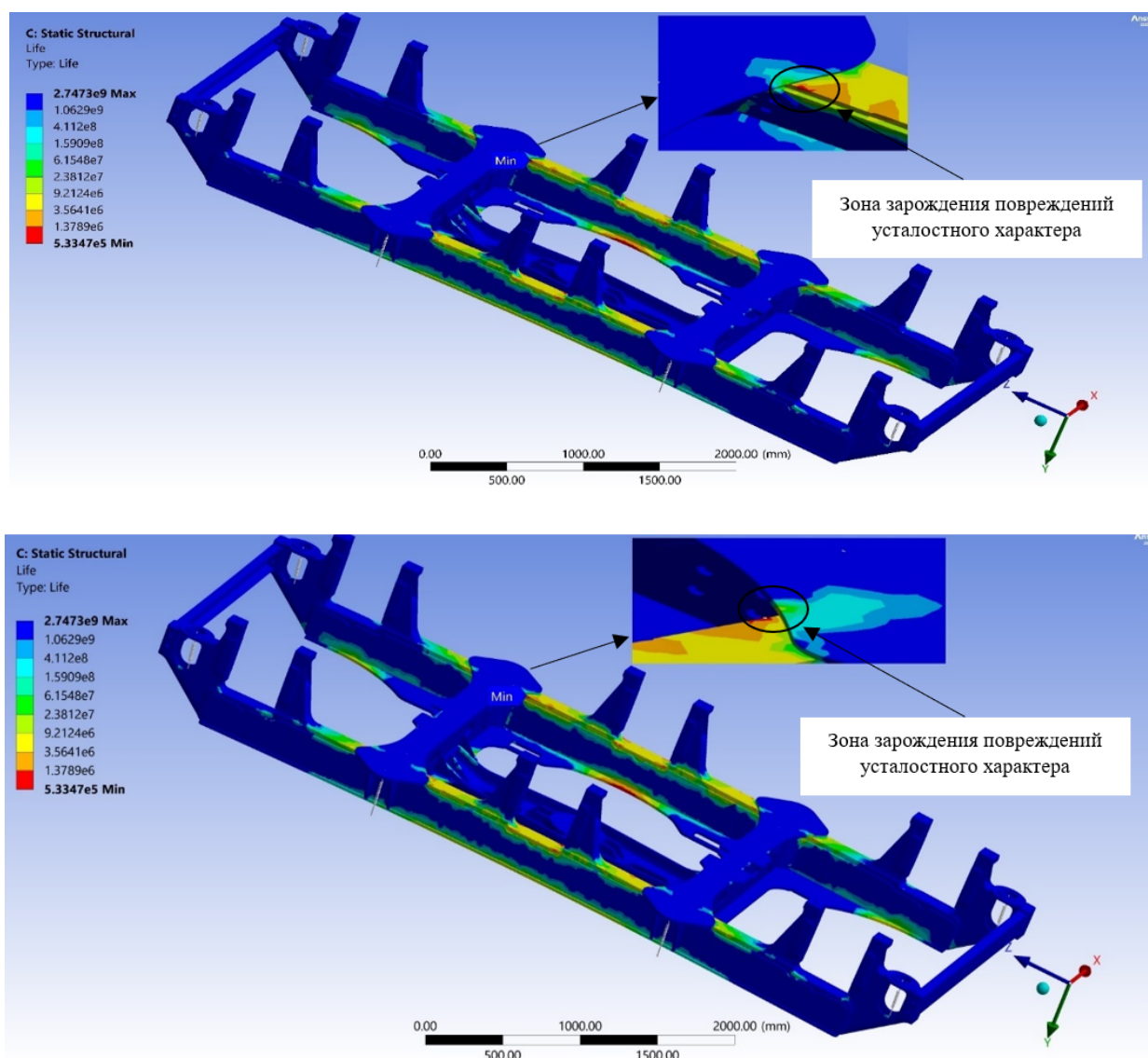


Рис. 6. Анализ усталостной долговечности рамы тележки тепловоза ТЭМ2 в модуле Fatigue при прохождении расчетных неровностей пути: верхний рисунок — по РД 32.68—96; нижний рисунок — по ПНСТ 511—2020

Прогноз ресурса осуществлялся по классической формуле:

$$T = \frac{L_p}{L_{\text{год}}},$$

где L_p — предельный пробег до появления усталостных трещин;
 $L_{\text{год}}$ — среднегодовой пробег тепловоза, принятый равным 41 000 км.

Данный пробег был получен путем обработки данных, предоставленных эксплуатирующими подразделениями железных дорог Узбекистана.

На основании анализа показателей напряжений и усталостной прочности получены следующие значения остаточного ресурса тележки (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Значения остаточного ресурса тележки

Норматив неровностей	Пробег до разрушения, км	Остаточный ресурс, лет
РД 32.68—96	533 000	13
ПНСТ 511—2020	580 000	14

Таким образом, даже при условии длительной эксплуатации (40–45 лет) рама тележки ТЭМ2 сохраняет остаточный запас ресурса, однако его величина напрямую зависит от состояния пути, интенсивности пробега и реальных эксплуатационных нагрузок.

Выводы и обсуждение

Выполненные расчеты показали, что для достоверной оценки остаточного ресурса несущих конструкций маневровых локомотивов одних лишь расчетов коэффициентов запаса прочности недостаточно. Несмотря на то, что значения $n \geq 1,5$ выполняются в конструкциях, отработавших свыше 40 лет, реальное сопротивление усталости может оказываться существенно ниже требуемого значения. Причиной служит совокупность факторов: деградация металла, накопленные микрповреждения в сварных швах и основном материале, а также увеличение амплитуды напряжений из-за низкого качества железнодорожного состояния пути.

Особое внимание заслуживают выявленные зоны концентрации напряжений, таких как участки сварки поперечной балки с боковинами и сопряжения коробчатых сечений с нижним поясом. В этих местах наблюдается повышенный уровень напряжений 47,7 МПа, что в условиях многоциклового нагружения способствует формированию очагов усталостного разрушения.

Принципиально важным элементом используемой методологии стала разработка скорректированной кривой усталости для материала, находившегося в эксплуатации не менее 40 лет. Использование реальных данных вместо справочных значений позволило существенно повысить точность прогноза ресурса. Интересно, что полученное значение предела выносливости — 35 МПа — оказалось почти в два раза ниже табличного значения для стали Ст3, принятого для свежих образцов. Это подтверждает необходимость корректировки нормативных коэффициентов для конструкций, находящихся в эксплуатации более 30 лет. Результатом расчета по такому методу явились результаты, отражающие остаточный ресурс несущей конструкции маневрового локомотива в пределах 13–14 лет.

Кроме того, было установлено, что динамическое нагружение, возникающее при движении по более точным неровностям пути, оказывает критическое влияние на результат расчета ресурса конструкции. Разница в остаточном ресурсе, рассчитанная по двум профилям неровностей, составила около одного года.

Таким образом, можно сделать следующие ключевые выводы:

1. Стандартные методы расчета запаса прочности не обеспечивают достаточной точности для прогнозирования остаточного ресурса тележек, отработавших более 40 лет.
2. Необходима локальная оценка напряжений [18] в зонах концентрации, а также учет состояния поверхности и масштабного эффекта, особенно в сварных соединениях.
3. Применение скорректированной кривой усталости позволяет получить более реалистичную оценку ресурса несущей конструкции маневрового локомотива.
4. Динамические нагрузки, обусловленные неровностями пути, существенно влияют на усталостный ресурс и должны учитываться при продлении срока службы.
5. Полученные результаты могут лечь в основу корректировки нормативных документов для оценок ресурса и разработки программ диагностики конструкций подвижного состава.

Отдельно стоит отметить, что одним из направлений развития предложенного подхода представляется использование различных методов неразрушающего контроля при проведении работ по продлению сроков службы и ремонтных мероприятий для раннего выявления усталостных трещин, а также учета реальных температурных и климатических факторов, влияющих на долговечность.

Список источников

1. Кодиров Н. С. Анализ технического состояния и прогнозирования ресурса несущих конструкций маневровых локомотивов, эксплуатирующихся на железных дорогах Республики Узбекистан / Н. С. Кодиров, П. С. Григорьев // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Омск, 18 ноября 2022 г. — Омск: ОмГУПС, 2022. — С. 270–276.
2. ГОСТ Р 55513—2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. — М.: Стандартинформ, 2013. — 75 с.
3. ГОСТ 34939—2023. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2023. — 45 с.
4. Махутов Н. А. Методы определения ресурса конструкций локомотивов / Н. А. Махутов, В. С. Коссов, Э. С. Оганьян и др. // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ — 2016): труды конф., Москва, 26–28 окт. 2016 г. — М.: ИМАШ РАН, 2016. — С. 76–81.
5. Гасюк А. С. Расчетно-экспериментальные методы оценки ресурса базовых частей подвижного состава / А. С. Гасюк, Э. С. Оганьян // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — Т. 16. — № 2. — С. 285–291. — DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-285-291.

6. Оганьян Э. С. Безопасная эксплуатация локомотивов по ресурсу их базовых частей / Э. С. Оганьян, А. С. Гасюк, Г. М. Волохов и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 6. — С. 54–58. — DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58.
7. Берендеев Н. Н. Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности: учеб.-метод. пособие / Н. Н. Берендеев. — Нижний Новгород: НГУ, 2006. — 83 с.
8. Григорьев П. С. Подходы к оценке ресурса несущих конструкций подвижного состава с применением различных систем конечно-элементного анализа / П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров // Интеллектуальные транспортные системы: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 25 мая 2023 г. — М.: РУТ (МИИТ), 2023. — С. 570–577. — DOI: 10.30932/9785002182794-2023-570-577.
9. Майнер М. А. Накопление повреждений при усталости / М. А. Майнер // Journal of Applied Mechanics. — 1945. — Т. 12. — № 3. — С. A159–A164.
10. ГОСТ 380—2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2005.
11. Нормы для расчета прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог колеи 1520 мм. — М.: ВНИИЖТ, 1998. — 145 с.
12. Григорьев П. С. Оценка механических свойств материала несущей конструкции маневрового локомотива после истечения срока службы / П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров, А. М. Юсуфов, Г. Р. Измайлова // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Ташкент, 17–20 апр. 2024 г. — Ташкент: Ташкент. гос. трансп. ун-т, 2024. — С. 134–141.
13. ГОСТ 25.101—83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 25 с.
14. Smith R. A. A review of the fatigue strength of railway axle materials / R. A. Smith, S. Hillmansen // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. — 2004.
15. Kumar S. Fatigue life prediction of automotive chassis using finite element analysis / S. Kumar, I. V. Singh // International Journal of Fatigue. — 2015.
16. Sonsino C. M. Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety / C. M. Sonsino // International Journal of Fatigue. — 2007.
17. Luo R. K. Dynamic stress analysis of an open-shaped railway bogie frame / R. K. Luo, B. L. Gabbitas, B. V. Brickle // Engineering Failure Analysis. — 1996. — Vol. 3. — Iss. 1. — Pp. 53–64.
18. Григорьев П. С. Оценка ресурса несущих конструкций подвижного состава при помощи динамико-прочностных испытаний / П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров // Вестник транспорта Поволжья. — 2023. — № 3(99). — С. 18–24.

Дата поступления: 22.04.2025

Решение о публикации: 10.05.2025

Контактная информация:

ГРИГОРЬЕВ Павел Сергеевич — канд. техн. наук, доц. кафедры «Электропоезда и локомотивы»; grigorev.p@gmail.com

КОДИРОВ Нозимжон Солиевич — аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы»; nazimzhank@bk.ru

Estimation of the Service Life of the TEM2 Shunting Locomotive Main Frame on the Uzbekistan Railways

P. S. Grigorev, N. S. Kodirov

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obratsova str., OCP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Grigorev P. S., Kodirov N. S. Estimation of the Service Life of the TEM2 Shunting Locomotive Main Frame on the Uzbekistan Railways. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 77–92. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-77-92

Summary

Purpose: The estimation of the residual life of the TEM2 shunting locomotive bearing structure is to be conducted for the bogie frame, with consideration given to the operating loads and degradation of the structure material. **Methods:** The present paper evaluated the residual life of the shunting locomotive bearing structure considering its bogie frame from the standpoint of fatigue strength. The stress-strain state of the structure was determined at a combination of static and dynamic loads, based on the dynamic effects from track irregularities. An adjusted material fatigue curve was constructed taking into account the degradation of its properties after 40–45 years of operation. The fatigue resistance safety factor was calculated. **Results:** The research results demonstrated that variable loads, mileage and technical condition of the track are critically important for an accurate forecast of the durability of the locomotive main parts. The results can be applied in extending the rolling stock service life, as well as in developing regulatory requirements for its strength. **Practical significance:** The approach proposed allows improving the methods for determining the locomotive's bearing structure service life. The finite element analysis is important for assessing the technical condition of the locomotive parts. It will allow early detection of fatigue damage, which will significantly increase the durability of frame structures. The approach can be recommended for practical use. It will enhance the safety of rolling stock operation, and reduce repair and modernization costs. This approach will increase the safety of rolling stock operation, and reduce the repair and modernization costs.

Keywords: Shunting locomotive, bogie, dynamic loading, fatigue curve, stress-strain state, multi-cycle fatigue, safety factor, fatigue life, residual resource, track irregularities.

References

1. Kodirov N. S., Grigor'ev P. S. Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya i prognozirovaniya resursa nesushchikh konstruktsiy manevrovyykh lokomotivov, ekspluatiruyushchikhsya na zheleznnykh dorogakh Respubliki Uzbekistan [Analysis of the technical condition and forecasting the resource of supporting structures of shunting locomotives operated on the railways of the Republic of Uzbekistan]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: materialy VII Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem, Omsk, 18 noyabrya 2022 g.* [Operational reliability of the locomotive fleet and improving the efficiency of train traction: Proc. VII All-Russian scientific and technical conf. with international participation, Omsk, November 18, 2022]. Omsk: OmGUPS Publ., 2022, pp. 270–276. (In Russian)

2. *GOST R 55513—2013. Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST R 55513—2013. Locomotives. Requirements for strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2013, 75 p. (In Russian)
3. *GOST 34939—2023. Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST 34939—2023. Locomotives. Requirements for strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2023, 45 p. (In Russian)
4. Makhutov N. A., Kossov V. S., Ogan'yan E. S. Metody opredeleniya resursa konstruktsiy lokomotivov [Methods for determining the service life of locomotive structures]. *Zhivuchest' i konstruktsionnoe materialovedenie (ZhivKoM — 2016): trudy konf., Moskva, 26–28 okt. 2016 g.* [Survivability and structural materials science (ZhivKom — 2016): conf. proceedings, Moscow, October 26–28, 2016]. Moscow: IMASh RAN Publ., 2016, pp. 76–81. (In Russian)
5. Gasyuk A. S., Ogan'yan E. S. Raschetno-eksperimental'nye metody otsenki resursa bazovykh chastey podvizhnogo sostava [Calculation and experimental methods for assessing the service life of basic parts of rolling stock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Railway Engineering]. 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 285–291. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-285-291. (In Russian)
6. Ogan'yan E. S., Gasyuk A. S., Volokhov G. M. et al. Bezopasnaya ekspluatatsiya lokomotivov po resursu ikh bazovykh chastey [Safe operation of locomotives based on the resource of their base parts]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry]. 2017, Iss. 6, pp. 54–58. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58. (In Russian)
7. Berendeev N. N. *Primenenie sistemy ANSYS k otsenke ustalostnoy dolgovechnosti: ucheb.-metod. posobie* [Application of the ANSYS system to assess fatigue life: a teaching aid]. Nizhniy Novgorod: NGU, 2006, 83 p. (In Russian)
8. Grigor'ev P. S., Kodirov N. S. Podkhody k otsenke resursa nesushchikh konstruktsiy podvizhnogo sostava s primeneniem razlichnykh sistem konechno-elementnogo analiza [Approaches to assessing the resource of supporting structures of rolling stock using various finite element analysis systems]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 25 maya 2023 g.* [Intelligent transport systems: proc. II Int. scientific-practical. conf., Moscow, May 25, 2023]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2023, pp. 570–577. DOI: 10.30932/9785002182794-2023-570-577. (In Russian)
9. Mayner M. A. Nakoplenie povrezhdeniy pri ustalosti [Accumulation of damage due to fatigue]. *Journal of Applied Mechanics*, 1945, vol. 12, Iss. 3, pp. A159–A164.
10. *GOST 380—2005. Stal' uglerodistaya obyknovennogo kachestva* [GOST 380—2005. Carbon steel of ordinary quality]. Moscow: IPK Izd-vo standartov Publ., 2005. (In Russian)
11. *Normy dlya rascheta prochnosti nesushchikh elementov, dinamicheskikh kachestv i vozdeystviya na put' ekipazhnoy chasti lokomotivov zheleznykh dorog kolei 1520 mm* [Standards for calculating the strength of load-bearing elements, dynamic qualities and impact on the track of the undercarriage part of locomotives of 1520 mm gauge railways]. Moscow: VNIIZhT Publ., 1998, 145 p. (In Russian)

12. Grigor'ev P. S., Kodirov N. S., Yusufov A. M., Izmaylova G. R. Otsenka mekhanicheskikh svoystv materiala nesushchey konstruksii manevrovogo lokomotiva posle istecheniya sroka sluzhby [Evaluation of mechanical properties of the material of the supporting structure of a shunting locomotive after the expiration of its service life]. *Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Tashkent, 17–20 apr. 2024 g.* [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: materials of the III Int. scientific-technical conf., Tashkent, April 17–20, 2024]. Tashkent: Tashkent. gos. transp. un-t Publ., 2024, pp. 134–141. (In Russian)
13. GOST 25.101—83. *Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody skhematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzheniya elementov mashin i konstruksiy i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov* [GOST 25.101—83. Strength calculations and tests. Methods for schematizing random loading processes of machine elements and structures and statistical presentation of results]. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1983, 25 p. (In Russian)
14. Smith R. A., Hillmansen S. A review of the fatigue strength of railway axle materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2004.
15. Kumar S., Singh I. V. Fatigue life prediction of automotive chassis using finite element analysis. *International Journal of Fatigue*, 2015.
16. Sonsino C. M. Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. *International Journal of Fatigue*, 2007.
17. Luo R. K., Gabbitas B. L., Brickle B. V. Dynamic stress analysis of an open-shaped railway bogie frame. *Engineering Failure Analysis*, 1996, vol. 3, Iss. 1, pp. 53–64.
18. Grigor'ev P. S., Kodirov N. S. Otsenka resursa nesushchikh konstruksiy podvizhnogo sostava pri pomoshchi dinamiko-prochnostnykh ispytaniy [Assessment of the service life of rolling stock load-bearing structures using dynamic strength tests]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region]. 2023, Iss. 3(99), pp. 18–24. (In Russian)

Received: April 22, 2025

Accepted: May 10, 2025

Author's information:

Pavel S. GRIGOREV — PhD in Engineering, Associate Professor,

“Electric Trains and Locomotives” Department; grigorev.p@gmail.com

Nozimzhon S. KODIROV — Postgraduate Student, “Electric Trains and Locomotives” Department; nazimzhank@bk.ru

УДК 531.8

Анализ и синтез механизма стеклоочистителя

А. А. Мигров, Е. В. Опарина

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

Для цитирования: Мигров А. А., Опарина Е. В. Анализ и синтез механизма стеклоочистителя // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 93–106. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-93-106

Аннотация

Цель: Провести структурный и кинематический анализ шестизвенного рычажного механизма стеклоочистителя, на основе синтеза механизма по заданным начальным и конечным положениям выходного звена уточнить размеры звеньев механизма. **Методы:** В статье выполнен обзор источников, посвященных методам синтеза, кинематики и динамики механизмов стеклоочистителей. Выполнен анализ существующих конструкций механизмов, и представлена их классификация. Сделан выбор типовой схемы механизма стеклоочистителя. Приведен кинематический анализ шестизвенного механизма с использованием метода векторных контуров. Проведен синтез кривошипно-коромыслового механизма. **Результаты:** В среде MathCAD разработана математическая модель рычажного шестизвенного механизма, позволяющая определить кинематические характеристики любого звена или характерной точки механизма по значениям кинематических параметров входного звена. Уточнены размеры звеньев кривошипа, шатуна и коромысла механизма. **Практическая значимость:** Разработанный алгоритм и программный код вычисления могут быть использованы для расчета кинематических и динамических характеристик обширного класса плоских многозвенных рычажных механизмов.

Ключевые слова: Анализ механизма, синтез механизма, метод векторных контуров, кинематический анализ, обратная задача синтеза, кинематическая геометрия.

Введение

Хорошая видимость является важным фактором, влияющим на безопасность движения транспортного средства. Во время сильного дождя, а также в весенне-осенний период видимость значительно ухудшается. При движении автомобиля из-за абразивного воздействия частиц пыли, песка и прочих загрязнителей поверхность ветрового стекла теряет свою гладкость, на стекле появляются мутные разводы. В холодное время года влага на лобовом стекле быстро превращается в лед и мешает обзору. Для предотвращения и устранения снижения видимости и обзорности используются стеклоочистители.

В истории автомобилестроения конструкция стеклоочистителей постоянно совершенствовалась. Первоначально конструкция стеклоочистителей имела ручной привод. Затем появился привод, состоящий из электродвигателя, который через редуктор приводит в движение рычажный механизм.

Одновременно происходило непрерывное развитие и совершенствование конструкций стеклоочистителей. Исследовались различные аспекты, связанные с проектированием механизмов стеклоочистителей. Так, например, в работе [1] на основе численного моделирования выполнена оценка силы трения между резиновыми щетками и ветровым стеклом автомобиля. В статье [2] был проанализирован механизм, определены силы реакций и момент инерции, а также предложена математическая модель, позволяющая определить крутящий момент привода. В работе [3] предложена точная траектория движения механизма, а также выполнен анализ скорости и ускорения входного звена. В исследовании [4] рассмотрено распределение эквивалентных напряжений в звеньях и шарнирах механизма стеклоочистителя для определения вероятной области разрушения конструкции.

В работах [5–8] рассматривались вопросы взаимодействия щетки и стекла, а также аспекты динамики и устойчивости работы механизмов стеклоочистителей.

Одной из наиболее важных задач, возникающих при проектировании механизмов стеклоочистителей является так называемая обратная задача синтеза, которая заключается в нахождении наиболее подходящего механизма для заданного закона или траектории движения. При этом к методам проектирования относятся: топологический и структурный синтез, числовой синтез, размерный синтез и др.

Концепцию синтеза топологии механизма разработал Ф. Рело, который ставил задачу выбора типа механизма в качестве первого этапа проектирования. Одному требуемому движению потенциально может соответствовать большое количество типов механизмов: кулачковых, ременных, зубчатых, рычажных и т. д., а также их комбинаций.

Задачами структурного анализа и синтеза являются: определение числа степеней свободы механизмов и кинематических цепей в зависимости от геометрических форм звеньев и их количества; определение возможности движения механизма в заданном интервале изменения обобщенных координат с учетом действующих сил; обеспечение заданных траекторий движения точек звеньев механизма и др.

Числовой синтез заключается в определении альтернативных вариантов, которые удовлетворяют структурным требованиям: степени свободы, тип и связи элементов (звеньев и кинематических пар); тип, связность и сложность механизма. Структура может быть задана в виде количества звеньев, количества шарниров в кинематической цепи и т. д.

Размерный синтез состоит в вычислении размеров каждого звена механизма. На начальном этапе задачу проектирования решают в рамках гипотезы жесткого механизма, т. е. в предположении, что звенья не обладают ни массой, ни инерционными свойствами. Синтез заключается в нахождении механизмов для решения траекторий и формирования функций между двумя и более телами.

К настоящему времени разработано множество методов синтеза механизмов, которые относятся к двум основным направлениям: первое — использование алгебраических методов Чебышева, использующих условия наилучшего приближения функций, и второе — использование методов кинематической геометрии, обоснованных Бурместером. Дальнейшее развитие идей Чебышева было осуществлено в работах Артоболевского [9] и др.

Основной принцип синтеза методами кинематической геометрии заключается в нахождении таких особых точек в плоскости сопряжения механизма, которые являются кратными узлами интерполяции и удовлетворяют критерию наличия в этой точке касательной кривой сопряжения к ее касательной окружности высокого порядка. Одной из таких особых точек сопряжения, которая может быть использована для синтеза связей, генерирующих круговые траектории с хорошим приближением к дуге окружности, является точка Бурместера, определяющаяся для пяти бесконечно близких положений сопряжения.

Для заданного числа точек и заданной топологии механизма такой синтез позволяет узнать, является ли решение единственным, множественным или несуществующим. Аналитические выражения могут быть в форме систем линейных или нелинейных уравнений, в том числе с комплексными переменными.

Как правило, после использования синтеза необходимо провести кинематический анализ, чтобы оценить поведение механизма между точками. Может оказаться, что механизм проходит через заданные точки, но значительно удаляется на промежуточных участках. Приближенный синтез применяется в случаях, когда число заданных точек очень велико или когда поведение между промежуточными точками очень важно. Метод требует проведения кинематического анализа несколько раз, по крайней мере, одного на итерацию, при котором найденное решение сравнивается с желаемой траекторией. При этом определяется величина отклонения, которая должна быть минимизирована.

Несмотря на многолетнюю практику проектирования и применения стеклоочистителей, анализ и синтез таких механизмов остается малоизученной научной проблемой. Актуальность разработки методики синтеза механизмов стеклоочистителей возрастает в связи с тем, что подобные механизмы используются не только на грузовых и легковых автомобилях. Они являются важными элементами обеспечения безопасности строительной техники, речных и морских судов, а также вертолетов и авиалайнеров.

Все многообразие механизмов стеклоочистителей можно классифицировать по нескольким признакам:

- 1) количество щеток (одна, две или более);
- 2) расположение механизма (вверху рамки ветрового стекла или внизу);
- 3) траектория движения щеток стеклоочистителя (рис. 1):

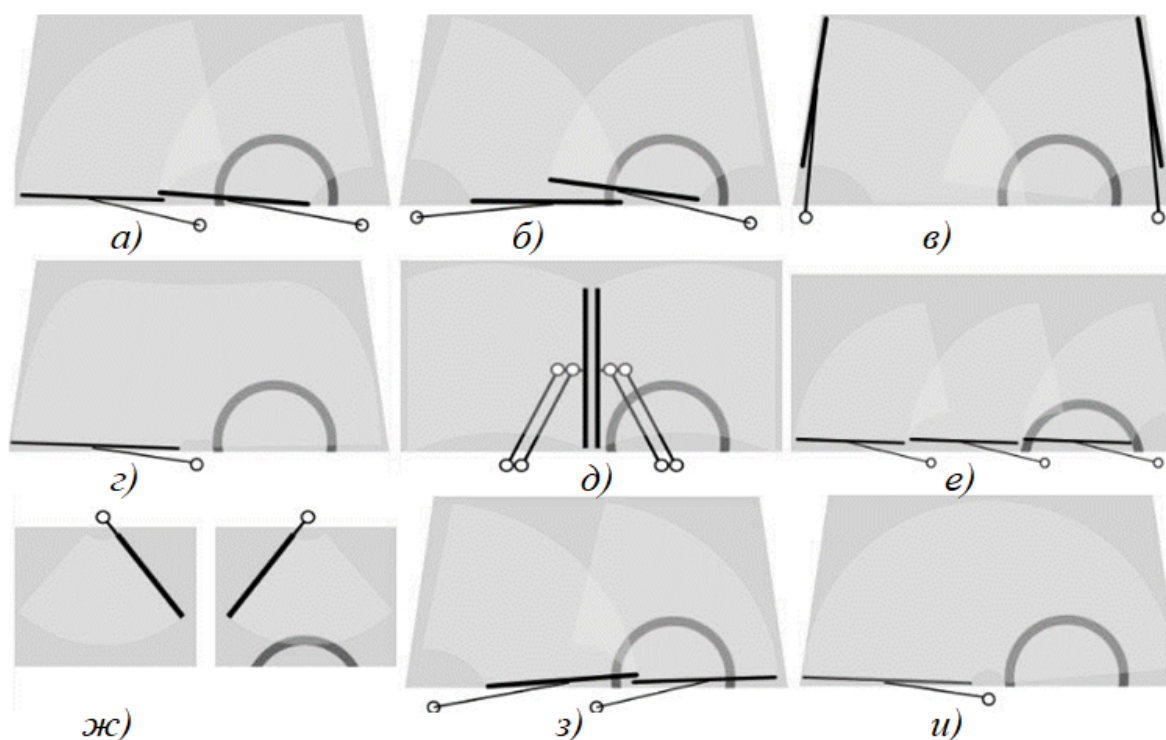


Рис. 1. Схемы работы механизмов стеклоочистителей [10]

3.1) тандемные системы с движением вверх и вниз в одном направлении, как со стороны водителя, так и со стороны пассажира. В тандемных системах точки крепления рычагов находятся у основания ветрового стекла со стороны водителя, а другая точка крепления — у центра стекла (рис. 1, а, е, з).

3.2) в системах с оппозитным расположением стеклоочистителей точки крепления расположены у основания стекла, но одна точка опоры находится со стороны водителя, а другая со стороны пассажира. В этом случае система стеклоочистителей работает в противоположных направлениях, что позволяет очистить большую площадь стекла (рис. 1, б, в, д).

3.3) в некоторых механизмах используется один шарнирный узел, на котором закреплены один рычаг и щетка стеклоочистителя (рис. 1, и).

3.4) прочие траектории движения щеток (рис. 1, ж).

Анализ механизма включает следующие этапы [11]:

1. Структурный анализ механизма. На данном этапе производится выбор основных звеньев механизма, их видов движения и траекторий при заданном положении отдельных выходных звеньев. Структурный анализ производится аналитическими и графическими методами. Результатом структурного анализа является разработка принципиальной схемы. Аналитические методы включают определение подвижности механизма, составление и проверку условий существования механизма. Графические методы включают построение плана положений принципиальной схемы механизма.

2. Кинематический анализ механизма. На данном этапе после предварительного выбора размеров звеньев механизма и ограничений к ним производится кинематический анализ характерных точек звеньев посредством аналитических, графоаналитических методов и методов моделирования. Результатом этапа является уточнение конфигурации, размеров звеньев механизма, проверка требуемой траектории выходных звеньев, определение кинематических характеристик характерных точек механизма.

3. Динамический анализ механизма. На данном этапе учитываются силы, действующие на механизм, инерционные характеристики звеньев и условия работы (ветровая нагрузка, сопротивление среды и т. д.). Результатом этапа является определение дифференциального уравнения движения выходного звена механизма и его решение.

В рамках данной статьи рассмотрен структурный, кинематический анализ механизма и синтез механизма по заданным начальным и конечным положениям выходного звена.

В этой связи **поставлены и решены следующие задачи:**

- выполнен обзор существующих конструкций механизма, сделан выбор принципиальной схемы механизма стеклоочистителя, определена его структура по характеру движения звеньев;
- проведен кинематический анализ принципиальной схемы механизма методом векторных контуров, в среде MathCAD разработана математическая модель шестизвенного механизма;
- уточнена геометрия шестизвенного рычажного механизма на основе синтеза кривошипно-коромыслового механизма по заданной траектории выходного звена с учетом выбранного максимального угла качания коромысла 3, заданного коэффициента производительности механизма и ограничения, вносимого допустимым углом давления в шарнире B [3, 4].

Структурный анализ механизма

Основываясь на классификации возможных конфигураций механизмов стеклоочистителей (рис. 1), зададимся исходной принципиальной схемой, которая представляет собой плоский шестизвенный рычажный механизм (рис. 2). Входное звено 1 (кривошип) совершает полный оборот вокруг стойки O , звено 2 (шатун) передает движение на рычаг 3, совершает плоскопараллельное движение. Рычаги 3 и 4 (коромысла) совершают неполный оборот вокруг стойки $O1$ и $O2$ (качаются).

Степень подвижности плоского механизма определим по формуле Чебышева [9, 12]:

$$W = 3(n - 1) - 2p_5 - p_4 = 3(6 - 1) - 2 \cdot 7 - 0 = 1,$$

где n — количество звеньев в механизме, $n = 6$;

p_5 — количество кинематических пар пятого класса, $p_5 = 7$;

p_4 — количество кинематических пар четвертого класса, $p_4 = 0$.

Конструкция механизма должна быть компактной, рычаги в крайнем положении должны занимать близкое к горизонтальному положение. Схема работы механизма — тандемная, оба рычага срабатывают синхронно.

Электродвигатель приводит в действие кривошип 1, который через шатун 2 обеспечивает симметричное движение рычагов 3 и 4 с щетками. Тяга 5 передает движение ко второму рычагу. Щетки выполняют работу в обоих направлениях.

Кинематический анализ механизма

Кинематический анализ плоского шестизвенного рычажного механизма проведен с помощью метода векторных контуров. Метод векторных контуров используется для определения как мгновенных значений кинематических параметров механизма, так и зависимостей этих параметров от времени или от времени и угла поворота входного звена. Входным звеном является кривошип (звено 1). Целью кинематического анализа является определение зависимостей угла поворота, угловой скорости и углового ускорения рычагов 3 и 4 от угла поворота кривошипа и достижение требуемой траектории движения крайних точек этих рычагов [12–14].

Частота вращения кривошипа известна, кривошип вращается с постоянной угловой скоростью. Рычаги 3 и 4 работают синхронно, имеют одинаковую угловую скорость. Для определения зависимостей углов φ_2 и φ_3 (рис. 3) от положения кривошипа введем дополнительный вектор $\bar{l}_4$. Первое уравнение замкнутого векторного контура запишется (рис. 3):

$$\bar{l}_1 + \bar{l}_4 - \bar{l}_0 = 0. \quad (1)$$

Спроецируем выражение (1) на оси декартовых координат, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} l_1 \cos \varphi_1 + l_4 \cos \varphi_4 - l_0 = 0 \\ l_1 \sin \varphi_1 - l_4 \sin \varphi_4 = 0. \end{cases}$$

Найдем l_4 и φ_4 :

$$l_4 = \sqrt{l_0^2 + l_1^2 - 2l_0l_1 \cos \varphi_1}.$$

$$\varphi_4 = \arcsin \left(\frac{-l_1 \sin \varphi_1}{l_4} \right).$$

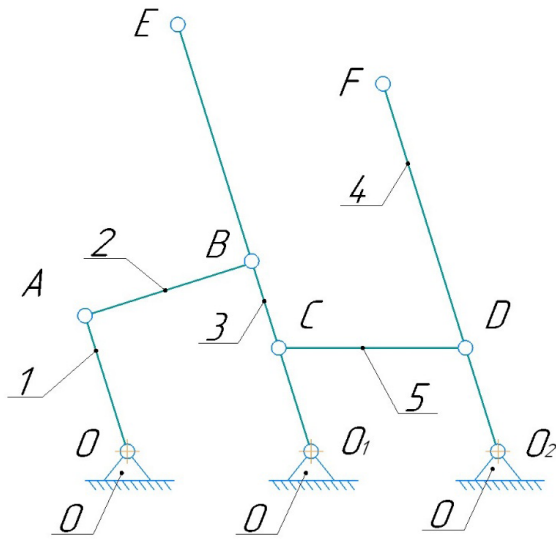


Рис. 2. Схема шестизвенного плоского механизма стеклоочистителя

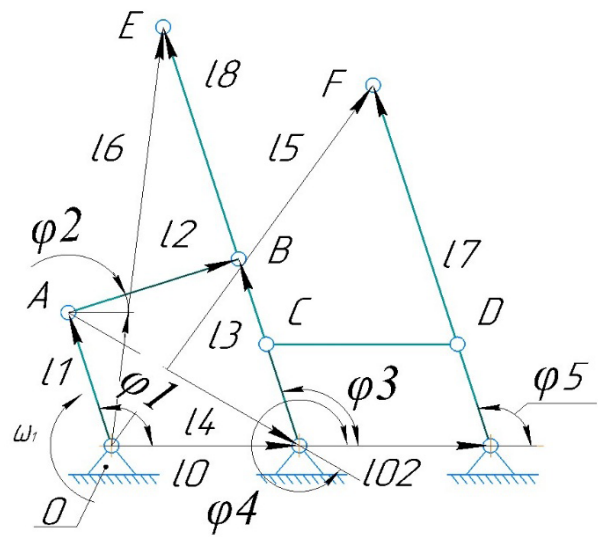


Рис. 3. Векторная модель механизма

Для нахождения углов φ_2 и φ_3 , определяющих положения звеньев 2 и 3, рассмотрим следующий замкнутый контур (рис. 3):

$$\vec{l}_2 = \vec{l}_3 + \vec{l}_4. \quad (2)$$

Спроецируем выражение (2) на оси декартовых координат, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} l_2 \cos \varphi_2 - l_3 \cos \varphi_3 - l_4 \cos \varphi_4 = 0 \\ l_2 \sin \varphi_2 - l_3 \sin \varphi_3 - l_4 \sin \varphi_4 = 0. \end{cases}$$

Получим зависимости углов φ_2 и φ_3 от положения кривошипа (рис. 3):

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \arccos \left(\frac{l_2^2 + l_4^2 - l_3^2}{2l_2l_4} \right) + \varphi_4. \\ \varphi_3 &= \arccos \left(\frac{l_2 \cos \varphi_2 - l_4 \cos \varphi_4}{l_3} \right). \end{aligned}$$

Дальнейшее определение кинематических характеристик проведем через составление векторного уравнения замкнутости четырехугольного контура $OABO_1$ (рис. 2, 3) [6]:

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_3 + \vec{l}_0. \quad (3)$$

Спроецируем уравнение (3) на оси декартовых координат, получим систему уравнений, определяющую положение звеньев механизма:

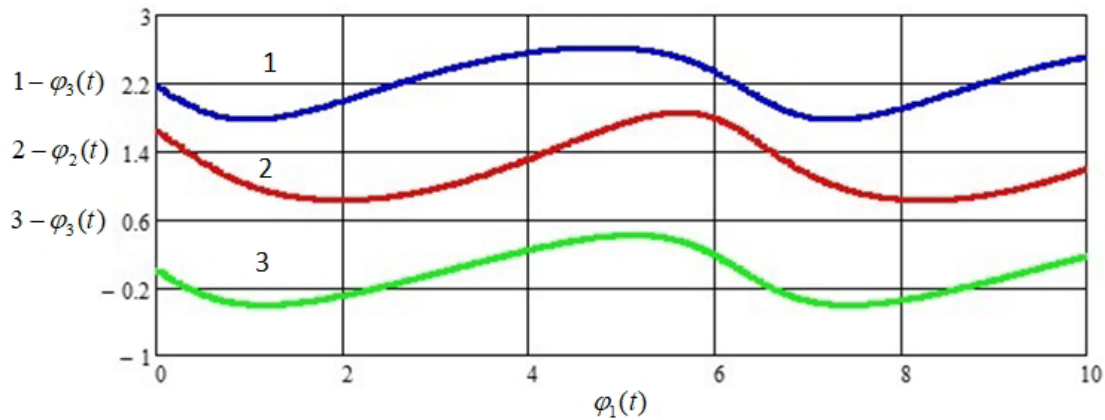


Рис. 4. Графики зависимостей углов $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$ и $\varphi_4(t)$ от угла поворота кривошипа $\varphi_1(t)$

$$\begin{cases} l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 - l_3 \cos \varphi_3 - l_0 = 0 \\ l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 - l_3 \sin \varphi_3 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Возьмем производную по времени от каждого уравнения в системе (4), получим следующую систему уравнений (каждый угол зависит от угла поворота кривошипа, который, в свою очередь, меняется в зависимости от времени):

$$\begin{cases} -l_2 \sin \varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_2 + l_3 \sin \varphi_3 \cdot \dot{\varphi}_3 = l_1 \sin \varphi_1 \cdot \dot{\varphi}_1 \\ l_2 \cos \varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_2 - l_3 \cos \varphi_3 \cdot \dot{\varphi}_3 = -l_1 \cos \varphi_1 \cdot \dot{\varphi}_1. \end{cases} \quad (5)$$

Система (5) линейна относительно угловых скоростей $\dot{\varphi}_2$ и $\dot{\varphi}_3$. На рис. 5 приведены графики зависимостей угловых скоростей звеньев 2 и 3 от угла поворота кривошипа $\varphi_1(t)$.

После повторного дифференцирования каждого уравнения в системе (4) получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} -l_2 \cos \varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_2^2 - l_2 \sin \varphi_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 + l_3 \cos \varphi_3 \cdot \dot{\varphi}_3^2 + l_3 \sin \varphi_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 = l_1 \cos \varphi_1 \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_1 \sin \varphi_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 \\ -l_2 \sin \varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_2^2 + l_2 \cos \varphi_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 + l_3 \sin \varphi_3 \cdot \dot{\varphi}_3^2 - l_3 \cos \varphi_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 = l_1 \sin \varphi_1 \cdot \dot{\varphi}_1^2 - l_1 \cos \varphi_1 \cdot \ddot{\varphi}_1. \end{cases}$$

Данные уравнения линейны относительно угловых ускорений $\ddot{\varphi}_2$ и $\ddot{\varphi}_3$. На рис. 6 приведены зависимости угловых ускорений звеньев 2 и 3 от угла поворота кривошипа $\varphi_1(t)$.

Для нахождения траекторий крайних точек звеньев 3 и 4 используем еще два векторных уравнения (рис. 3):

$$\bar{l}_6 = \bar{l}_0 + \bar{l}_8. \quad (8)$$

$$\bar{l}_5 = \bar{l}_0 + \bar{l}_{02} + \bar{l}_7. \quad (9)$$

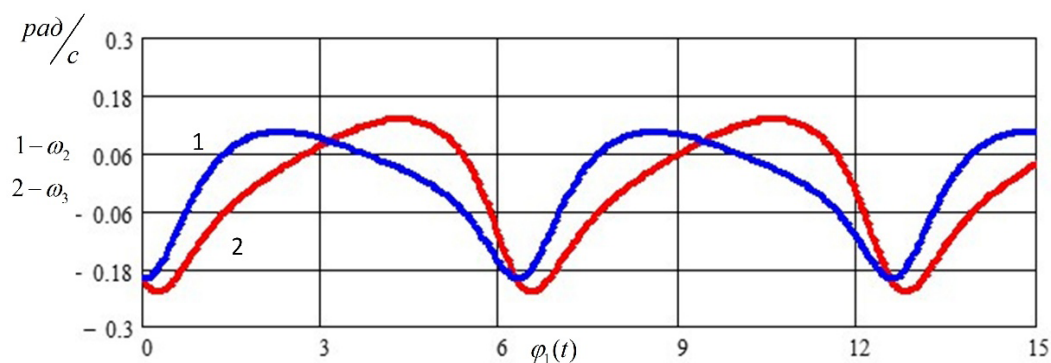


Рис. 5. Графики зависимостей угловых скоростей звеньев 2 и 3 (ω_2 и ω_3) от угла поворота кривошипа $\varphi_1(t)$

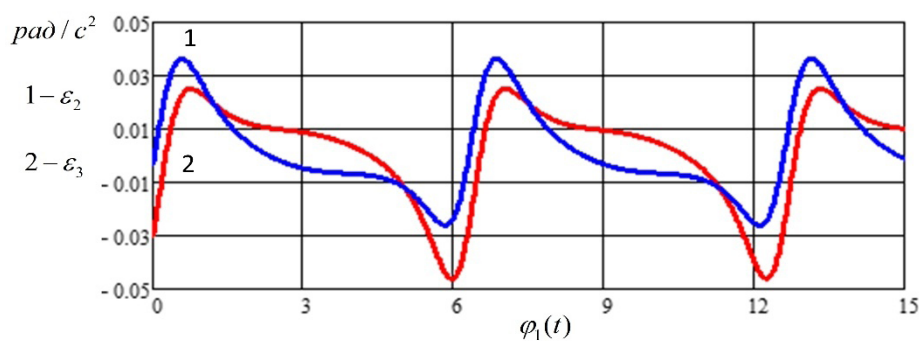


Рис. 6. Графики зависимостей угловых ускорений звеньев 2 и 3 (ε_2 и ε_3) от угла поворота кривошипа $\varphi_1(t)$

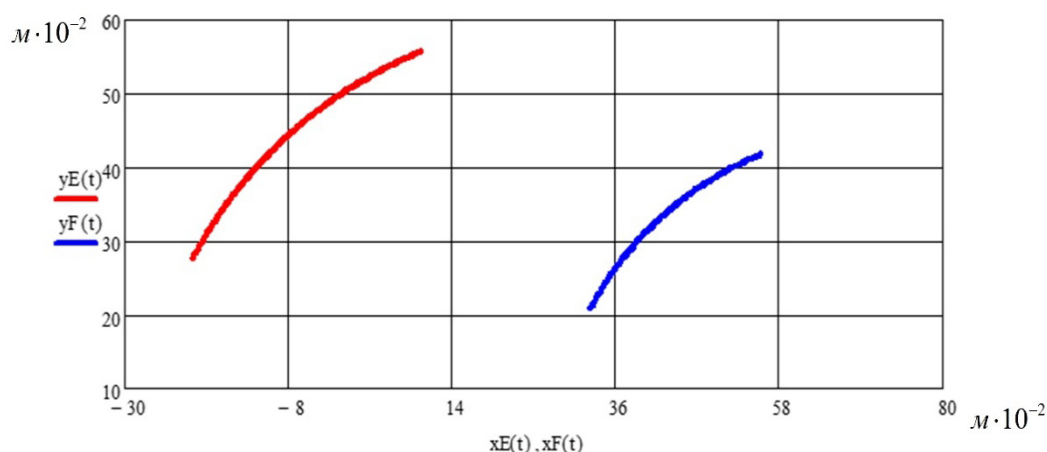


Рис. 7. Траектории крайних точек рычагов 3 и 4

Для построения траекторий крайних точек E и F звеньев 3 и 4 спроецируем векторные уравнения (8) и (9) на оси координат и используем полученные угловые кинематические характеристики звена 3. На основе выбранных исходных геометрических параметров шестизвенного рычажного механизма получена траектория крайних точек звеньев 3 и 4 (рис. 7).

Геометрический синтез кривошипно-коромыслового механизма

Уточним геометрические размеры шестизвенного кривошипно-коромыслового механизма через построение в масштабе начального и конечного положений механизма (рис. 8). Зададимся исходными значениями длины звена 3 ($l_3 = 600$ мм), максимального угла качания звена 3 ($\psi_{\max} = 55^\circ$) и коэффициентом производительности механизма $K = 1,7$ (угол смещения $\theta = 47^\circ$) с учетом ограничения, вносимого допустимым углом давления в шарнире B ($\vartheta_{\max} < 45^\circ$) [3–6].

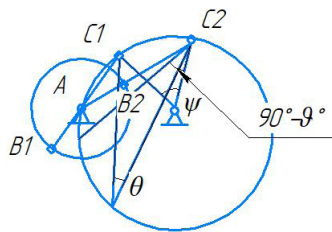


Рис. 8. Геометрический синтез кривошипно-коромыслового механизма

После подбора нескольких геометрических соотношений длин звеньев получена уточненная траектория конечных точек звеньев 3 и 4 (рис. 9). Окончательно длины звеньев 1, 2 и 3 равны соответственно: $l_1 = 190$ мм, $l_2 = 375$ мм, $l_3 = 300$ мм (от стойки до шарнира B , рис. 2), расстояние между стойками $l_{o01} = 400$ мм.

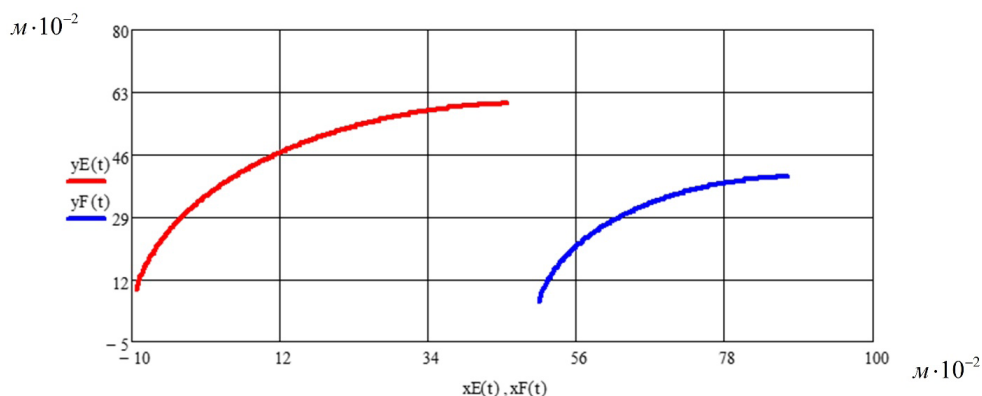


Рис. 9. Уточненные траектории крайних точек рычагов 3 и 4 шестизвенного рычажного механизма

Выводы:

1. В статье выполнен обзор научных работ, посвященных проблемам проектирования и совершенствования конструкций механизмов стеклоочистителей. Выполнена постановка цели и задач исследования, обоснована актуальность работы.

2. Детально рассмотрен вопрос решения обратной задачи синтеза механизмов топологическим, структурным, числовым и размерным методами.

Проанализированы основные направления синтеза механизмов с использованием алгебраических методов Чебышева и с использованием методов кинематической геометрии.

3. Выполнен обзор существующих конструкций механизмов стеклоочистителя, предложена принципиальная схема механизма. Аналитическим методом выполнен структурный анализ выбранной конфигурации механизма стеклоочистителя.

4. Разработана математическая модель шестизвенного рычажного механизма, позволяющая рассчитать кинематические характеристики любого звена или характерной точки механизма по значениям кинематических параметров входного звена. Получены траектории крайних точек шестизвенного рычажного механизма.

5. На основе геометрического синтеза кривошипно-коромыслового механизма по заданным начальным и конечным положениям выходного звена с учетом выбранного коэффициента производительности, угла качания коромысла, длины рычага и ограничения по углу давления уточнены размеры звеньев механизма.

Список источников

1. Copilusi C. An Approach Regarding Windshield Wiper Mechanism Design / C. Copilusi, V. Veliscu // *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications, Switzerland. — Vol. 822. — Pp. 112–117.
2. Alexandru C. Aspects regarding the wiper windshield mechanism analysis by considering as multibody systems / C. Alexandru // *Annals of the University of Oradea, Fascicle of Management and Tech. Eng.* — 2006. — Vol. 5(15). — Pp. 591–600.
3. Gokge H. Design and Kinematic Analysis of Windshield Wiper Mechanism Using CATIA V5 / H. Gokge, I. Sahin // *3rd International Symposium on Industrial Design and Engineering*, Nov 2018.
4. Nemade A. M. Dynamic modeling and simulation of windshield wiper mechanism / A. M. Nemade, R. M. Deshmukh // *Advances in Automobile Engineering*. — 2020. — Vol. 9.
5. Chevennement-Roux C. Wiper Systems with Flexible Structures — Instabilities Analysis and Correlation with a Theoretical Model / C. Chevennement-Roux, R. Grenouillat, T. Dreher, P. Alliot et al. // *SAE Technical Paper*. — 2005. — DOI: 10.4271/2005-01-2375.
6. Okura S. Dynamic analysis of blade reversal behaviour in a windshield wiper system / S. Okura, T. Sekigushi // *SAE Papers*. — 2000.
7. Qingdong H. Analysis of Windshield Wiper Reversal Impact and Its Suppression by Structural Design / H. Qingdong, Q. Wenjie, Yu Zhe, T. Mu et al. // *SAE Technical Papers*. — 2015. — DOI: 10.4271/2015-01-0108.
8. Begout M. Les problèmes liés au frottement élastomère — verre dans l'automobile / M. Begout // *Mémoire de thèse, université Paul Sabatier Toulouse*. — 1979.

9. Артоболевский И. И. Синтез плоских механизмов / И. И. Артоболевский. — М.: Физматгиз, 1959. — 1084 с.
10. Kohlstedt K. Behind the Screens: Windshield-Clearing Designs from Wipers to Spin Windows / K. Kohlstedt. — URL: <https://99percentinvisible.org/article/behind-screens-windshield-clearing-designs-wipers-spin-windows/> (дата обращения: 31.03.2025).
11. Недоводеев В. Я. Курс лекций по теории механизмов и машин для машиностроительных специальностей / В. Я. Недоводеев. — Ульяновск: УлГТУ, 2012. — 83 с.
12. Фролов К. В. Теория механизмов и механика машин: учебник / К. В. Фролов, С. А. Попов, А. К. Мусатов, Г. А. Тимофеев; под ред. Г. А. Тимофеева. — 7-е изд. — М.: МГТУ им. Баумана, 2012. — 686 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/250241> (дата обращения: 09.05.2025).
13. Теория механизмов и машин. Синтез и кинематический анализ рычажных механизмов: методические указания / сост. П. А. Галкин. — Тамбов: ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. — 32 с.
14. Краснов А. А. Теория механизмов и машин. Кинематический анализ плоских механизмов с низшими кинематическими парами: учебное пособие / А. А. Краснов. — Иваново, 2005. — 153 с.

Дата поступления: 15.04.2025

Решение о публикации: 18.05.2025

Контактная информация:

МИГРОВ Александр Алексеевич — канд. техн. наук, доц. кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; e-mail: amigrov@gmail.com

ОПАРИНА Екатерина Владимировна — канд. техн. наук., доц. кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций», доц. кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; e-mail: sirayaekaterina@mail.ru

Analysis and Synthesis of Windshield Wiper Mechanism

A. A. Migrov, E. V. Oparina

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

For citation: Migrov A. A., Oparina E. V. Analysis and Synthesis of Windshield Wiper Mechanism. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 93–106. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-93-106

Summary

Purpose: To perform a structural and kinematic analysis of a six-link windshield wiper mechanism based on the synthesis of the mechanism using the specified initial and final positions of the output link, to specify the mechanism links' dimensions. **Methods:** The present paper is an examination of extant publications concerning the methods of synthesis, kinematics and dynamics of windshield wiper mechanisms. The analysis of existing mechanism designs was performed and their classification presented. A standard windshield wiper mechanism diagram was selected for analysis. A kinematic analysis of the six-link mechanism was performed

using the vector contour method. The crank-rocker mechanism was synthesized. **Results:** A mathematical model of the six-link lever mechanism has been developed in the MathCAD environment, which allows for the determination of the kinematic characteristics of any link or characteristic point of the mechanism based on the kinematic parameters of the input link. The dimensions of the crank, connecting rod and rocker links of the mechanism have been specified. **Practical significance:** The developed algorithm and software calculation code can be used to calculate the kinematic and dynamic characteristics of a wide class of flat multi-link lever mechanisms.

Keywords: Mechanism analysis, mechanism synthesis, vector contour method, kinematic analysis, inverse synthesis problem, kinematic geometry.

References

1. Copilusi C., Veliscu V. An Approach Regarding Windshield Wiper Mechanism Design. *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications, Switzerland, vol. 822, pp 112–117.
2. Alexandru C. Aspects regarding the wiper windshield mechanism analysis by considering as multibody systems. *Annals of the University of Oradea, Fascicle of Management and Tech. Eng.*, 2006, vol. 5(15), pp. 591–600.
3. Gokge H., Sahin I. Design and Kinematic Analysis of Windshield Wiper Mechanism Using CATIA V5. 3rd International Symposium on Industrial Design and Engineering, Nov 2018.
4. Nemade A. M., Deshmukh R. M. Dynamic modeling and simulation of windshield wiper mechanism. *Advances in Automobile Engineering*, 2020, vol. 9.
5. Chevennement-Roux C., Grenouillat R., Dreher T., Alliot P. et al. Wiper Systems with Flexible Structures — Instabilities Analysis and Correlation with a Theoretical Model. *SAE Technical Paper*, 2005. DOI: 10.4271/2005-01-2375.
6. Okura S., Sekigushi T. Dynamic analysis of blade reversal behaviour in a windshield wiper system. *SAE Papers*, 2000.
7. Qingdong H., Wenjie Q., Zhe Yu, Mu T. et al. Analysis of Windshield Wiper Reversal Impact and Its Suppression by Structural Design. *SAE Technical Papers*, 2015. DOI: 10.4271/2015-01-0108.
8. Begout M. Les problèmes liés au frottement élastomère — verre dans l'automobile. *Mémoire de thèse, université Paul Sabatier Toulouse*, 1979.
9. Artobolevskiy I. I. *Sintez ploskikh mekhanizmov* [Synthesis of flat mechanisms]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1959, 1084 p. (In Russian)
10. Kohlstedt K. Behind the Screens: Windshield-Clearing Designs from Wipers to Spin Windows. Available at: <https://99percentinvisible.org/article/behind-screens-windshield-clearing-designs-wipers-spin-windows/> (accessed: March 31, 2025).
11. Nedovodeev V. Ya. *Kurs lektsiy po teorii mekhanizmov i mashin dlya mashinostroitel'nykh spetsial'nostey* [Lecture course on the theory of mechanisms and machines for mechanical engineering specialties]. Ul'yanovsk: UIGTU Publ., 2012, 83 p. (In Russian)
12. Frolov K. V., Popov S. A., Musatov A. K., Timofeev G. A. *Teoriya mekhanizmov i mekhanika mashin: uchebnik; pod red. G. A. Timofeeva, 7-e izd.* [Theory of mechanisms and mechanics of machines: textbook; edited by G. A. Timofeev. 7th ed.]. Moscow: MGTU im. Bauman Publ., 2012, 686 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/250241> accessed: May 9, 2025). (In Russian)

13. *Teoriya mekhanizmov i mashin. Sintez i kinematicheskiy analiz rychazhnykh mekhanizmov: metodicheskie ukazaniya; sost. P. A. Galkin* [Theory of mechanisms and machines. Synthesis and kinematic analysis of lever mechanisms: guidelines; compiled by P. A. Galkin]. Tambov: GOU VPO TGTU Publ., 2010, 32 p. (In Russian)

14. Krasnov A. A. *Teoriya mekhanizmov i mashin. Kinematicheskiy analiz ploskikh mekhanizmov s nizshimi kinematicheskimi parami: uchebnoe posobie* [Theory of Mechanisms and Machines. Kinematic Analysis of Flat Mechanisms with Lower Kinematic Pairs: textbook]. Ivanovo, 2005, 153 p. (In Russian)

Received: April 15, 2025

Accepted: May 18, 2025

Author's information:

Aleksandr A. MIGROV — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Ground Transport and Technological Complexes; e-mail: amigrov@gmail.com

Ekaterina V. OPARINA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanics and Strength of Materials and Structures, Department of Ground Transport and Technological Complexes; e-mail: sirayaekaterina@mail.ru

УДК 621.315.175

Имитационная модель физико-химического метода защиты контактного провода от обледенения

В. А. Бараусов¹, В. П. Бубнов², В. И. Моисеев²

¹ООО «ГК ИМСАТ», Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Гражданская ул., 7

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

Для цитирования: Бараусов В. А., Бубнов В. П., Моисеев В. И. Имитационная модель физико-химического метода защиты контактного провода от обледенения // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 107–119. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-107-119

Аннотация

Цель: Подтверждение работоспособности пассивного физико-химического способа защиты от обледенения контактного провода. **Методы:** Имитационная модель реализована в программной среде Python. Модель объединяет основные физические процессы: теплопередачу (распределение температуры в проводе и слоях покрытия), фазовый переход (замерзание воды с учетом скрытой теплоты), гидродинамику капель (движение воды под действием силы тяжести, поверхностного натяжения, ветра) и турбулентность (случайные флуктуации ветра, влияющие на траектории капель). **Результаты:** Разработана имитационная модель, учитывающая теплопередачу, фазовый переход воды, гидродинамику капель и турбулентность ветра на рельефной поверхности контактного провода с теплоизоляционным и гидрофобным покрытиями. Численные расчеты, выполненные явным методом конечных разностей с оператором Лапласиана, показали, что лед преимущественно формируется в нижних канавках рельефа, а турбулентность усиливает срыв капель, минимизируя обледенение верхней части. Модель подтверждает работоспособность способа повышения антиобледенительной эффективности проводника контактной сети, обеспечивающего пассивную защиту и удаление льда. **Практическая значимость:** Модель позволяет варьировать параметры (глубину рельефа, толщину и свойства покрытий, характеристики ветра) и прогнозировать зоны и интенсивность обледенения без дорогостоящих натурных экспериментов.

Ключевые слова: Контактный провод, обледенение, теплопередача, фазовый переход, рельефная поверхность, гидрофобное покрытие, гидродинамика капель, турбулентность, имитационное моделирование, метод конечных разностей.

Введение

Надежность контактной сети железнодорожного транспорта критически зависит от предотвращения обледенения проводов в условиях низких температур и высокой влажности. Обледенение ухудшает электрический контакт, увеличивает износ токоприемников и механическую нагрузку, требуя частого обслуживания. Традиционные методы, такие как нагрев или механическое удаление льда, энергоемки и трудозатратны.

Точных данных о финансовых потерях железнодорожных компаний за 2024–2025 годы в открытом доступе нет, но можно привести оценки на основе исторических данных и отчетов до 2023 года:

- США: затраты на обеспечение обледенения (нагрев, механическое удаление) составляют 1–2 миллиона долларов в год для крупных операторов (например, Amtrak), в зависимости от региона и протяженности линий. На 1 км это может составлять 500–1000 долл./год (оценка на основе 2000–4000 км электрифицированных дорог).

- Канада: CN и CP сталкиваются с потерями $\approx 500\,000$ – $1\,000\,000$ долл./год из-за обледенения, что эквивалентно 300–700 долл./км/год для ≈ 1500 км контактных сетей.

- Северная Европа (Швеция, Норвегия): SJ и NSB тратят ≈ 300 – 600 евро/км/год на антиобледенительные меры (нагрев, химикаты) на ≈ 2000 км линий.

- Китай: CRRC измеряет затраты на обледенение в размере 200–500 долл. США/км/год для высокоскоростных линий ($\approx 30\,000$ км электрифицированных дорог).

- Россия: РЖД потеря до 1–2 млрд рублей/год (≈ 10 – 20 млн долл.) на обслуживание 20 000 км электрифицированных линий, что дает 500–1000 долл./км/год.

В данной статье рассматривается инновационное решение из патента RU 2827574 [1], использующее контактный провод с рельефной поверхностью с теплоизолирующим и гидрофобным покрытиями. Цель исследования — оценить эффективность способа с помощью имитационного моделирования, включающего теплопередачу, гидродинамику капель и турбулентность, чтобы подтвердить снижение риска обледенения и упрощение удаления льда.

Описание патента RU 2827574

Патент предлагает контактный провод с антиобледенительным покрытием, включающий:

1. Рельефную поверхность, созданную накаткой с углом наклона, равным 65° , препятствующую растеканию воды.

2. Теплоизолирующее покрытие (например, «Корунд» с теплопроводностью $\approx 0,0012$ Вт/м·К), замедляющее охлаждение верхней части.

3. Гидрофобное покрытие с углом смачивания 120 – 180° , способствующее стеканию воды в канавки рельефа. Известно, что гидрофобные поверхности снижают смачиваемость и позволяют избежать замерзания воды на обшивке самолетов. Подобный подход предложен ранее для проводов ЛЭП — формирование гидрофобного слоя обеспечивает быстрое удаление попадающих капель воды.

4. Механизм действия: вода стекает вниз, замерзая в канавках и образуя легко удаляемые отложения льда.

Метод минимизирует активное вмешательство, полагаясь на пассивные свойства поверхности. Таким образом, разработана уникальная комбинация рельефной структуры и многослойных покрытий, обеспечивающая пассивную защиту от обледенения. Использование гидрофобных свойств позволяет управлять движением воды и ограничивать зоны замерзания.

Методология моделирования

Для оценки эффективности запатентованного решения [1] создана имитационная модель в программной среде Python. Модель объединяет основные физические процессы: теплопередачу (распределение температуры в проводе и слоях покрытия), фазовый переход (замерзание воды с учетом скрытой теплоты), гидродинамику капель (движение воды под действием силы тяжести, поверхностного натяжения, ветра) и турбулентность (случайные флуктуации ветра, влияющие на траектории капель). Подобные задачи численного моделирования фазовых переходов при теплообмене активно изучаются в литературе. Так, В. К. Толстых и К. А. Пшеничный [2] исследовали нестационарные процессы тепло- и массопереноса с фазовыми переходами в противоточных теплообменниках, а О. А. Симонов с соавторами [3] выполнили численное моделирование промерзания пористой воды с учетом конвекции и аномалии плотности. Влияние дисперсных капель на турбулентность и теплоотдачу также привлекает внимание исследователей. В частности, М. А. Пахомов и В. И. Терехов [4] провели численный анализ газок капельного потока и показали, что присутствие капель существенно меняет структуру турбулентности и теплообмена. О. А. Дружинин и соавторы [5] с помощью прямого численного моделирования (DNS) изучали турбулентный пограничный слой воздуха, нагруженный каплями, над колеблющейся водной поверхностью, выявляя значительное влияние ветровых волн на перенос тепла и массы. Для имитации обледенения поверхностей применяются различные подходы: например, К. Э. Сорокин и др. [6] реализовали расчет обледенения крыла с помощью CFD-пакета FlowVision, тогда как С. Л. Калюлин и В. Я. Модорский [7] исследовали нарастание льда на вибрирующем аэропрофиле методом численного эксперимента. Разрабатываются и специализированные инструменты: Н. Ш. Нгуен [8] предложил расчетный комплекс Ice-Studio для моделирования обледенения самолетов, сочетающий турбулентные и мелкомасштабные модели.

Метод и программная реализация

Численная реализация выполнена явным методом конечных разностей в трехмерной области, следуя классическому подходу А. А. Самарского [9]. Выбор в пользу метода конечных разностей обусловлен его простотой и эффективностью

для подобных задач теплообмена в многослойных структурах. Отметим, что данный метод широко применялся для расчета нестационарного охлаждения многослойных сред [10]. Программа моделирования реализована на Python с использованием библиотек NumPy и Matplotlib [11]. Применение высокоуровневых средств позволяет гибко управлять вычислительным экспериментом: например, в работе разработана Python-библиотека для автоматизации настройки моделей в CFD-кодах OpenFOAM и Elmer. Использование языка Python для решения задач теплопроводности и визуализации результатов также продемонстрировано в недавней работе [12], что подтверждает эффективность выбранного инструментария.

Логическая схема структуры программы модели



Геометрия и зоны модели: область моделирования представляет собой прямоугольный параллелепипед размером $0,1 \times 0,05 \times 0,1$ м. Верхняя граница области имеет рельефную форму, заданную функцией $y_{\text{boundary}}(x, z) = 0,035 + 0,002 \cdot \sin(2\pi x/Lx)$ (волнистая поверхность с амплитудой 2 мм). Эта поверхность моделирует верхний край теплоизоляционного слоя с нанесенным рельефом.

Ниже нее расположены слои: провод (толщиной $\approx 0,02$ м по вертикали), теплоизоляция (от 0,02 м до поверхности $y_boundary$) и гидрофобное покрытие (самый верхний слой непосредственно на поверхности). Расчетная сетка 3D имеет размер $50 \times 30 \times 50$ узлов по осям x, y, z соответственно.

Физические свойства материалов: теплопроводность провода принята $200 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$ (металл), теплоизоляции — $0,0012 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$ (например, керамический материал типа упомянутого «Корунд»), гидрофобного покрытия — $0,002 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$. Для расчета нестационарной теплопередачи использованы соответствующие значения плотности и теплоемкости: для металла $\rho \approx 2700 \text{ кг/м}^3$, $c \approx 900 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; для изоляции $\rho \approx 1000 \text{ кг/м}^3$, $c \approx 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; для покрытия $\rho \approx 1200 \text{ кг/м}^3$, $c \approx 1200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$.

Начальные и граничные условия: начальная температура провода и всех его слоев устанавливается 5°C (имитирует подогретый провод), температура окружающего воздуха -10°C . На верхней поверхности размещаются 20 капель воды радиусом порядка 1–2 мм (суммарно небольшой слой влаги). Боковые границы модели и нижняя грань поддерживаются при температуре -10°C (граничные условия первого рода, моделирующие холодный воздух вокруг и контакт с опорными конструкциями). Верхняя поверхность — открытая: на нее воздействуют окружающий воздух и ветер.

Метод решения: для расчета температуры используется явный метод конечных разностей в 3D с временным шагом $\Delta t = 0,001$ с. Дифференциальный оператор теплопроводности (Лапласиан температуры $\nabla^2 T$) рассчитывается в узлах сетки. Фазовый переход воды в лед учитывается через концепцию эффективной теплоемкости: в диапазоне температур от немногим выше 0°C до 0°C добавляется большая кажущаяся теплоемкость (расчетно эквивалентная скрытой теплоте $L \approx 334 \text{ кДж/кг}$), замедляющая остывание при переходе воды в лед. Положение каждой капли обновляется на каждом шаге с учетом сил: гравитации (тянет каплю вниз), поверхностного натяжения (стремится удержать каплю на поверхности, учитывая угол смачивания $\approx 150^\circ$), ветра (постоянная составляющая $\approx 5 \text{ м/с}$, дующая вдоль провода) и турбулентности (случайные порывы $\approx \pm 20\%$ от средней скорости). Капля считается замерзшей, если температура окружающей ее узловой точки сетки падает до 0°C или ниже; замерзшая капля фиксируется на месте. Турбулентность моделируется добавлением случайного гауссовского отклонения к скорости ветра на каждом шаге для каждой капли, что создает хаотичность в траекториях. Каждые 200 шагов моделирования сохраняются данные для постобработки (распределение температуры и положение/состояние капель).

Анализ результатов моделирования

Модель имитационно воспроизводит ключевые эффекты обледенения. Теплопередача: теплоизолирующий слой «Корунд» заметно замедляет охлаждение

верхней части провода, позволяя ей дольше оставаться выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Гидродинамика каплей и турбулентность: капли дождевой воды под воздействием порывистого ветра (средняя скорость $\approx 5\text{ м/с}$ флуктуациями $\pm 20\%$) хаотично движутся по поверхности. Гидрофобное покрытие и рельеф заставляют воду стекать в канавки, а турбулентность усиливает отрыв каплей. Фазовый переход: основная масса льда образуется в нижних канавках рельефа, где скопилась вода и происходит ее замерзание. На верхних выступах лед практически не задерживается благодаря срыву капель ветром. На рис. 1–3 2D-срезы температуры по срезу Z при температуре окружающей среды $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$; $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ градусов. На рис. 4 показано наращивание жидкой и замерзшей воды.

3D-графики распределения толщины льда показывают, что обледенение сосредоточено в канавках и имеет меньшее влияние на токоприемник (рис. 5–7). Рис. 5–7 демонстрируют наращивание льда на поверхность провода за 1 час. Выполненные расчеты и визуализации позволили получить следующую картину поведения контактного провода при различных температурах окружающей среды ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$).

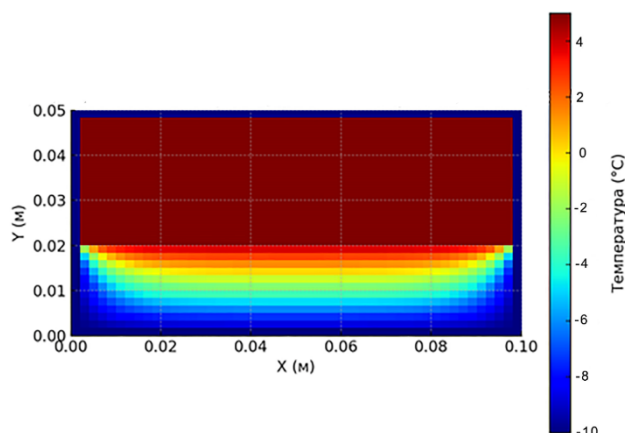


Рис. 1. Распределение температуры при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ окружающей среды

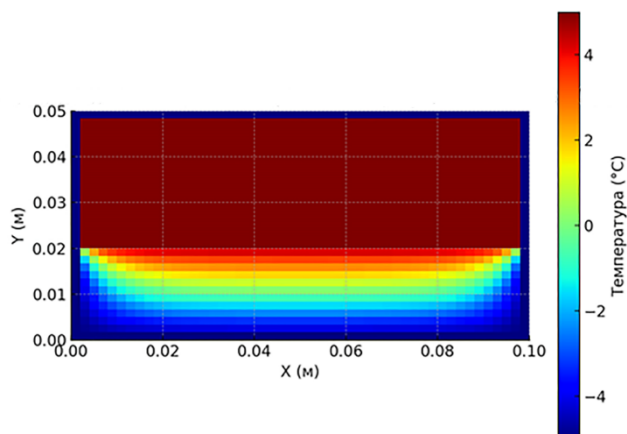


Рис. 2. Распределение температуры при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ окружающей среды

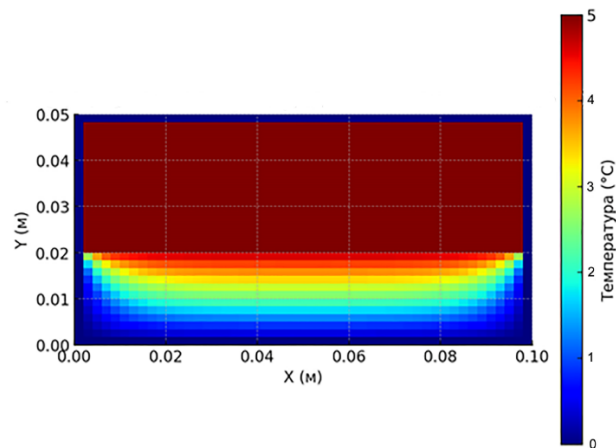


Рис. 3. Распределение температуры при 0°C окружающей среды

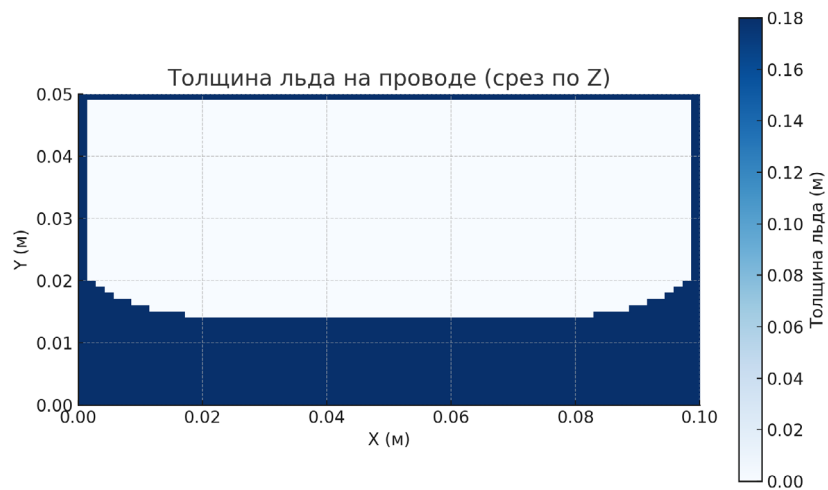


Рис. 4. Распределение толщины льда на проводе

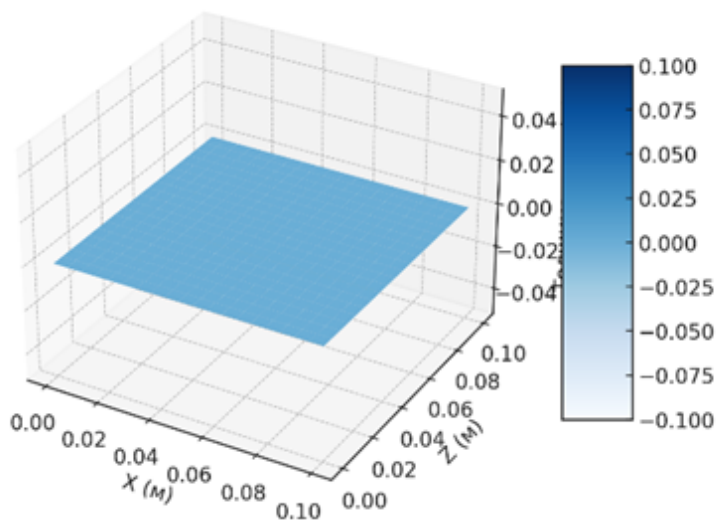


Рис. 5. Нарастивание льда при 0°C (неявная схема)

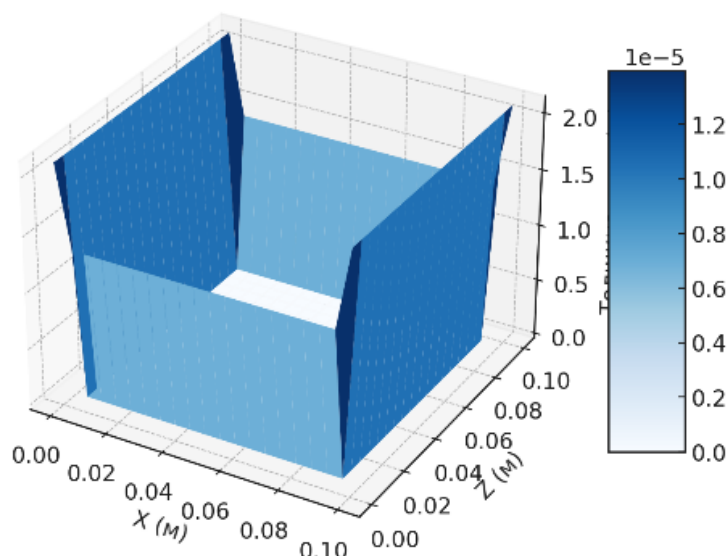


Рис. 6. Нарастивание льда при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (неявная схема)

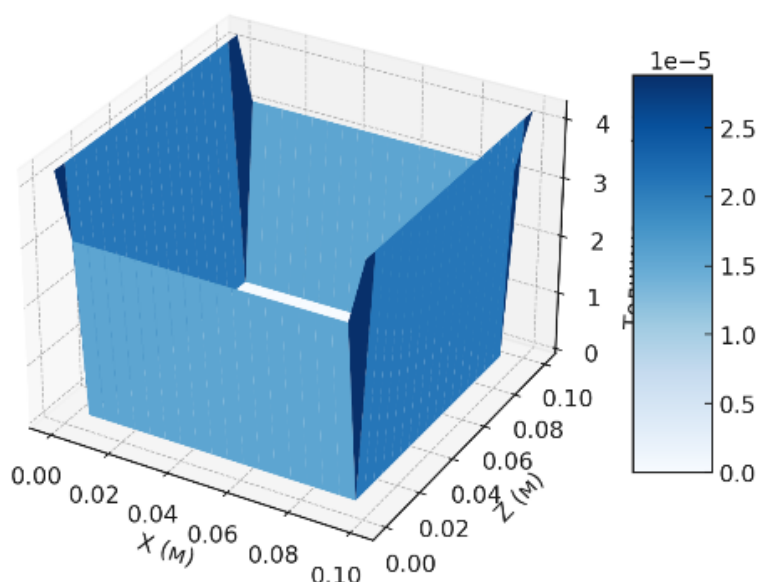


Рис. 7. Нарастивание льда при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (неявная схема)

Распределение температуры:

- Верхняя поверхность и выступающие участки провода остаются теплее дольше благодаря применению теплоизоляционного покрытия, что замедляет образование льда на этих участках.
- В углублениях рельефной поверхности температура быстрее снижается ниже точки замерзания, ускоряя начало замерзания и концентрацию льда именно там.

Нарастивание льда:

- В результате моделирования подтверждено, что основное образование льда происходит в нижних участках поверхности (канавках), что согласуется с ожидаемым поведением, описанным в патенте RU 2827574.

– Чем ниже температура окружающей среды, тем более выражено нарастание льда, особенно в нижних зонах рельефа провода. Это отражает влияние физико-химических и геометрических факторов, указанных в патенте.

Поверхность $X—Z$ с наращиванием льда (3D-графики):

– Полученные 3D-графики поверхности провода при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ наглядно демонстрируют ключевой принцип патента: направленное формирование ледяных отложений преимущественно в канавках.

– Верхние и выступающие части поверхности проводника остаются относительно свободными от ледяных отложений, так как капли воды и формирующийся лед эффективно перемещаются вниз благодаря гравитации и гидрофобному покрытию, подтверждая заявленный эффект «самоочищения».

Соответствие патенту RU 2827574:

Проведенное моделирование и полученные результаты полностью соответствуют физико-химическому методу защиты, описанному в патенте RU 2827574, а именно:

– рельефная поверхность: подтверждено, что рельеф способствует концентрации влаги в нижних зонах поверхности, что облегчает последующее удаление льда;

– теплоизоляционное покрытие: результаты показывают, что теплоизоляция действительно замедляет охлаждение верхних частей провода, предотвращая раннее обледенение этих зон;

– гидрофобное покрытие: моделирование подтверждает, что гидрофобное покрытие эффективно способствует стеканию капель воды вниз, предотвращая формирование устойчивого ледяного слоя на выступах и верхней части провода.

Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают работоспособность и эффективность физико-химического метода защиты контактного провода, изложенного в патенте RU 2827574, что демонстрируется высокой степенью соответствия моделируемых данных теоретическим ожиданиям и описанным принципам.

Выводы

Модель показала хорошие результаты, которые доказывают правильность предложенных в патенте решений. Сконцентрировав лед в удобных для очистки местах и сведя к минимуму его накопление на важных участках провода, предложенный метод демонстрирует значительную практическую полезность.

Научная новизна и практическая значимость

Предложенная имитационная модель впервые объединяет в одном расчете теплопередачу, фазовый переход, гидродинамику капель и турбулентность для задачи обледенения проводов. Ранее эти аспекты рассматривались

разрозненно — например, только теплопроводность или только аэродинамика капель. Комплексный подход позволил учесть их взаимное влияние. Кроме того, модель учитывает реальную рельефную геометрию провода с многослойными покрытиями, что отражает запатентованное решение и отличается от упрощенных плоских моделей в литературе.

Разработанная модель служит инструментом виртуального тестирования антиобледенительных решений для контактных проводов. Она позволяет варьировать параметры (глубину рельефа, толщину и свойства покрытий, характеристики ветра) и прогнозировать зоны и интенсивность обледенения. Это дает возможность оптимизировать конструкцию проводов без дорогостоящих полевых испытаний. Кроме того, результаты моделирования могут помочь в разработке рекомендаций по размещению датчиков обледенения и регламенту обслуживания. Модель демонстрирует потенциал пассивных методов защиты от льда, снижая необходимость в энергозатратном подогреве или механическом очищении. В дальнейшем планируется расширить модель за счет учета нелинейных эффектов теплоотдачи и применения более точных моделей турбулентности для уточнения картины воздушного потока.

Заключение

Проведенное имитационное моделирование подтвердило эффективность комплекса мер, предложенных в патенте RU 2827574. Рельефная поверхность, теплоизоляционное и гидрофобное покрытия в сочетании с турбулентным срывом капель существенно минимизируют обледенение верхней части провода, локализуя лед в канавках рельефа, откуда его легче удалить. Такой пассивный метод защиты перспективен для применения в контактных сетях железных дорог и линиях электропередачи. Обледенение проводов — одна из наиболее опасных причин аварий в энергосистемах. Отложения льда приводят к резкому возрастанию нагрузки: масса проводов может увеличиваться в несколько раз (в 4–5 раз), что вызывает обрывы и повреждения опор [13, 14]. Разработка и внедрение пассивных антиобледенительных технологий, подобных рассмотренной, позволят повысить надежность инфраструктуры и снизить затраты на ее обслуживание в зимний период.

Список источников

1. Патент № 2827574 Российская Федерация, С-1 РФ, МПК 01В 5/2. Контактный провод с антиобледенительным покрытием для воздушных линий электропередач / В. П. Бубнов, В. А. Бараусов, В. И. Моисеев; заявл. № 2024106114 от 05.03.2024; Бюл. 28.

2. Толстых В. К. Математическое и численное моделирование нестационарных течений с фазовыми переходами в противоточных теплообменных аппаратах / В. К. Толстых, К. А. Пшеничный // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. — 2023. — № 16(2).
3. Симонов О. А. Численное моделирование фазового перехода «вода — лед» в высокопроницаемых водонасыщенных пористых средах / О. А. Симонов, Л. Н. Филимонова // Вестн. Тюменского гос. ун-та. Нефть, газ, энергетика. — 2023. — № 9(1). — С. 22–38.
4. Pakhomov M. A. Modeling of turbulent heat-transfer augmentation in gas-droplet flow / M. A. Pakhomov, V. I. Terekhov // Energies. — 2022. — № 15(16). — P. 5861.
5. Druzhinin O. A. The study of momentum, mass, and heat transfer in a droplet-laden turbulent airflow over a waved water surface by DNS / O. A. Druzhinin, Yu. I. Troitskaya, S. S. Zilitinkevich // J. Phys. Oceanogr. — 2022. — № 52(3).
6. Сорокин К. Э. Численное моделирование обледенения в программном комплексе FlowVision / Сорокин К. Э. и др. // Компьютерные исследования и моделирование. — 2020. — № 12(1). С. 83–96.
7. Калюлин С. Л. Численное моделирование обледенения при вибрациях аэродинамического профиля / С. Л. Калюлин, В. Я. Модорский // Вестн. ПНИПУ. Аэрокосм. техника. — 2023. — № 72. — С. 100–112.
8. Тальский А. Изучено влияние гидрофобных покрытий на обледенение самолетов / А. Тальский // 21mm.ru. — 20 декабря 2021.
9. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. — М.: Наука, 1977.
10. Хасанов М. Математическое моделирование нестационарного конвективного охлаждения многослойных тел при аддитивном производстве изделий / М. Хасанов и др. // Инж. вестн. Дона. — 2022. — № 7.
11. Садыков Т. Н. Использование Python для численного решения задач теплопроводности и визуализации результатов / Т. Н. Садыков, В. А. Галкин, Д. А. Моргун // Успехи кибернетики. — 2023. — № 4(3).
12. Балашов В. А. Прямое численное моделирование течений жидкости в поровом пространстве: дисс. ... канд. физ.-мат. наук / В. А. Балашов. — МФТИ, 2021.
13. ElectricalSchool — Образование гололеда и изморози на проводах ЛЭП и борьба с ними. — 2019.
14. Фурсанов М. И. Гололедные аварии на ЛЭП — причины появления и способы предотвращения / М. И. Фурсанов, А. А. Фарино, П. С. Горудько // Энергохозяйство предприятий. — 2017. — № 2(95). — С. 26–29.

Дата поступления: 27.04.2025

Решение о публикации: 28.05.2025

Контактная информация:

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

БУБНОВ Владимир Петрович — д-р техн. наук, проф.; bubnov1950@yandex.ru

МОИСЕЕВ Владимир Иванович — д-р техн. наук, проф.; moiseev_v_i@list.ru

Simulation Model of a Physical-Chemical Method for Protecting Contact Wires Against Icing

V. A. Barausov¹, V. P. Bubnov², V. I. Moiseev²

¹ООО “GC IMSAT”, 7, Grazhdanskaya str., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

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

For citation: Barausov V. A., Bubnov V. P., Moiseev V. I. Simulation Model of a Physical-Chemical Method for Protecting Contact Wires Against Icing. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 107–119. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-107-119

Summary

Purpose: To confirm the operability of a passive physical-chemical method for protection of a contact wire against icing. **Methods:** The implementation of the simulation model was conducted within the Python software environment. The model integrates the fundamental physical processes, including heat transfer (temperature distribution in the wire and coating layers), phase transition (freezing of water, taking into account latent heat), hydrodynamics of droplets (movement of water under the action of gravity, surface tension, and wind) and turbulence (random wind fluctuations affecting the trajectories of droplets). **Results:** The simulation model developed takes into account heat transfer, water phase transition, droplet hydrodynamics, and wind turbulence on the relief surface of a contact wire with heat-insulating and hydrophobic coatings. Numerical calculations performed using the explicit finite difference method with the Laplacian operator have shown that ice is predominantly formed in the lower grooves of the relief, and turbulence enhances droplet shedding, minimizing icing of the upper part. The model has confirmed the operability of a method for increasing the anti-icing efficiency of a contact network conductor, providing passive protection and ice removal. **Practical significance:** The model enables the variation of parameters (relief depth, coating thickness and properties, wind characteristics) and the prediction of icing zones and intensity without the necessity for expensive full-scale experiments.

Keywords: Contact wire, icing, heat transfer, phase transition, relief surface, hydrophobic coating, droplet hydrodynamics, turbulence, simulation modelling, finite difference method.

References

1. Bubnov V. P., Barausov V. A., Moiseev V. I. *Kontaktnyy provod s antiobledenitel'nyim pokrytiem dlya vozdushnykh liniy elektroperedach* [Contact wire with anti-icing coating for overhead power lines]. Patent RF, no. 2827574, 2024. (In Russian)
2. Tolstykh V. K., Pshenichnyy K. A. Matematicheskoe i chislennoe modelirovanie nestatsionarnykh techeniy s fazovymi perekhodami v protivotochnykh teploobmennyykh apparatakh [Mathematical and numerical modeling of unsteady flows with phase transitions in counter-current heat exchangers]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye* [Bulletin of SUSU. Series: Mathematical modeling and programming]. 2023, Iss. 16(2). (In Russian)
3. Simonov O. A., Filimonova L. N. Chislennoe modelirovanie fazovogo perekhoda “voda — led” v vysokopronitsaemykh vodonasyshchennykh poristyykh sredakh [Numerical modeling of the water-ice phase transition in highly permeable water-saturated porous media]. *Vestn. Tyumenskogo gos. un-ta. Neft', gaz, energetika* [Bulletin of the Tyumen State University. Oil, Gas, Energy]. 2023, Iss. 9(1), pp. 22–38. (In Russian)

4. Pakhomov M. A., Terekhov V. I. Modeling of turbulent heat-transfer augmentation in gas-droplet flow. *Energies*, 2022, Iss. 15(16), p. 5861.
5. Druzhinin O. A., Troitskaya Yu. I., Zilitinkevich S. S. The study of momentum, mass, and heat transfer in a droplet-laden turbulent airflow over a waved water surface by DNS. *J. Phys. Oceanogr*, 2022, Iss. 52(3).
6. Sorokin K. E. et al. Chislennoe modelirovanie obledeneniya v programmnom komplekse FlowVision [Numerical modeling of icing in the FlowVision software package]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and modeling]. 2020, Iss. 12(1), pp. 83–96. (In Russian)
7. Kalyulin S. L., Modorskiy V. Ya. Chislennoe modelirovanie obledeneniya pri vibratsiyakh aerodinamicheskogo profilya [Numerical modeling of icing with airfoil vibrations]. *Vestn. PNIPU. Aerokosm. tekhnika* [Vestn. PNRPU. Aerospace engineering]. 2023, Iss. 72, pp. 100–112. (In Russian)
8. Tal'skiy A. *Izucheno vliyanie gidrofobnykh pokrytiy na obledenenie samoletov* [The effect of hydrophobic coatings on aircraft icing was studied]. 21mm.ru, December 20, 2021. (In Russian)
9. Samarskiy A. A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference schemes]. Moscow: Nauka Publ., 1977. (In Russian)
10. Khasanov M. et al. Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnogo konvektivnogo okhlazhdeniya mnogosloynnykh tel pri additivnom proizvodstve izdeliy [Mathematical modeling of non-stationary convective cooling of multilayer bodies in additive manufacturing of products]. *Inzh. vestn. Dona* [Eng. vestn. Don]. 2022, Iss. 7. (In Russian)
11. Sadykov T. N., Galkin V. A., Morgun D. A. Ispol'zovanie Python dlya chislennogo resheniya zadach teploprovodnosti i vizualizatsii rezul'tatov [Using Python for numerical solution of heat conductivity problems and visualization of results]. *Uspekhi kibernetiki* [Advances in Cybernetics]. 2023, Iss. 4(3). (In Russian)
12. Balashov V. A. *Pryamoe chislennoe modelirovanie techeniy zhidkosti v porovom prostranstve: diss. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Direct numerical modeling of fluid flows in pore space: diss. ... Cand. of Physical and Mathematical Sciences]. MFTI, 2021. (In Russian)
13. *ElectricalSchool — Obrazovanie gololeda i izmorozhi na provodakh LEP i bor'ba s nimi* [ElectricalSchool — Formation of ice and frost on power transmission line wires and their control]. 2019. (In Russian)
14. Fursanov M. I., Farino A. A., Gorud'ko P. S. Gololednye avarii na LEP — prichiny poyavleniya i sposoby predotvrashcheniya [Ice accidents on power transmission lines — causes of occurrence and methods of prevention]. *Energokhozyaystvo predpriyatiy* [Energy industry of enterprises]. 2017, Iss. 2(95), pp. 26–29. (In Russian)

Received: April 27, 2025

Accepted: May 28, 2025

Author's information:

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

Vladimir P. BUBNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; bubnov1950@yandex.ru

Vladimir I. MOISEEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; moiseev_v_i@list.ru

УДК 625.1

Влияние природно-климатических условий на работу железнодорожного транспорта на примере Северной железной дороги

О. В. Быкова

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

Для цитирования: Быкова О. В. Влияние природно-климатических условий на работу железнодорожного транспорта на примере Северной железной дороги // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 120–132. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-120-132

Аннотация

Цель: Изучить воздействие природно-климатических факторов на инфраструктуру железных дорог, проанализировав случаи отказов технических средств на примере подразделений Северной железной дороги (СЖД). На основе полученных данных разработать комплекс мер для повышения надежности объектов железнодорожной инфраструктуры в регионах с суровыми климатическими условиями.

Методы: Проведен анализ отказов в работе технических средств, приведших к задержке поездов, с использованием данных из Комплексной автоматизированной системы учета, контроля устранения отказов и анализа надежности (КАС АНТ). **Результаты:** Выделены основные службы СЖД, ответственные за отказы, приводящие к задержкам поездов. Проведена оценка отказов в работе технических средств с подразделением по регионам Северной железной дороги. Сформирован классификатор отказов по типу объекта отказа, по характеру отказа, по последствиям и по причинам возникновения. Установлена связь между отказами и природно-климатическими факторами. Определены ключевые причины отказов в работе подразделений. **Практическая значимость:** Доказано прямое влияние климатических условий на частоту отказов технических средств железнодорожной инфраструктуры на определенных участках железнодорожного транспорта. Определены приоритетные направления для разработки комплексных мер, направленных на повышение эксплуатационной надежности объектов железнодорожного транспорта в сложных климатических зонах.

Ключевые слова: Транспортная система, природно-климатические условия, отказы в работе технических средств, надежность транспортных систем, классификация отказов.

Транспортная система в России имеет огромное значение для экономики, социальной жизни и геополитической стабильности страны. Транспортная система обеспечивает эффективную логистику для перемещения товаров по стране и за ее пределами. Это особенно важно для таких сырьевых отраслей, как энергетика, сельское хозяйство и добыча полезных ископаемых. Развитие транспортной инфраструктуры привлекает инвестиции, создает рабочие места и способствует развитию смежных отраслей, таких как строительство и производство. Транспортная система обеспечивает доступ к удаленным регионам, улучшая качество жизни населения и способствуя развитию местной экономики. Разнообразные виды транспорта (автомобильный, железнодорожный, авиационный)

обеспечивают мобильность граждан, позволяя им легко перемещаться между городами и регионами. Транспортная система в России является важнейшим элементом, который влияет на экономическое развитие, социальное благополучие и национальную безопасность. Ее эффективное функционирование необходимо для достижения устойчивого роста и повышения конкурентоспособности страны на международной арене [1].

Железнодорожный транспорт имеет огромное значение для экономики и социальной сферы России. Он служит основным способом перевозки грузов, особенно тяжелых и габаритных. По сравнению с автомобильными перевозками железная дорога предлагает более выгодные тарифы на дальние расстояния. Железнодорожная сеть соединяет даже самые отдаленные и труднодоступные регионы, способствуя их экономическому росту и объединению. Это особенно важно для жителей сельских районов, чья работа зависит от надежного транспортного сообщения. Развитие железных дорог требует серьезных вложений в инфраструктуру, что создает рабочие места и стимулирует смежные отрасли. Внедрение современных технологий повышает эффективность и безопасность перевозок. Таким образом, железные дороги в России — это не просто часть транспортной системы, а важный фактор экономического и социального прогресса.

Стабильная и безопасная работа столь сложного многоотраслевого комплекса возможна только при согласованных действиях всех его элементов. Надежность транспорта — одна из ключевых современных проблем, и она касается не только технической стороны. На нее также влияют условия пропуска поездов и закономерности транспортных потоков [2].

Под **отказом** на железнодорожном транспорте понимается выход из строя устройства и неспособность выполнять свои функциональные назначения частично или полностью. Каждый случай отказа в работе технического средства подлежит служебному расследованию подразделениями причастных служб, которые несут ответственность за его техническое содержание, с привлечением (при необходимости) работников других подразделений. Учет возникающих отказов, контроль их устранения и расследование регламентируются распоряжением ОАО «РЖД» № 1375р от 11 июля 2016 г. и осуществляются с использованием Комплексной автоматизированной системы учета, контроля устранения отказов в работе технических средств и анализа их надежности (КАС АНТ). В ходе расследования устанавливаются виновное лицо (подразделение) и причина отказа в работе технического средства.

На железнодорожном транспорте отказы могут возникать в различных системах и элементах инфраструктуры, подвижного состава и управления. Их классифицируют по нескольким критериям [3]. Классификация отказов представлена в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Классификация отказов

По типу объекта отказа		
А. Инфраструктура (путевое хозяйство, устройства СЦБ и др.)	Б. Подвижной состав (локомотивы, вагоны)	В. Системы управления и связи
Дефекты рельсового пути:	Механические отказы:	Сбои в диспетчерской централизации
Изломы рельсов, трещины, износ	Поломки буксовых узлов, колесных пар	Отказы систем связи
Проседание балласта, размывы пути	Трещины в раме, кузове	Ошибки в программном обеспечении
Деформации стрелочных переводов	Неисправности автосцепки	
Отказы устройств СЦБ (сигнализации, централизации, блокировки):	Электрические и электронные отказы:	
Неисправности рельсовых цепей	Выход из строя тяговых двигателей	
Отказы светофоров, датчиков, контроллеров	Отказы систем управления (на современных локомотивах)	
Сбои в системе АЛС (автоблокировки)	Проблемы с аккумуляторами, генераторами	
Повреждения контактной сети (для электрифицированных линий):	Пневматические отказы:	
Обрывы проводов	Утечки в тормозной системе	
Отказы изоляторов	Неисправности компрессоров	
Короткие замыкания		
По характеру отказа	По последствиям	По причинам возникновения
Внезапные (аварийные) — обрыв рельса, отказ тормозов, короткое замыкание	Легкие — не влияют на движение (отказ одного из резервных датчиков)	Конструктивным отказом является отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушениями установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования
Постепенные (износные) — такие как износ рельсов, коррозия металла, старение изоляции	Средние — отказы, требующие снижения скорости или временного ограничения движения	Производственным отказом является отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии
Периодические (планово-предупредительные) — отказы, выявляемые при техническом обслуживании	Критические — отказы, которые приводят к остановке движения, авариям, крушениям	Эксплуатационным отказом является отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации
		Внешний отказ — это отказ, возникший в результате стихийных бедствий, порчи, кражи, вандализма, умышленных или неправильных действий организаций, не входящих в состав ОАО «РЖД», или лиц, не являющихся работниками ОАО «РЖД»
		Деградационным отказом является отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации

В соответствии с поставленными задачами исследования был проведен анализ отказов в работе технических средств за 11 лет по регионам Северной железной дороги (СЖД).

СЖД протянулась из центральной части России на север, проходя через Ярославль и Вологду. В районе Коноши она разветвляется: одна ветка ведет к Архангельску, а другая — к Котласу. От Котласа путь продолжается через всю Республику Коми, заходя за Северный полярный круг. В структуру СЖД входят пять региональных отделений: Ярославское, Вологодское, Архангельское, Сольвычегодское и Сосногорское.

Результаты анализа отказов в работе технических средств по регионам Северной железной дороги представлены на рис. 1.

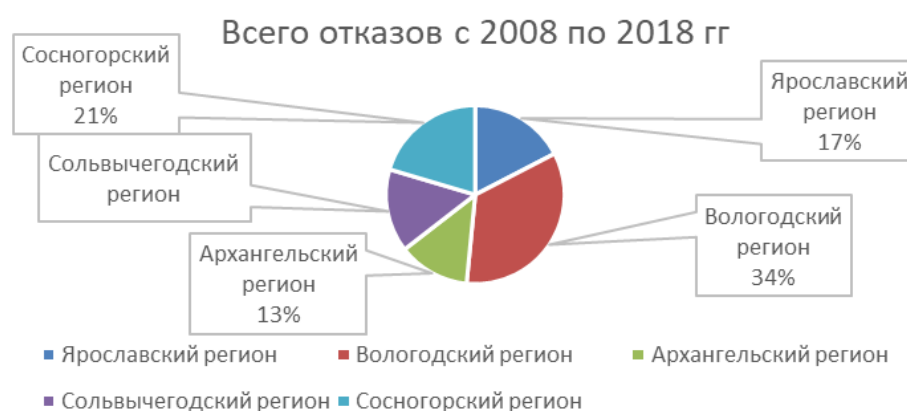


Рис. 1. Диаграмма процентного соотношения отказов в работе технических средств по регионам Северной железной дороги за 11 лет

Как видно из диаграммы, наибольшее количество отказов в работе технических средств приходится на Вологодский и Сосногорский регионы СЖД.

Территория Вологодской и Костромской областей, а также части Ярославской и Кировской областей обслуживается Вологодским территориальным управлением СЖД. Развернутая длина главных путей — около 2 тысяч километров, все они электрифицированы. На станциях Вологодского региона осуществляется около трети всей погрузки СЖД, в основном это черные металлы, минеральные удобрения и стройматериалы. Здесь расположены крупнейшие промышленные предприятия Северо-Запада России — металлургический гигант ПАО «Северсталь» и лидер по производству удобрений АО «Апатит».

Сосногорский регион является самым северным регионом дороги и обслуживает большую часть Республики Коми и небольшую территорию Ямало-Ненецкого автономного округа. Длина путей составляет более 2 тысяч километров, из них около 400 — за Полярным кругом. Железнодорожный транспорт играет ключевую социальную роль в Республике Коми, зачастую оставаясь единственным доступным видом транспорта.

На рис. 2 и 3 показан анализ отказов по Вологодскому и Сосногорскому регионам СЖД в зависимости от причин возникновения отказов.

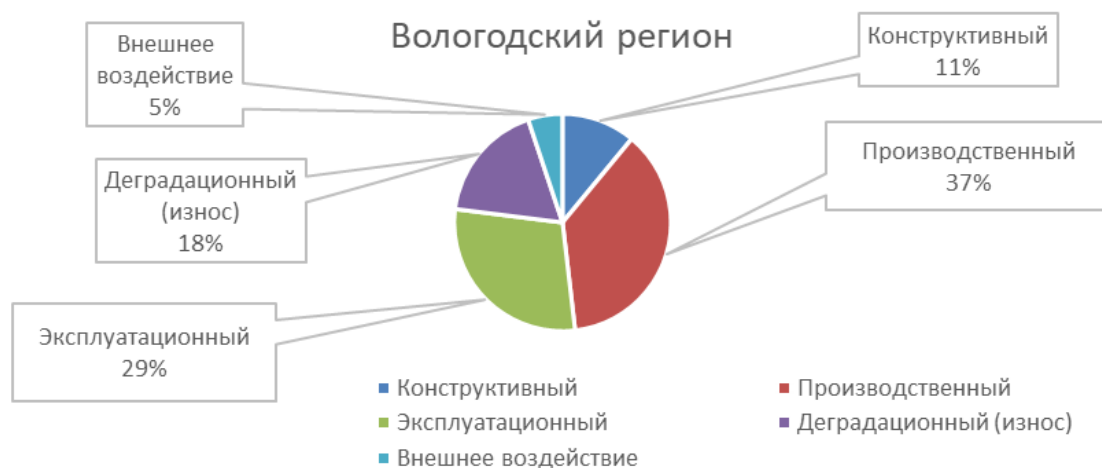


Рис. 2. Диаграмма процентного соотношения отказов по причинам их возникновения по Вологодскому региону СЖД

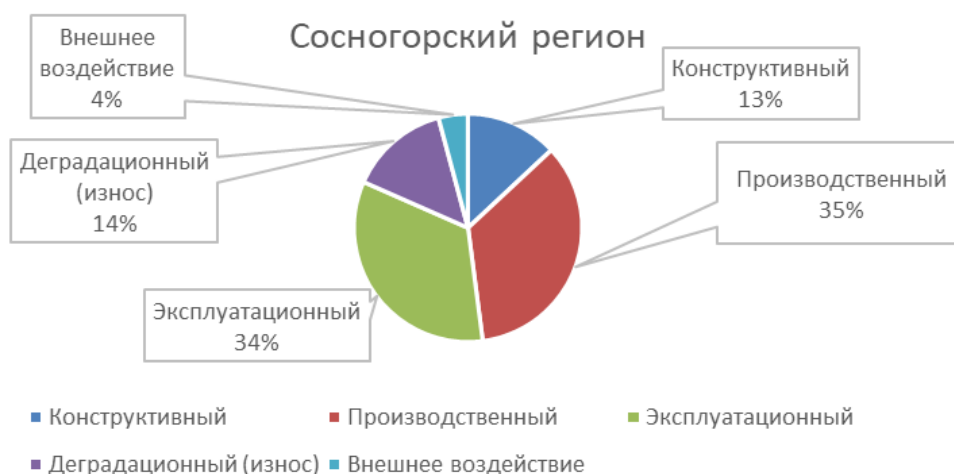


Рис. 3. Диаграмма процентного соотношения отказов по причинам их возникновения по Сосногорскому региону СЖД

На рис. 4 мы видим, что 72 % внешних отказов происходит из-за влияния погодных условий.

Далее проведем анализ внешних отказов по регионам Северной железной дороги (рис. 5)

Как видно из диаграммы, в Сосногорском, Сольвычегодском и Вологодском регионах особо выражено влияние погодных условий, последствием которых являются отказы технических средств.

Рассмотрим более подробно природно-климатические условия данных регионов (табл. 2).

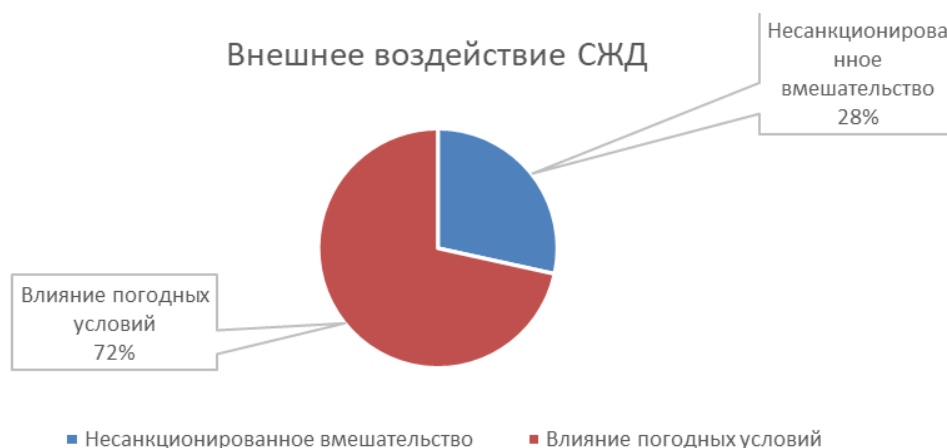


Рис. 4. Диаграмма процентного соотношения внешних отказов по причинам их возникновения на СЖД

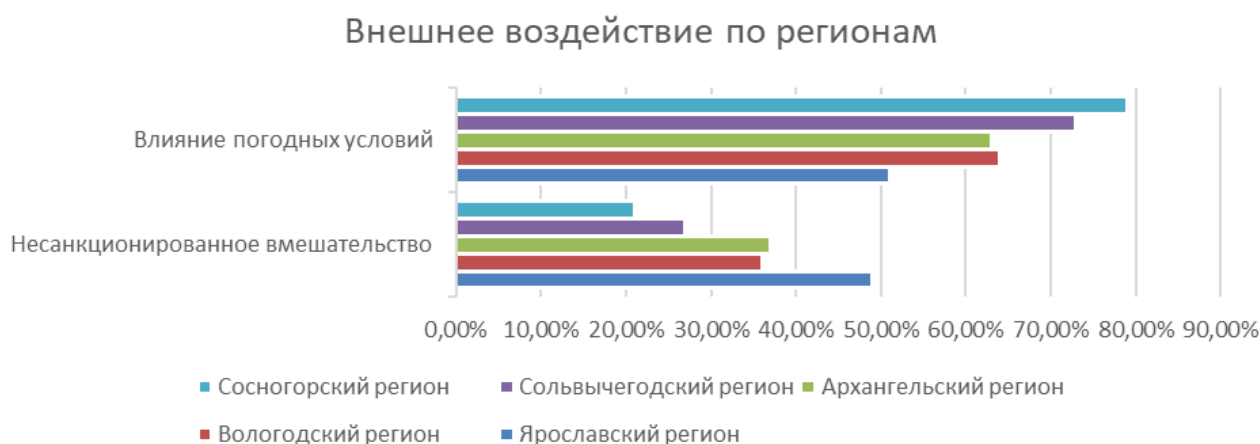


Рис. 5. Диаграмма распределения внешних отказов по причинам их возникновения по регионам СЖД

Основными природными рисками внешнего влияния на возникновение отказов технических средств железнодорожного транспорта в данных регионах являются:

1. Климатические: низкие зимние температуры / экстремально низкие температуры зимой; высокая влажность; короткий период для строительно-ремонтных работ; значительные годовые перепады температур.
2. Геоморфологические: заболоченность территорий; слабые грунты; эрозийные процессы; сложности с устойчивостью земляного полотна; мерзлотные процессы.
3. Гидрологические: весенние паводки; подтопления; размывы насыпей [4].

Далее рассмотрим анализ распределения отказов по причастным службам в данных регионах (рис. 6–8).

ТАБЛИЦА 2. Характеристика природно-климатических условий регионов СЖД

	Вологодский регион	Сосногорский регион	Сольвычегодский регион
Климатические условия	Климат: умеренно-континентальный, с продолжительной зимой и коротким теплым летом. • Среднегодовая температура: +2...+4 °С. • Зимние температуры (январь): -10...-15 °С (минимум до -35...-40 °С). • Летние температуры (июль): +17...+20 °С (максимум до +30...+35 °С). • Продолжительность зимы: 5–6 месяцев (ноябрь — март). • Весна и осень: затяжные, с частыми перепадами температур	Климат: умеренно-континентальный с переходом к субарктическому (на севере региона), с продолжительной холодной зимой и коротким прохладным летом. • Среднегодовая температура: -2...+1 °С. • Зимние температуры (январь): -18...-22 °С (абсолютный минимум до -50 °С). • Летние температуры (июль): +14...+17 °С (максимум до +30...+33 °С). • Продолжительность зимы: 6–7 месяцев (октябрь — апрель). • Безморозный период: 80–100 дней	Климат: умеренно-континентальный с продолжительной зимой и коротким теплым летом. Среднегодовая температура: +0,5...+1,5 °С. • Зимние температуры (январь): -14...-18 °С (абс. минимум до -45 °С). • Летние температуры (июль): +16...+18 °С (абс. максимум до +35 °С). • Продолжительность зимы: 5,5–6 месяцев (конец октября — начало апреля) Безморозный период: 90–110 дней
Рельеф местности	• Преобладает равнинный рельеф (Восточно-Европейская равнина). • Холмистые участки (север и запад области — Андомская возвышенность, Вепсовская возвышенность). • Заболоченные низменности (Молого-Шекнинская низина). Карстовые формы рельефа (в районах с известняками)	Расположен на восточной окраине Восточно-Европейской равнины. Северная часть — Печорская низменность (высоты 50–100 м). Южная часть — отроги Тиманского кряжа (до 300–350 м). Характерны заболоченные территории (до 30 % площади). Развиты мерзлотные формы рельефа (булгури, пучения, термокарсты)	• Расположен в пределах Вычегодской низменности (преобладающие высоты 80–150 м). • Местность слабоволнистая с общим уклоном к северу. • Характерны: ○ заболоченные междуречья (до 25–30 % территории); ○ озерно-ледниковые равнины; ○ дюнные всхолмления вдоль речных долин; • отдельные возвышенности до 200–250 м (красные образования Тиманского кряжа)
Гидрография	Основные водные объекты: крупные реки: Сухона, Юг, Молога, Шексна, Вологда; озера: Кубенское, Белое, Воже; водохранилища: Рыбинское (на границе с Ярославской обл.)	Основные водные объекты: крупные реки: Печора, Ижма, Ухта, Вой-Вож; притоки: многочисленные малые реки и ручьи; болота: занимают значительные площади; озера: преимущественно пойменные и термокарстовые	Основные водные объекты: главная река: Вычегда (судоходна на большей части протяжения); крупные притоки: Виледь, Яренга, Вымь; озера: преимущественно пойменные и ледникового происхождения болота: низинные и переходные, занимают до 30 % территории
Осадки и снежный покров	Годовое количество осадков: 600–700 мм. Максимум осадков: лето (дожди) и зима (снегопады). Высота снежного покрова (зимой): 40–60 см (в лесах до 70–100 см). Снегозаносимость: высокая, особенно на открытых участках	Годовое количество осадков: 550–650 мм. Максимум осадков: июль — август (дожди) и октябрь — декабрь (снег). Высота снежного покрова: 60–80 см (в лесах до 100–120 см). Продолжительность залегания снега: 180–200 дней Снегозаносимость: очень высокая	Годовое количество осадков: 550–650 мм. Максимум: июль — сентябрь (дожди) и ноябрь — январь (снег). Высота снежного покрова: 50–70 см (в лесах до 90–100 см). Продолжительность залегания снега: 160–180 дней. Снегозаносимость: высокая, особенно на открытых участках

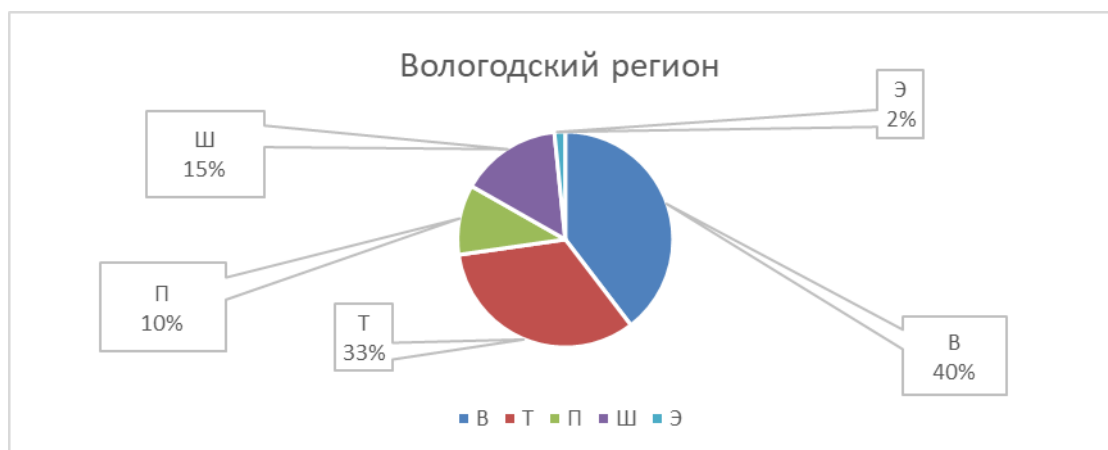


Рис. 6. Диаграмма распределения отказов по причастным службам на Вологодском регионе СЖД

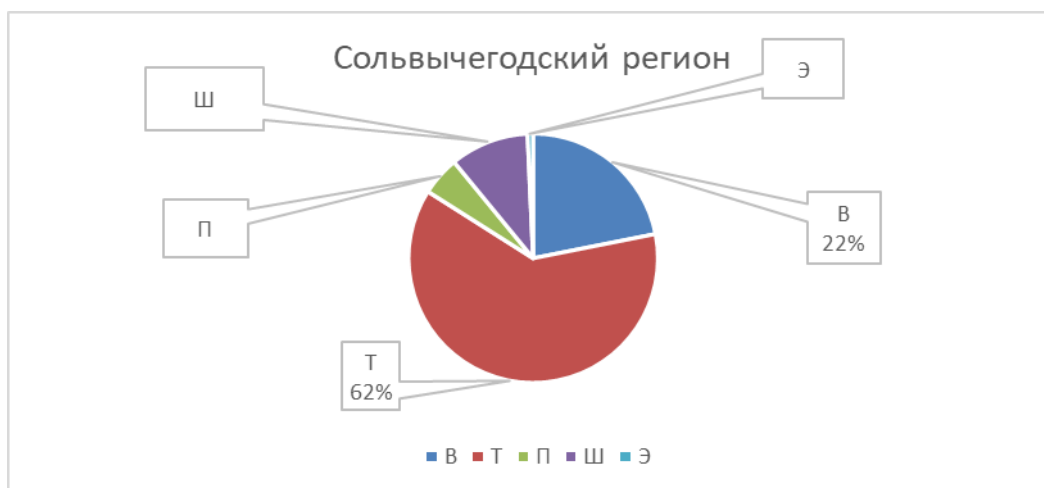


Рис. 7. Диаграмма распределения отказов по причастным службам на Сольвычегодском регионе СЖД

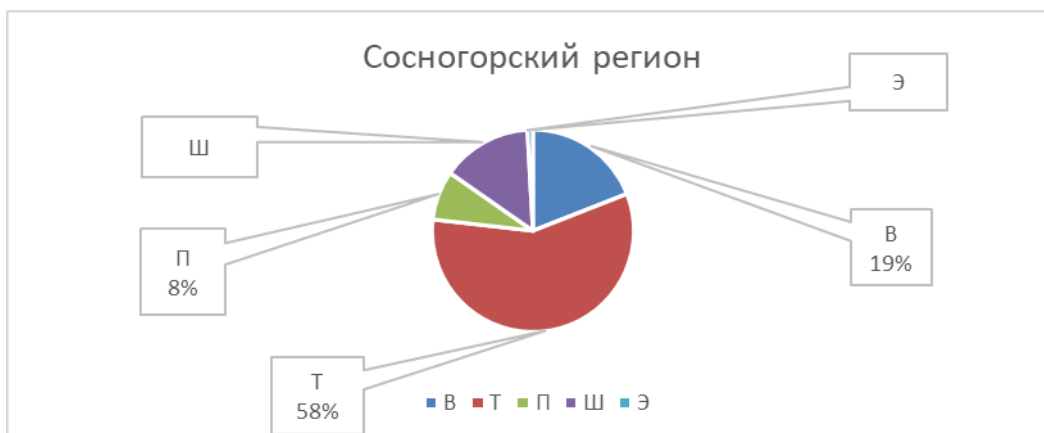


Рис. 8. Диаграмма распределения отказов по причастным службам на Сосногорском регионе СЖД

В табл. 3 приведен анализ наиболее массовых причин отказов по причастным службам.

ТАБЛИЦА 3. Распределение отказов по регионам и причастным службам

№ п/п	Наименование вида отказа	Вологодский регион	Сольвычегодский регион	Сосногорский регион
По вине подразделений службы вагонного хозяйства				
1	Прочая неисправность грузового вагона	43,3 %	24,3 %	19,4 %
2	Неисправность ходовой части грузового вагона	42,5 %	54 %	53,3 %
3	Неисправность тормозного оборудования грузового вагона	10,2 %	13,4 %	12,7 %
По вине подразделений службы локомотивного хозяйства				
4	Неисправность локомотива, дизель-поезда, электропоезда	83,5 %	93,4 %	94,6 %
По вине подразделений службы путевого хозяйства				
5	Неисправность пути и рельсовой колеи	57,8 %	56,3 %	70 %
6	Неисправность рельсовых цепей	7 %	21,5 %	12,8 %
7	Неисправность стрелочного перевода	14,6 %	7,6 %	6 %
8	Дефект и излом рельса	6 %	3,3 %	2,2 %
По вине подразделений службы автоматики и телемеханики				
9	Прочие неисправности устройств СЦБ	78,6 %	66,7 %	73,1 %
10	Неисправность светофора	18,9 %	28,4 %	20,6 %

Исходя из приведенного анализа видно, что наибольшее количество отказов приходится на локомотивное и вагонное хозяйство, от 10 до 15 % отказов происходило по вине службы автоматики и телемеханики, от 5 до 10 % отказов — службы пути, 1–2 % отказов возникало по вине службы электроснабжения.

Повышение надежности железнодорожного транспорта напрямую зависит от модернизации подвижного состава и технической инфраструктуры. Ключевыми факторами устойчивой эксплуатации сети являются: соответствие пропускной способности объему перевозок; сбалансированное развитие железнодорожных направлений; рациональная организация работы узлов, станций и депо [5, 6].

Природно-климатические условия выступают как катализатор или непосредственная причина возникновения нештатных ситуаций, что влечет за собой организационно-технологические отказы на железнодорожном транспорте. Эта взаимосвязь проявляется в нескольких ключевых аспектах: влияние на технологические процессы (нарушение графика движения поездов, изменение параметров технического обслуживания); воздействие на инфраструктуру (корректировка нормативов содержания, специфические повреждения); организационные последствия (изменение логистики; кадровая политика); экономические последствия; адаптационные меры.

Следовательно, природно-климатические условия требуют: дополнительных капиталовложений; специальных технологических решений; гибкой системы управления и постоянной модернизации инфраструктуры.

Планирование мероприятий по повышению эксплуатационной надежности при организации движения поездов в регионах со сложными природно-климатическими условиями требует комплексного подхода, сочетающего технические, организационные и технологические решения [7–9].

В табл. 4 приведены ключевые направления комплексного подхода при планировании данных мероприятий.

ТАБЛИЦА 4. Ключевые направления комплексного подхода планирования мероприятий по повышению эксплуатационной надежности

Направление	Пример мероприятия
Адаптация инфраструктуры	Использование морозостойких материалов (рельсы, стрелочные переводы, контактная сеть)
	Усиление дренажных систем для защиты от паводков и размывов
	Применение автоматизированных систем обогрева стрелок и критических узлов
Оптимизация технологических процессов	Внедрение сезонных регламентов эксплуатации (особые режимы зимой, в паводок и т. д.)
	Разработка гибких графиков движения с учетом погодных рисков
	Усиление контроля за состоянием пути (частый мониторинг с помощью датчиков и диагностических поездов)
Совершенствование управления	Создание региональных кризисных центров для оперативного реагирования на ЧС
	Внедрение предиктивной аналитики (прогнозирование отказов на основе данных о погоде и износе оборудования)
	Автоматизация диспетчерского контроля для минимизации человеческого фактора
Подготовка персонала и ресурсов	Специальное обучение для работы в экстремальных условиях
	Формирование мобильных аварийных бригад с повышенной готовностью
	Создание стратегических запасов (запчасти, реагенты, топливо)
Экономическое обоснование	Учет дополнительных эксплуатационных затрат (зимнее содержание, ремонты после стихийных явлений)
	Инвестиции в устойчивые технологии (например, защищенную контактную сеть, умные системы мониторинга)

Выводы

Повышение надежности в сложных условиях возможно только при системном подходе, включающем: проактивные меры (прогнозирование и профилактика), технологическую модернизацию (устойчивые к климату решения), эффективное управление (оптимизация логистики и ресурсов). Внедрение этих мер позволит снизить количество отказов на 30–50 % и обеспечить бесперебойное движение даже в экстремальных условиях.

Список источников

1. Громышова С. С. Эксплуатация устройств многофункционального комплекса технических средств в сложноструктурированных транспортных системах как фактор обеспечения безопасности движения поездов и надежности работы / С. С. Громышова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — Т. 64. — № 4. — С. 167–173. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).167-173.
2. Семина А. Ю. Сущность железнодорожных перевозок и их роль в развитии транспортной системы России / А. Ю. Семина // Молодой ученый. — 2018. — № 1(187). — С. 71–73. — URL: <https://moluch.ru/archive/187/47664/>.
3. Семенов Д. О. Повышение эффективности безопасности и надежности на железнодорожном транспорте / Д. О. Семенов // Транспорт. — 2017. — № 3. — С. 102–104.
4. Кокурин И. М. Методы определения «узких мест», ограничивающих пропускную способность железнодорожных направлений / И. М. Кокурин, В. С. Тимченко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2013. — Вып. 1(34). — С. 15–22.
5. Баранникова С. А. Метрологическое обеспечение на железнодорожном транспорте / С. А. Баранникова, Е. В. Кононенко // Молодой ученый. — 2016. — № 12.3(116.3). — С. 35–40. — URL: <https://moluch.ru/archive/116/31832/>.
6. Родионов А. В. Вопросы обеспечения надежности и безопасности на транспорте / А. В. Родионов // Молодой ученый. — 2016. — № 22.2(126.2). — С. 50–51. — URL: <https://moluch.ru/archive/126/33713/>.
7. Анисимов В. А. Теория и практика проектирования развития региональной сети железных дорог с учетом изменения облика и мощности станций и узлов: дисс. д-ра техн. наук / В. А. Анисимов. — Хабаровск, 2005. — 380 с.
8. Апатцев В. И. Обеспечение безопасности движения поездов на основе снижения влияния человеческого фактора / В. И. Апатцев, А. М. Завьялов, И. Н. Синякина, Ю. В. Завьялова и др. // Наука и техника транспорта. — М.: МИИТ, 2014. — № 2. — С. 75–78.
9. Копытова Ю. В. Методы повышения пропускной способности дорог / Ю. В. Копытова // Молодой ученый. — 2018. — № 5(191). — С. 196–197. — URL: <https://moluch.ru/archive/191/48174/>.

Дата поступления: 29.04.2025

Решение о публикации: 30.05.2025

Контактная информация:

БЫКОВА Ольга Викторовна — аспирант; bykova@sptgt.ru

The Impact of Natural and Climatic Change on the Railway Transport Operation Focusing on the Severnaya (North) Railway

O. V. Bykova

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

For citation: Bykova O. V. The Impact of Natural and Climatic Change on the Railway Transport Operation Focusing on the Severnaya (North) Railway. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 120–132. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-120-132

Summary

Purpose: To investigate the impact of natural and climatic factors on railway infrastructure by conducting a thorough analysis of equipment failures that have occurred at various divisions of the Severnaya Railway (SZHD). To develop a set of measures that will enhance the reliability of railway infrastructure facilities in regions characterized by harsh climates utilizing the data obtained. **Methods:** The analysis of failures in the operation of technical facilities that led to train delays was carried out using data from the CAS ANT automated system (A comprehensive automated system for accounting, fault management control and reliability analysis). **Results:** The Severnaya Railway services responsible for failures leading to train delays have been identified. An assessment of failures in the operation of technical facilities at the regional division of the Severnaya Railway has been carried out. The classification of failures is based on four criteria: the nature of the failure, the type of failure, the consequences and the causes of occurrence. The correlation between failures and natural and climatic factors has been demonstrated. Following a thorough investigation, the primary factors contributing to the malfunction of the equipment have been identified. **Practical significance:** The impact of climatic conditions on the failure rate of railway infrastructure facilities at specific railway transport sections has been demonstrated. A number of key areas have been identified as priorities for the development of comprehensive measures aimed at enhancing the operational reliability of railway transport facilities in challenging climatic regions.

Keywords: Transport system, natural and climatic conditions, failures in the operation of facilities, reliability of transport systems, classification of failures.

References

1. Gromyshova S. S. Ekspluatatsiya ustroystv mnogofunktsional'nogo kompleksa tekhnicheskikh sredstv v slozhnostrukturirovannykh transportnykh sistemakh kak faktor obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov i nadezhnosti raboty [Operation of devices of a multifunctional complex of technical means in complex-structured transport systems as a factor in ensuring the safety of train traffic and reliability of operation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. Systems analysis. Modeling]. 2019, vol. 64, Iss. 4, pp. 167–173. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.4(64).167-173. (In Russian)
2. Semina A. Yu. Sushchnost' zheleznodorozhnykh perevozok i ikh rol' v razvitii transportnoy sistemy Rossii [The essence of railway transportation and its role in the development of the transport system of Russia]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2018, Iss. 1(187), pp. 71–73. Available at: <https://moluch.ru/archive/187/47664/>. (In Russian)

3. Semenov D. O. Povyshenie effektivnosti bezopasnosti i nadezhnosti na zheleznodorozhnom transporte [Improving the efficiency of safety and reliability in railway transport]. *Transport* [Transport]. 2017, Iss. 3, pp. 102–104. (In Russian)
4. Kokurin I. M., Timchenko V. S. Metody opredeleniya “uzkikh mest”, ogranichivayushchikh propusknuyu sposobnost’ zheleznodorozhnykh napravleniy [Methods for identifying “bottlenecks” limiting the capacity of railway routes]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2013, Iss. 1(34), pp. 15–22. (In Russian)
5. Barannikova S. A., Kononenko E. V. Metrologicheskoe obespechenie na zheleznodorozhnom transporte [Metrological support in railway transport]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2016, Iss. 12.3(116.3), pp. 35–40. Available at: <https://moluch.ru/archive/116/31832/>. (In Russian)
6. Rodionov A. V. Voprosy obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti na transporte [Issues of ensuring reliability and safety in transport]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2016, Iss. 22.2(126.2), pp. 50–51. Available at: <https://moluch.ru/archive/126/33713/>. (In Russian)
7. Anisimov V. A. *Teoriya i praktika proektirovaniya razvitiya regional’noy seti zheleznykh dorog s uchetom izmeneniya oblika i moshchnosti stantsiy i uzlov: diss. d-ra tekhn. nauk* [Theory and practice of designing the development of a regional railway network taking into account changes in the appearance and capacity of stations and junctions: diss. doctor of technical sciences]. Khabarovsk, 2005, 380 p. (In Russian)
8. Apattsev V. I., Zav’yalov A. M., Sinyakina I. N., Zav’yalova Yu. V. et al. Obespechenie bezopasnosti dvizheniya poezdov na osnove snizheniya vliyaniya chelovecheskogo faktora [Ensuring the safety of train traffic by reducing the influence of the human factor]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. Moscow: MIIT Publ., 2014, Iss. 2, pp. 75–78. (In Russian)
9. Kopytova Yu. V. Metody povysheniya propusknoy sposobnosti dorog [Methods for increasing road capacity]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2018, Iss. 5(191), pp. 196–197. Available at: <https://moluch.ru/archive/191/48174/>. (In Russian)

Received: April 29, 2025

Accepted: May 30, 2025

Author’s information:

Olga Viktorovna BYKOVA — Postgraduate Student; bykova@sptgt.ru

УДК 629.42-192

Разработка комплекса диагностирования подвижного состава электродепо метрополитена с применением тепловизионных и электронных средств

М. С. Васильевская, А. Е. Цаплин

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

Для цитирования: Васильевская М. С., Цаплин А. Е. Разработка комплекса диагностирования подвижного состава электродепо метрополитена с применением тепловизионных и электронных средств // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 133–144. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-133-144

Аннотация

Цель: Разработать концепцию комплекса диагностирования подвижного состава электродепо метрополитена с применением тепловизионных и электронных средств; рассмотреть вопрос о необходимости внедрения современных методов неразрушающего контроля, таких как тепловизионный контроль и технологии искусственного интеллекта (ИИ), для диагностики подвижного состава метрополитена; показать преимущества этих методов по сравнению с традиционными подходами, а также обосновать их применение для повышения безопасности и эффективности эксплуатации подвижного состава. **Методы:** Анализ существующих методов неразрушающего контроля (магнитопорошковый, ультразвуковой, вихретоковый, капиллярный) и их ограничений. Изучение современных технологий, включая тепловизионный контроль и системы машинного зрения с искусственным интеллектом. **Результаты:** Выявлены недостатки традиционных методов неразрушающего контроля, такие как ограниченная применимость для немагнитных материалов, необходимость контактных зон и влияние помех. Показаны преимущества тепловизионного контроля и технологий ИИ, включая дистанционность, высокую точность, возможность раннего обнаружения дефектов и автоматизацию процессов. Предложен комплексный подход к диагностике подвижного состава, сочетающий тепловизионные и электронные средства. Разработана структурная схема диагностического комплекса для электродепо «Невское» с применением тепловизионных и электронных средств. **Практическая значимость:** Внедрение современных методов контроля позволит перейти от планово-предупредительного ремонта к предиктивному обслуживанию, снизит затраты на ремонт, уменьшит количество простоев и повысит безопасность движения. Предложенный диагностический комплекс может быть адаптирован для других депо и транспортных систем.

Ключевые слова: Неразрушающий контроль, тепловизионный контроль, искусственный интеллект, машинное зрение, диагностика подвижного состава, безопасность движения, предиктивное обслуживание.

Введение

Современные системы неразрушающего контроля играют ключевую роль в обеспечении безопасности и надежности эксплуатации подвижного состава метрополитена. Традиционные методы, такие как магнитопорошковый, ультразвуковой, вихретоковый и капиллярный контроль, обладают рядом преимуществ,

включая простоту использования, доступность и точность локализации дефектов. Однако эти методы имеют существенные ограничения, связанные с материалом исследуемых объектов, сложностью доступа к зонам контроля, а также необходимостью предварительной подготовки поверхностей.

В условиях роста пассажиропотока и увеличения нагрузки на инфраструктуру метрополитена особую актуальность приобретают инновационные технологии, такие как тепловизионный контроль и системы диагностики на основе искусственного интеллекта. Эти методы позволяют не только выявлять дефекты на ранних стадиях, но и прогнозировать возможные отказы оборудования, минимизируя простои и снижая затраты на обслуживание.

Традиционные методы неразрушающего контроля

Традиционные методы неразрушающего контроля постоянно адаптируются к современным требованиям и непрерывно совершенствуются, разрабатываются и внедряются новые подходы в магнитопорошковом, ультразвуковом, вихретоковом, капиллярном контроле при диагностировании подвижного состава метрополитена. Однако при очевидных преимуществах традиционных методов неразрушающего контроля, а именно: невысокой стоимости, простоте использования, выявлении внутренних поверхностных и подповерхностных дефектов, точности локализации дефектов, а также сохранении целостности и дальнейшей пригодности для эксплуатации проверяемых деталей и узлов подвижного состава, — существует ряд проблем, которые накладывают ограничения использования указанных методов контроля.

Так, магнитопорошковый метод не может применяться для диагностики деталей и узлов из немагнитных материалов (алюминий, медь и пр.); в случаях, когда на поверхности не обеспечена необходимая зона для нанесения магнитного индикатора или если зона контроля недоступна для осмотра; с несплошностями, плоскости которых параллельны контролируемой поверхности или составляют с ней и направлением намагничивающего поля угол менее 30° ; а также для диагностики сварных швов, выполненных немагнитным электродом. При применении магнитопорошкового метода необходимо предварительно удалить лакокрасочное или другое защитное покрытие при большой его толщине, что не всегда представляется возможным без демонтажа проверяемого объекта. При проведении ультразвукового контроля для передачи ультразвуковых волн необходимо наличие контактных зон; применение данного метода затрудняется при сложных формах дефектов, а также существует реальная проблема шума и помех, которая связана с искажением эхосигналов, что снижает вероятность обнаружения дефектов и увеличивает погрешность измерений.

В современных условиях активно развиваются технологии, основанные на получении информации о проверяемых объектах по их собственному

инфракрасному излучению (тепловизионный контроль), электронные технологии с использованием искусственного интеллекта, которые дают возможность повысить уровень безопасности движения поездов, помогают своевременно анализировать неисправности подвижного состава и выявлять предотказные состояния, а также совершенствуют и оптимизируют существующую систему диагностики.

Рассмотрим более подробно характеристики технических возможностей указанных перспективных методов контроля, область и условия их применения.

Тепловизионный контроль

Инфракрасное излучение, испускаемое телами, температура которых превышает температуру абсолютного нуля, содержит информацию о составляющих эти тела веществах, предыстории тел и их расположении. Восприятие этой информации с помощью системы обнаружения и соответствующая ее обработка позволяют определить и проконтролировать некоторые параметры, которые трудно или невозможно измерить непосредственно [1].

Инфракрасное излучение — это электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным концом видимого излучения и коротковолновым радиоизлучением с длинами волн λ от около 0,74 мкм до около 1–2 мм. Оно относится к оптическому излучению, однако, в отличие от видимого излучения, не воспринимается человеческим глазом. Взаимодействуя с поверхностью тел, оно нагревает их, поэтому часто его называют тепловым излучением. Условно область инфракрасного излучения разделяют на ближнюю ($\lambda = 0,74–2,5$ мкм), среднюю (2,5–50 мкм) и далекую (50–2000 мкм). Это невидимое глазом излучение с помощью оптико-электронной системы обнаружения преобразуется в информацию, которая, в свою очередь, уже воспринимается нашими органами чувств. Устройство для наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности — тепловизор — дистанционно оценивает температурные поля, на его дисплее распределение температуры отображается как цветная картинка, где разным температурам соответствуют разные цвета.

В настоящее время тепловизионный контроль активно внедряется и применяется в железнодорожном хозяйстве всех стран мира [2].

Тепловизоры в локомотивных депо применяются как диагностический комплекс при проведении технического обслуживания и текущего ремонта подвижного состава; для контроля теплового состояния оборудования на технологических участках, испытательных станциях, котельных установках и пр.

Внедрение тепловизионного контроля как наиболее перспективного и эффективного направления развития в диагностике электроподвижного состава позволит Петербургскому метрополитену значительно повысить безопасность движения, что является одной из важнейших задач перевозочного процесса.

Электронные технологии с использованием искусственного интеллекта

Благодаря стремительному развитию науки и технологий искусственный интеллект (ИИ) применяется в большом количестве областей, в том числе и на железной дороге. Современные технологии машинного обучения и анализа больших данных позволяют не только автоматизировать процессы диагностики подвижного состава, но и прогнозировать поломки, минимизировать простои и снижать затраты на обслуживание [3].

Основные технологии ИИ для диагностики [3]:

- сенсоры и Интернет вещей (IoT) — датчики, установленные на критически важных узлах подвижного состава (оси, колеса, тормоза, двигатели), собирают данные о вибрации, температуре, износе и других параметрах;
- компьютерное (так называемое «машинное») зрение — камеры и лазерные сканеры фиксируют мельчайшие дефекты рельсов, колесных пар и контактной сети; машинное зрение позволяет находить трещины, износ и другие повреждения, которые трудно выявить визуально;
- анализ больших данных (Big Data) — алгоритмы обрабатывают информацию, поступающую с датчиков, выявляя аномалии, указывающие на потенциальные неисправности.

Машинное зрение является подразделом инженерии [4], а именно общим набором методов и алгоритмов, позволяющих компьютерам «видеть» при помощи цифровых камер. Машинное зрение как отрасль ИИ использует технологические системы, заменяющие человеческий глаз для измерений и оценки. Эти системы преобразуют захваченные изображения в цифровые сигналы, которые передаются в специализированные системы обработки изображений, далее данные анализируются с учетом таких характеристик, как яркость, цвет и распределение пикселей. Эти цифровые сигналы подвергаются дополнительной обработке, что позволяет получить результаты классификации [5].

Внедрение технологии машинного зрения в процесс диагностирования подвижного состава Петербургского метрополитена позволит повысить уровень безопасности движения поездов, поможет своевременно анализировать неисправности подвижного состава и выявлять предотказные состояния, усовершенствует существующую систему диагностики в части повышения точности обнаружения дефектов, а также в перспективе позволит перейти на иные принципы обслуживания подвижного состава — обслуживание по состоянию.

Комплекс для диагностирования подвижного состава электродепо «Невское» с применением тепловизионных и электронных средств

В рамках государственной программы г. Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга» в 2029 году планируется продлить Невско-Василеостровскую линию от станции «Беговая» до станции «Каменка» с промежуточной станцией «Богатырская» (рис. 1). Предполагается, что максимальная пропускная способность Линии 3 сможет достигать до 40 пар поездов в час, а пассажиропоток составит около 1,3 тысячи человек за сутки.



Рис. 1. Перспективный план развития Петербургского метрополитена

Появление новых станций метро, безусловно, заметно улучшит качество жизни в районе — сократится время доступа в центр города и другие районы на общественном транспорте, появятся удобные альтернативные способы доступа до работы или учебы. Также продление линии метро позволит снизить нагрузку на наземный общественный транспорт.

Однако с открытием новых станций метро остро встает вопрос обслуживания и ремонта подвижного состава Линии 3. Строительство дополнительного депо в ближайшие годы не запланировано, вся нагрузка на обслуживание, ремонт и эксплуатацию подвижного состава Линии 3 ляжет на электродепо «Невское». Предусмотренная в Петербургском метрополитене система видов планового технического обслуживания и ремонта, проводимого периодически, связана с наработкой (пробегом) вагонов. Таким образом, с продлением Линии 3 электропоезда будут быстрее достигать установленных значений пробегов, увеличится количество проводимого технического обслуживания и ремонта вагонов подвижного состава. А для составов типа 81-722/723/724 и их модификаций, которым перед выдачей на линию согласно действующей на метрополитене нормативно-технической документации, выполняется подготовка к работе на линии со сроком действия данных работ 20 ± 4 часа, что в условиях продления линии окажется невыполнимой задачей.

По статистике, на сегодняшний день работниками участка внепланового обслуживания и ремонта электродепо «Невское» осматривается порядка 4000 вагонов в месяц. Согласно Перечню работ по подготовке состава к работе на линии, состоящего из вагонов моделей 81-722, 81-723, 81-724 и их модификаций (через каждые 20 ± 4 часа) [6], после захода состава с линии в депо производится контроль (на ощупь) нагрева подшипниковых узлов букс, тяговых редукторов, тяговых двигателей, муфт ЗК. Узлы с повышенной температурой контролируются пирометром. Обращается внимание на отсутствие следов повышенного нагрева подшипников (обгорание смазки, краски), перегрева поверхности катания колес (обгорание краски обода, цвета побежалости). Оборудование, доступное для осмотра сбоку и снизу, осматривается дважды (то есть сбоку и снизу). Визуальному контролю на отсутствие наружных механических повреждений, внешних дефектов, отсутствие трещин на металле и сварных швах и прочих дефектов подлежат следующие детали и узлы:

- подвесное оборудование на раме кузова вагона;
- колесные пары;
- редукторы;
- зубчатая муфта;
- тормозные блоки тележек;
- токоприемники и срывной клапан;
- рамы тележек и тяги связи кузова с тележкой;
- буксовое и центральное подвешивание;
- гасители колебаний;
- токоотводы;
- асинхронный тяговый привод (АТП);
- автосцепки и их составные части и детали;
- кузов и установленное на нем оборудование (только сбоку, сверху не представляется возможным).

Активно обсуждаются пути решения проблемы увеличения количества ежедневных осмотров, планового и внепланового обслуживания подвижного состава. Первый путь — пересмотр нормативно-технической документации, которая на сегодняшний день не отражает реальную картину потребностей эксплуатации и обслуживания подвижного состава, и, как следствие, сокращение количества ежедневных осмотров или даже отказ от них. Однако такой подход может привести к снижению возможности выявления предотказных состояний, возможности своевременно анализировать и устранять неисправности подвижного состава.

Наиболее эффективным в данном случае представляется путь автоматизации технических средств контроля [7] с применением современных перспективных технологий диагностирования подвижного состава метрополитена с целью перехода от планово-предупредительного ремонта к предиктивному (прогнозирующему) техническому обслуживанию.

Использование тепловизионных и электронных средств контроля предлагается реализовать в комплексе для диагностирования подвижного состава электродепо «Невское». Структурная схема диагностического комплекса (ДК) представлена на рис. 2.

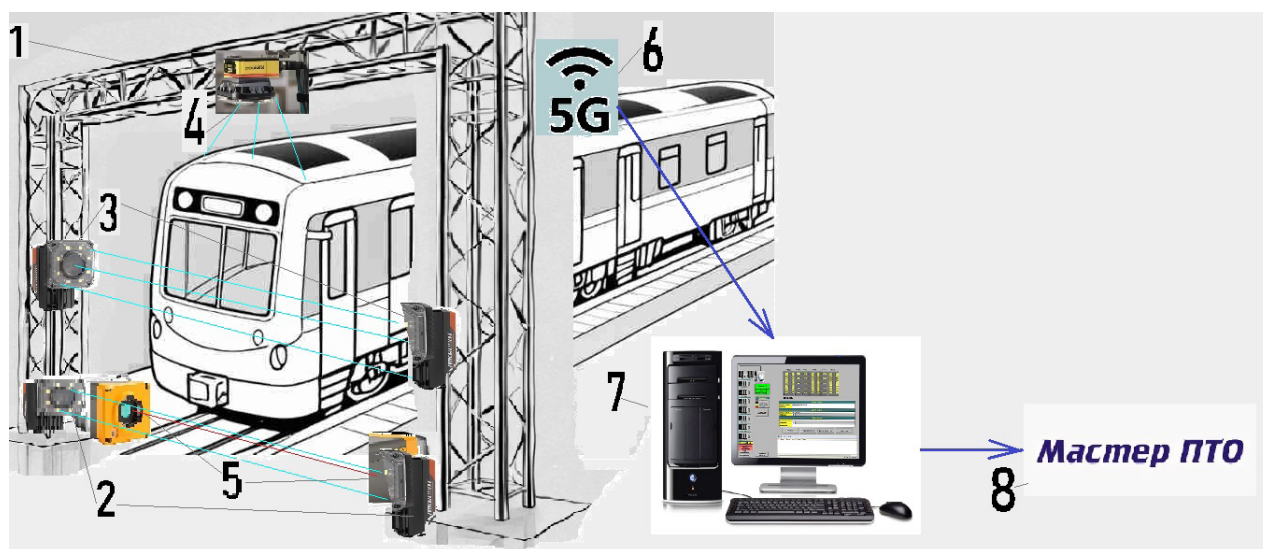


Рис. 2. Диагностический комплекс электродепо «Невское» с применением тепловизионных и электронных средств:

- 1 — металлическая рампа; 2, 3, 4 — высокоскоростные камеры машинного зрения; 5 — стационарные тепловизоры; 6 — сеть 5G; 7 — ПЭВМ оператора; 8 — участок внепланового обслуживания и ремонта депо

Диагностический комплекс представляет собой П-образную металлическую рампу 1 по очертанию габарита вагона, установленную за въездными воротами со стороны депо, с размещенными на ней двумя высокоскоростными камерами 2 для сбора изображений нижней части электропоезда (ходовая часть и подвагонное оборудование), двумя аналогичными умными камерами 3 на высоте 2 м

для сбора изображений элементов кузова сбоку (двери, окна, автосцепки, межвагонные предохранительные устройства), одной высокоскоростной камерой 4 для сбора изображений кузова сверху и оборудования, установленного на крыше вагона (система вентиляции, антенны и пр.), а также тепловизоров 5 для получения термограммы механической части электроподвижного состава.

Во время захода состава с линии в депо блок модуля изображения камер и тепловизоры диагностического комплекса активируются, полученные данные отправляются в облако через сеть 5G 6, обрабатываются с помощью машинного зрения. Автоматически выявленные дефекты передаются на ПЭВМ оператора 7, который к окончанию захода и постановке состава на деповской путь уже имеет точный «диагноз» неисправностей деталей и узлов подвижного состава. Данная информация передается мастеру участка внепланового обслуживания и ремонта 8 для принятия решения по организации дальнейшего ремонта и эксплуатации вагона (состава).

Использование технологии передачи данных в 5G выбрано в данном случае за более скоростную обработку и передачу данных, что позволит эффективно использовать сеть для поставленных задач. 5G — это стандарт мобильной связи, который обеспечивает более высокую скорость передачи данных, минимальные задержки и возможность одновременного подключения большего числа устройств по сравнению с предыдущими поколениями. Как новый стандарт связи начиная с 2019 года 5G активно развивается в мегаполисах по всему миру. В России полноценные сети 5G начнут разворачивать в крупных городах в 2026 году, а в остальных населенных пунктах — в начале 2030-х. Основное покрытие на сегодняшний день обеспечивает оператор МТС, и оно доступно в отдельных районах Москвы и Санкт-Петербурга.

Внедрение ДК с применением перспективных технологий диагностирования позволит с высокой точностью обнаруживать трещины, износ и другие повреждения, которые трудно выявить визуально при помощи традиционных методов неразрушающего контроля [8].

Благодаря своевременному выявлению неисправностей уменьшится количество простоев подвижного состава, снизятся затраты на ремонт за счет своевременной замены деталей до их критического износа. Автоматизация процесса решит проблему ежедневного осмотра составов перед выдачей на линию, устранит человеческие ошибки в проведении контроля (фактор утомляемости, ночная работа, ограниченность возможностей глаза при осмотре быстро перемещающихся или удаленных объектов в условиях недостаточной освещенности), снизит использование бумажной документации. Использование машинного зрения позволит проводить полноценный контроль подвижного состава (снизу, сбоку, сверху) без ограничений по доступности к местам диагностирования [9].

Интеграция искусственного интеллекта в процесс анализа эксплуатационных данных в конечном итоге повысит безопасность движения за счет снижения риска внезапных отказов оборудования.

Переход от планово-предупредительного ремонта к предиктивному (прогнозирующему) техническому обслуживанию — перспективная задача применения искусственного интеллекта. В отличие от традиционного планово-предупредительного ремонта, ИИ-алгоритмы позволяют определять необходимость ремонта не по графику, а на основе реальных данных о состоянии оборудования [10].

Заключение

Современные методы неразрушающего контроля, такие как тепловизионный контроль и электронные технологии с использованием искусственного интеллекта, открывают новые возможности для повышения эффективности и безопасности диагностики подвижного состава метрополитена. Внедрение этих перспективных технологий позволяет преодолеть ограничения традиционных методов, обеспечивая более точное, оперативное и надежное выявление дефектов на ранних стадиях их развития.

Тепловизионный контроль, основанный на анализе инфракрасного излучения, предоставляет возможность дистанционно оценивать тепловое состояние оборудования механической части подвижного состава, выявлять дефекты и предотвращать потенциальные отказы.

Электронные технологии с искусственным интеллектом, такие как машинное зрение, позволяют автоматизировать процессы контроля, минимизировать человеческий фактор и перейти к предиктивному обслуживанию. Это не только снижает затраты на ремонт и простои, но и значительно повышает безопасность движения за счет прогнозирования и предотвращения критических неисправностей.

Реализация диагностического комплекса в электродепо «Невское» с применением тепловизионных и электронных средств станет важным шагом в модернизации системы технического обслуживания Петербургского метрополитена. Интеграция этих технологий позволит перейти от традиционного планово-предупредительного обслуживания и ремонта к современным подходам, что в конечном итоге обеспечит более надежную и безопасную эксплуатацию подвижного состава.

Таким образом, сочетание тепловизионного контроля и искусственного интеллекта представляет собой перспективное направление развития диагностики, способное решить актуальные проблемы транспортной отрасли и повысить качество обслуживания пассажиров.

Список источников

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. / Ж. Госсорг. — М.: Мир, 1988. — 416 с.
2. Cyberpedia: информационный ресурс. — URL: <https://cyberpedia.su/2x3375.html> (дата обращения: 01.05.2025).
3. РОССТИП: портал. — URL: <https://rosstip.ru/news/5062-kak-iskusstvennyj-intellekt-menyat-tekhnicheskoe-obsluzhivanie-zhd-transporta> (дата обращения: 09.05.2025).
4. Цаплин А. Е. Диагностика узлов механической части подвижного состава с применением комплекса машинного зрения / А. Е. Цаплин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2011. — № 2. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-uzlov-mehanicheskoy-chasti-podvizhnogo-sostava-s-primeneniem-kompleksa-mashinnogo-zreniya> (дата обращения: 10.05.2025).
5. Шэнь Ц. Применение технологии неразрушающего контроля на подвижном составе и перспективы ее развития / Ц. Шэнь, А. Е. Цаплин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 31–44. — DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-31-44.
6. Перечень работ по подготовке состава к работе на линии, состоящего из вагонов моделей 81-722, 81-723, 81-724 и их модификаций (через каждые 20 ± 4 часа), утв. заместителем начальника метрополитена — начальником Службы подвижного состава Управления метрополитена, 2019. — 11 с.
7. Алексеев А. А. Идентификация и диагностика систем: учебник для студентов высших учебных заведений / А. А. Алексеев, Ю. А. Кораблев, М. Ю. Шестопалов. — М.: Академия, 2009. — 351 с.
8. Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В. В. Ключев. — 3-е изд. — М.: Машиностроение, 2005. — 656 с.
9. Цаплин А. Е. Совершенствование методов контроля деталей механической части электроподвижного состава применением оптико-электронных средств: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / А. Е. Цаплин; Петербургский государственный университет путей сообщения — СПб., 2011. — 18 с.
10. Зеленченко А. П. Диагностические комплексы электрического подвижного состава: учебное пособие / А. П. Зеленченко, Д. В. Федоров. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014 — 112 с.

Дата поступления: 21.04.2025

Решение о публикации: 03.06.2025

Контактная информация:

ВАСИЛЬЕВСКАЯ Мария Сергеевна — магистрант; vas5maria@yandex.ru

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

The Development of a Diagnostics Complex for the Metro Electric Rolling Stock Using Thermal Imaging and Electronic Devices

M. S. Vasil'evskaya, A. E. Tsaplin

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

For citation: Vasil'evskaya M. S., Tsaplin A. E. The Development of a Diagnostics Complex for the Metro Electric Rolling Stock Using Thermal Imaging and Electronic Devices. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 133–144. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-133-144

Summary

Purpose: To develop a concept for a diagnostics complex for the electric rolling stock in the Metro system using thermal imaging and electronic means. To investigate the implementation of modern non-destructive testing methods, including thermal imaging and artificial intelligence (AI) technologies for the diagnostics of the Metro electric rolling stock. To demonstrate the advantages of the aforementioned methods in comparison with traditional approaches. To justify their application for improving the rolling stock operation safety and efficiency. **Methods:** Analysis of the contemporary methodologies employed in the field of non-destructive testing, such as magnetic powder, ultrasonic, eddy current, and capillary testing, and their limitations. The investigation of modern technologies, including thermal imaging and machine vision systems with artificial intelligence. **Results:** The limitations of conventional non-destructive testing methodologies have been elucidated, encompassing their restricted applicability to non-magnetic materials, the necessity for contact zones, and the susceptibility to interference. The merits of thermal imaging and AI technologies have been demonstrated, including remote accessibility, enhanced precision, the capacity for early defect detection, and the automation of processes. A comprehensive approach to the rolling stock diagnostics has been proposed, combining thermal imaging and electronic devices. A block diagram of a diagnostics complex for Nevskoe electric train depot using thermal imaging and electronic devices has been developed. **Practical significance:** The implementation of contemporary control methodologies has the potential to transform the paradigm of maintenance practices, transitioning from scheduled preventive measures to a predictive maintenance model. This transition is expected to engender a range of benefits, including reduced expenditure on repairs, minimized downtime, and enhanced traffic safety. The proposed diagnostic system has the capacity to be adapted to other depots and transport systems.

Keywords: Non-destructive testing, thermal imaging, artificial intelligence, machine vision, rolling stock diagnostics, traffic safety, predictive maintenance.

References

1. Gossorg Zh. *Infrakrasnaya termografiya. Osnovy, tekhnika, primeneniye: Per. s frants.* [Infrared thermography. Fundamentals, technique, application: Trans. from French]. Moscow: Mir Publ., 1988, 416 p. (In Russian)
2. *Cyberpedia: informatsionnyy resurs* [Cyberpedia: information resource]. Available at: <https://cyberpedia.su/2x3375.html> (accessed: May 1, 2025). (In Russian)
3. ROSSTIP: portal. Available at: <https://rosstip.ru/news/5062-kak-iskusstvennyj-intellekt-menyaet-tekhnicheskoe-obsluzhivanie-zhd-transporta> (accessed: May 1, 2025).
4. Tsaplin A. E. Diagnostika uzlov mekhanicheskoy chasti podvizhnogo sostava s primeneniem kompleksa mashinnogo zreniya [Diagnostics of units of the mechanical part of the rolling stock using a machine vision complex]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings

of Petersburg Transport University]. 2011, Iss. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-uzlov-mekhanicheskoy-chasti-podvizhnogo-sostava-s-primeneniem-kompleksa-mashinnogo-zreniya> (accessed: May 10, 2025). (In Russian)

5. Shen' Ts., Tsaplin A. E. *Primenenie tekhnologii nerazrushayushchego kontrolya na podvizhnom sostave i perspektivy ee razvitiya* [Application of non-destructive testing technology on rolling stock and prospects for its development]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Scientific Research Results]. 2025, Iss. 1, pp. 31–44. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-31-44. (In Russian)

6. *Perechen' rabot po podgotovke sostava k rabote na linii, sostoyashchego iz vagonov modeley 81-722, 81-723, 81-724 i ikh modifikatsiy (cherez kazhdye 20±4 chasa), utv. zamestitelem nachal'nika metropolitena — nachal'nikom Sluzhby podvizhnogo sostava Upravleniya metropolitena, 2019* [List of works on preparing a train for operation on the line, consisting of cars of models 81-722, 81-723, 81-724 and their modifications (every 20±4 hours), approved. by the Deputy Head of the Metro - Head of the Rolling Stock Service of the Metro Administration, 2019]. 11 p. (In Russian)

7. Alekseev A. A., Korablev Yu. A., Shestopalov M. Yu. *Identifikatsiya i diagnostika sistem: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Identification and diagnostics of systems: a textbook for students of higher educational institutions]. Moscow: Akademiya Publ., 2009, 351 p. (In Russian)

8. Klyuev V. V. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika: Spravochnik, 3-e izd.* [Non-destructive testing and diagnostics: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005, 656 p. (In Russian)

9. Tsaplin A. E. *Sovershenstvovanie metodov kontrolya detaley mekhanicheskoy chasti elektropodvizhnogo sostava primeneniem optiko-elektronnykh sredstv: avtoref. dics. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.07* [Improving the methods of testing the mechanical parts of electric rolling stock using optical-electronic means: author's abstract. diss. ... candidate of technical sciences: 05.22.07]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2011, 18 p. (In Russian)

10. Zelenchenko A. P., Fedorov D. V. *Diagnosticcheskie komplekсы elektricheskogo podvizhnogo sostava: uchebnoe posobie* [Diagnostic complexes of electric rolling stock: a tutorial]. Moscow: FGBOU "Uchebno-metodicheskikh tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2014, 112 p. (In Russian)

Received: April 21, 2025

Accepted: June 03, 2025

Author's information:

Maria S. VASIL'EVSKAYA — Master's Degree Student; vas5maria@yandex.ru

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

УДК 621.313.13

Тяговый электродвигатель с постоянными магнитами на роторе: характеристика и перспективы применения в транспортной отрасли

П. Г. Колпахчян, А. Ю. Рязанов

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

Для цитирования: Колпахчян П. Г., Рязанов А. Ю. Тяговый электродвигатель с постоянными магнитами на роторе: характеристика и перспективы применения в транспортной отрасли // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 145–157. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-145-157

Аннотация

Цель: В статье рассматривается возможность применения синхронных электрических машин с постоянными магнитами (IPMsynRM) в качестве тяговых двигателей на электроподвижном составе железных дорог. Основное внимание уделено особенностям и характеристикам электродвигателя IPMsynRM с целью выявления перспектив его использования на железнодорожном транспорте. **Методы:** Проведен анализ различных вариантов исполнения электрических машин и особенностей управления ими при использовании в составе тягового электропривода. **Результаты:** Было установлено, что в качестве тягового двигателя возможно использование синхронного реактивного двигателя с постоянными магнитами IPMsynRM, который благодаря внутреннему расположению магнитов и немагнитным отверстиям в магнитопроводе позволяет обеспечить высокие удельные показатели мощности на единицу массы и объема, КПД, меньший вес и лучший пусковой момента. Обобщены характеристики и особенности IPMsynRM. Рассмотрены попытки его применения на электромобилях и электропоездах, что позволяет выдвигать его на роль потенциального двигателя для транспортных средств. **Практическая значимость:** Результаты работы имеют значение для транспортной отрасли, так как расширяют представления об особенностях энергоэффективного электродвигателя IPMsynRM с точки зрения его использования в составе тягового электропривода электроподвижного состава на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: Электродвигатель, транспортная отрасль, ротор, тяговая система, синхронный тяговый двигатель, постоянные магниты.

Введение

Использование электроприводов в электрической тяге поездов эволюционировало от приводов постоянного тока к приводам переменного тока [1]. Одним из преимуществ тягового электропривода на базе электрических машин переменного тока является возможность увеличения осевой мощности тяговых двигателей и повышения их надежности за счет отказа от коллектора. Развитие силовой электроники, в первую очередь IGBT-модулей, на большие токи и напряжения сделало возможным применение современных методов управления тяговыми

двигателями. Использование таких способов регулирования тяговых двигателей переменного тока, как векторное регулирование или прямое управление моментом, позволяет обеспечить высокое быстродействие регулирования и большую динамическую жесткость механической характеристики тягового электропривода. Это позволяет создавать эффективные системы борьбы с боксованием и юзом и повысить использование сцепного веса на 20–25 % выше по сравнению с коллекторными тяговыми двигателями. Помимо этого, стоит отметить более низкие требования к техническому обслуживанию и большую надежность, а также высокую эффективность и удельную мощность, обеспечиваемые приводами переменного тока [2].

В настоящее время асинхронные тяговые двигатели (IM) являются основным типом электрических машин, применяемых в качестве тяговых двигателей на тяговом подвижном составе. Они в полной мере удовлетворяют требованиям по использованию сцепного веса, массогабаритным показателям, надежности и автоматизации. Появление редкоземельных постоянных магнитов сделало возможным их использование для установки их на роторе синхронных электрических машин (SM) [3]. Наличие возбуждения на роторе позволяет добиться лучших, по сравнению с асинхронными электрическими машинами, удельных показателей. Потери на роторе у электрических машин с постоянными магнитами намного меньше, чем у асинхронных, так как у них отсутствуют потери скольжения. Поэтому в последнее время синхронные электрические машины с постоянными магнитами на роторе рассматриваются в качестве альтернативы асинхронным электрическим машинам для использования в качестве тяговых двигателей на электроподвижном составе.

Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами (PMSMs) привлекают повышенное внимание благодаря присущим им достоинствам, таким как высокие удельные показатели, высокий КПД и хорошая управляемость. В настоящее время существует тенденция к расширению их использования в качестве тяговых двигателей на железных дорогах [4].

Особенностью тягового двигателя является работа в двух зонах. В первой зоне, при скорости ниже номинальной, тяговый двигатель работает в режиме ограничения по моменту. С ростом частоты вращения напряжение, прикладываемое к обмотке статора, увеличивается, что соответствует режиму работы с полным полем. В номинальном режиме напряжение достигает предельного значения и во второй зоне, при дальнейшем увеличении частоты вращения, остается неизменным. Тяговый двигатель переходит в режим работы с ограничением по мощности, для реализации которого необходимо ослабление поля. Наличие нерегулируемого возбуждения у тяговых двигателей с постоянными магнитами на роторе делает невозможным реализацию двухзонной работы за счет ослабления поля.

Необходимо использование другого подхода, основанного на использовании реактивной составляющей момента.

Возможность реализации реактивного момента в синхронном двигателе с постоянными магнитами зависит от конструкции ротора. Возможны различные варианты расположения постоянных магнитов: двигатели с поверхностным магнитным креплением (SPM) и двигатели с внутренним постоянным магнитом (IPM). Некоторые варианты конфигурации роторов представлены на рис. 1.



Рис. 1. Различные конфигурации роторов (слева направо): асинхронный, или индукционный, двигатель (IM); синхронный двигатель с внутренним постоянным магнитом (IPMSM); синхронные двигатели с внутренним постоянным магнитом и обмоткой ротора (IPMSM с прямым пуском); синхронный двигатель с поверхностным постоянным магнитом (SM-PMSM); синхронный реактивный двигатель (SynRM)

Двигатели SPM относительно просты в изготовлении, поскольку магниты прочно прикреплены к поверхности ротора и фиксируются бандажом. Однако для таких двигателей существует риск разрушения магнитов при работе на высокой скорости. Двигатели IPM, напротив, обеспечивают более высокую надежность ротора, поскольку магниты встроены в магнитопровод ротора. Более того, двигателям IPM уделяется все большее внимание из-за возможности поддержания постоянной мощности в широком диапазоне изменения частоты вращения [5].

Характеристика электродвигателя IPMSynRM

В настоящее время для управления синхронными двигателями используются технологии векторного регулирования. Это позволяет обеспечить точное позиционирование поля статора относительно положения ротора. В результате можно получить требуемую тяговую характеристику [6]. Применение ротора со встроенными магнитами и ориентирование магнитного поля статора относительно положения ротора в пределах 45° (регулирование угла нагрузки) обеспечивает регулирование крутящего момента независимо от частоты вращения. Такой двигатель называется IPMSynRM.

IPMSynRM — это синхронный тяговый электродвигатель с постоянными магнитами на роторе (рис. 2), имеющий реактивную составляющую момента.



Рис. 2. Синхронный тяговый электродвигатель с постоянными магнитами на роторе IPMSynRM

Двигатель IPMSynRM объединяет в себе технологии SynRM и PMSM, которые используют как разницу в индуктивностях по продольной и поперечной осям, так и потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами. В этом двигателе постоянные магниты устанавливаются не на поверхности ротора, а в прорезях внутри ротора и выполняют функцию материала с высоким магнитным сопротивлением для синхронного реактивного двигателя.

Ротор состоит из слоев барьеров (воздух) и сегментов (сталь). Его крутящий момент зависит от двух аспектов: реактивного момента и момента от постоянных магнитов (магнитоэлектрического). Основываясь на анизотропной структуре геометрии ротора, роторы IPMSynRM можно разделить на три различные категории [7]:

- традиционный простой ротор;
- анизотропный ротор с осевым расположением (ALA);
- анизотропный ротор с поперечным расположением (TLA).

Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами на роторе представляет собой возможную альтернативу приводам переменного тока для тяговых применений. В целом важные характеристики и преимущества IPMSynRM можно сформулировать следующим образом [8]:

- лучший пусковой момент. На низких оборотах поле магнитов взаимодействует с вращающимся полем статора, создавая крутящий момент, а на высоких — компенсируется, не генерируя паразитные напряжения в статорных обмотках;
- высокий КПД (до 96 % против 94 % у асинхронного двигателя);
- меньший нагрев и упрощенная система охлаждения ротора;
- улучшенные массогабаритные показатели. За счет уменьшения потерь на нагрев ротора удастся уменьшить размеры и вес двигателя;
- низкая стоимость. Установлено, что синхронный двигатель IPMSynRM (использует реактивную составляющую момента) на 25 % дешевле синхронного двигателя с постоянными магнитами (IPMSM).

Важной особенностью IPMSynRM является его высокая эффективность, учитывая герметичное исполнение и более высокий КПД. Поскольку в данном

электродвигателе нет тока возбуждения и тока ротора, то потери в роторе минимальны. Уровень потерь в данных электродвигателях составляет примерно половину от потерь асинхронного двигателя. Потери в синхронных тяговых двигателях с постоянными магнитами состоят в основном из потерь в магнитопроводе статора и электрических потерь в обмотке.

Перспективы и попытки применения IPMsynRM в транспортной отрасли

Синхронные двигатели с постоянными магнитами в последнее время вызывают значительный интерес благодаря своей высокой эффективности, легкости и низкой стоимости жизненного цикла, что делает его перспективным в качестве тяговых двигателей нового поколения в транспортной отрасли. В настоящее время уже ведутся исследования по дальнейшей оптимизации данного электродвигателя, направленные на повышение его эффективности.

Существует несколько производителей синхронных электродвигателей с постоянными магнитами для использования на железнодорожном транспорте (табл. 1) [9].

ТАБЛИЦА 1. Производители тяговых электродвигателей с постоянными магнитами

Оператор	Поезда	Производитель
SNCF	31xCitadis — двойной трамвай — железнодорожные транспортные средства	Alstom
Praha	15T для городского низкопольного трамвая	Skoda
Прототипы и другие испытательные поезда		
München U-Bahn	Комплект поездов метро C19 с тележками Syntegra	Siemens
Китай	Прототип локомотива с топливными элементами	CNR Yongji
Турция	Низкопольный трамвай Citadis X04	Alstom
Япония	Поезд со сменой колеи 2	RTRI

Так, в исследовании [10] авторы проводят сравнительный анализ асинхронного двигателя IM и синхронного двигателя с постоянными магнитами, динамическая карта эффективности двигателя которого интегрируется в систему управления энергоэффективным поездом (EETC). Было установлено, что замена IM на PMSM в качестве тягового двигателя не требует внесения изменений в систему управления поездом и синхронный электродвигатель позволяет экономить не менее $1,01 \text{ кВт} \cdot \text{ч/км}$, достигая коэффициента энергосбережения 12,96 %.

Поскольку электродвигатель с постоянными магнитами не имеет хрупких магнитов на поверхности, он прост и надежен, вследствие чего может быть изготовлен с низкими затратами. Тяговые двигатели для железнодорожных транспортных средств должны быть долговечными и прочными. В качестве тяговых двигателей на подвижном составе целесообразно использовать электродвигатели типа IPMsynRM, поскольку они способны обеспечивать эффективное использование

реактивной составляющей момента и принимать магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами, из условия ограничения величины индуцируемого в обмотке статора напряжения в режиме холостого хода на больших скоростях.

IPMsynRM может быть использован в качестве тягового двигателя с прямым приводом. Авторы [11] привели характеристики такого двигателя и указали на следующие положительные результаты: отсутствие требований к обслуживанию редуктора, низкий уровень шума, отсутствие потерь при передаче энергии. Полностью закрытый двигатель способствует минимальному попаданию пыли, что исключает необходимость разборки и чистки. В рамках компьютерного моделирования было отмечено, что при установке данного двигателя на узкоколейные пригородные электропоезда шум снизился на 14 дБ. Благодаря своей простой конструкции тяговый двигатель IPMsynRM типа прямого привода также может быть введен для электропоездов со сменной колеей и низкопольных трамваев.

Во время испытаний прототип тягового электродвигателя с постоянными магнитами, оснащенный разработанной системой охлаждения подшипников, был проверен на эффективность охлаждения и уровень шума. Испытания показали, что полностью закрытые тяговые двигатели с постоянными магнитами позволяют снизить шум на 10 дБ даже при высоких скоростях вращения и достичь высокой эффективности и компактности конструкции.

Следует отметить, что на производительность двигателя IPMsynRM большое влияние оказывает топология ротора. В работе [12] сравниваются четыре однослойных двигателя, которые используются в электромобилях, предполагая, что V-образный двигатель является наиболее подходящим с учетом анализа геометрических параметров.

Авторы работы [13] исследуют пять типичных синхронных тяговых электродвигателей с постоянными магнитами, используемых для высокоскоростных железнодорожных систем, с различными топологиями роторов, включая V-, U-, VV-, VU-, UU-образные формы (рис. 3).

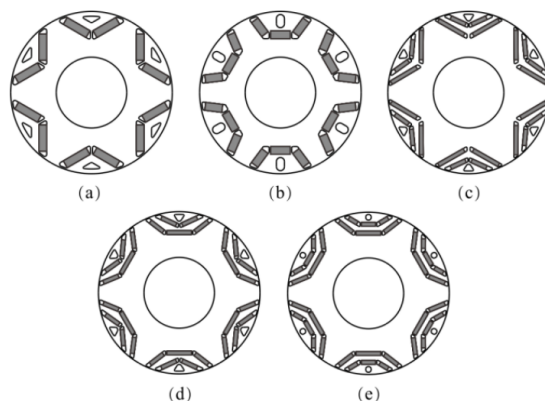


Рис. 3. Топологии ротора: *а* — V-образная, *б* — U-образная, *в* — VV-образная, *г* — VU-образная, *д* — UU-образная формы

Выявлено, что U-образный двигатель обладает наилучшей отказоустойчивостью, так как при использовании такой топологии ротора имеется возможность ограничивать как напряжение холостого хода, так и ток короткого замыкания [14].

Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами обеспечивает лучшую экономичность благодаря значительному снижению потерь на роторе.

Говоря про электромобили, набирающие в настоящее время большую популярность, отметим, что электродвигатель IPMSynRM используется в модели Tesla Model 3. В двигателе используется 6-полюсная конструкция, обеспечивающая повышенный крутящий момент и силу. Гибридный электромобиль Toyota Prius, выпускаемый автопроизводителем Toyota, также использует электродвигатель IPMSynRM. В нем используются два двигателя такого типа: один для привода колес, а другой — для выработки электроэнергии. Двигатели Toyota Prius содержат магниты в виде одного элемента на полюс, в то время как в двигателях Tesla Model 3 магниты разделены на сегменты [15].

В работе [16] описано использование небольшого, компактного синхронного реактивного двигателя с постоянными магнитами для серийного гибридного электромобиля, а также выделены преимущества и недостатки этого привода по сравнению с другими. Показано, что оптимально спроектированная роторно-реактивная синхронная машина с барьерным потоком обладает хорошей плотностью крутящего момента и высоким КПД. Анализ, проведенный авторами, очень интересен, поскольку в нем сравнивались синхронный реактивный двигатель и двигатель внутреннего сгорания в автомобиле (седан) с точки зрения ускорения до максимальной скорости 120 км/ч. В статье показано, что IPMSynRM с максимальным крутящим моментом 120 Нм выгодно отличается от двигателя внутреннего сгорания автомобиля с точки зрения ускорения от 0 до 100 км/ч.

В связи с тем, что синхронный тяговый электродвигатель с постоянными магнитами сочетает в себе технологию synRM, это делает его сильным конкурентом с точки зрения стоимости, веса и эффективности. Среди основных преимуществ синхронного реактивного двигателя подчеркиваются хорошая удельная мощность, соотношение мощности и веса, экономичность и эффективное охлаждение.

Особенностью синхронных тяговых электродвигателей с постоянными магнитами является необходимость применения герметичной конструкции. Значительно более низкий, по сравнению с асинхронными тяговыми двигателями, уровень потерь на роторе позволяет создать такую конструкцию. Перегрев ротора и повышение температуры постоянных магнитов приводит к существенному ухудшению их характеристик. Поэтому проблема охлаждения элементов конструкции синхронной электрической машины с постоянными магнитами все равно является одной из наиболее сложных, особенно в случае применения на электроподвижном составе в качестве тяговых двигателей. Также необходимо учитывать высокий уровень динамических воздействий на элементы конструкции тягового

двигателя, что может вызывать разрушение постоянных магнитов и ухудшение их характеристик.

Особенности управления синхронным тяговым двигателем в составе тягового электропривода

В составе тягового электропривода тяговый двигатель до номинальной скорости движения работает с постоянным моментом. Напряжение, прикладываемое к обмотке статора, растет и достигает предельного значения при номинальной скорости. При дальнейшем увеличении скорости тяговый двигатель переходит в режим работы с постоянством мощности. Особенностью синхронных тяговых двигателей с постоянными магнитами на роторе является отсутствие возможности регулирования возбуждения. Это накладывает ограничения на величину потокосцепления, создаваемого постоянными магнитами: ЭДС на холостом ходу не должна превышать номинального значения напряжения обмотки статора. Поэтому в номинальном режиме, при номинальном значении тока, статора невозможно получить номинальный электромагнитный момент только за счет взаимодействия с магнитным полем от постоянных магнитов. В этом случае возникает необходимость использовать реактивную составляющую момента, которая может быть получена при топологии ротора с погруженным расположением магнитов (см. рис. 3). Учитывая, что для тягового электропривода локомотивов и моторвагонного подвижного состава характерным является то, что номинальная скорость составляет порядка 50–60 % от максимальной, реактивный момент должен достигать половины и более от полного момента тягового двигателя с постоянными магнитами на роторе.

При указанной выше конструкции ротора электромагнитные процессы в тяговом двигателе описываются уравнениями явнополюсной синхронной электрической машины. В этом случае электромагнитный момент определяется выражением:

$$M_y = \frac{3}{2} p \left(\Psi_f I_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq} \right), \quad (1)$$

где p — число пар полюсов;

Ψ_f — потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами;

I_{sd}, I_{sq} — проекции тока статора на продольную и поперечную оси;

L_{sd}, L_{sq} — индуктивности статора по продольной и поперечной осям.

Составляющие тока статора по продольной и поперечной осям могут быть выражены через угол между векторами потокосцепления ротора и тока статора — угол нагрузки:

$$I_{sd} = I_s \cos(\delta), \quad I_{sq} = I_s \sin(\delta), \quad (2)$$

где δ — угол нагрузки.

Тогда с учетом (2) выражение (1) для электромагнитного момента может быть записано в виде:

$$M_y = \frac{3}{2} p \left(\Psi_f I_s \sin(\delta) + \frac{1}{2} (L_{sd} - L_{sq}) I_s^2 \sin(2\delta) \right), \quad (3)$$

где I_s — величина тока статора (амплитуда вектора).

Анализ выражения (3) показывает, что составляющая электромагнитного момента, создаваемого взаимодействием потокосцепления ротора и проекцией тока статора (магнитоэлектрическая), имеет синусоидальный закон изменения в зависимости от угла нагрузки. Реактивная составляющая момента, которая создается за счет разности в индуктивностях статора по продольной и поперечной осям, изменяется в зависимости от угла нагрузки в виде синусоиды с удвоенной частотой. Вид зависимости электромагнитного момента от угла нагрузки тягового электродвигателя с постоянными магнитами представлен на рис. 4.

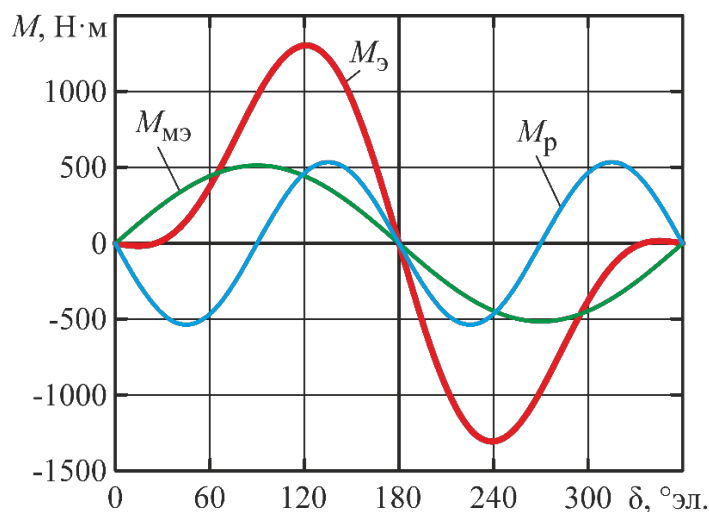


Рис. 4. Зависимость электромагнитного момента синхронного тягового двигателя от угла нагрузки:

M_y — суммарный момент; $M_{мэ}$ — магнитоэлектрическая составляющая;
 M_p — реактивная составляющая

Анализ приведенной зависимости электромагнитного момента показывает, что регулирование момента необходимо вести при изменении угла нагрузки от 180° эл (на рис. 4 — в диапазоне от 120° эл до 240° эл. В этом случае зависимость изменения момента имеет характер, близкий к линейному, что упрощает создание системы автоматического регулирования. Кроме того, на этом интервале соблюдается условие статической устойчивости.

Выводы

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать вывод, что синхронный тяговый электродвигатель IPMSynRM обладает большим потенциалом для успешного применения в транспортной индустрии, в особенности для железнодорожных транспортных средств, ввиду своих следующих особенностей:

- отсутствие цепи возбуждения (механическая конструкция проще, чем у классического асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором);
- при одинаковой подаче тока двигатель IPMSynRM может произвести крутящий момент на 10–15 % больше, чем индукционные двигатели;
- необходимо комбинированное использование магнитоэлектрического и реактивного моментов;
- меньший нагрев и упрощенная система охлаждения ротора;
- актуален тогда, когда энергосбережение и сохранение окружающей среды являются важнейшими социальными проблемами.

Применение синхронных электрических машин с другой топологией ротора не позволяет использовать реактивный момент. Поэтому их применение на тяговом подвижном составе, где тяговый двигатель работает в двухзонном режиме, ограничено, так как требует существенного увеличения массы и габаритов.

Однако внедрение синхронных тяговых двигателей с постоянными магнитами требует проведения дальнейших исследований с целью улучшения характеристик и технологичности конструкции, повышения надежности и снижения стоимости, чтобы обеспечить реализацию его преимуществ по сравнению с другим типами тяговых двигателей.

Список источников

1. Steimel A. Electric Traction-Motive Power and Energy Supply / A. Steimel // Oldenbourg Industieverlag GmbH: Munich, Germany. — 2008.
2. Bolvashenkov I. Methodology for Selecting Electric Traction Motors and its Application to Vehicle Propulsion Systems / I. Bolvashenkov, J. Kammermann, H. Herzog // Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. — 2016. — Pp. 1214–1219.
3. Le Moal E. The Permanent Magnet Synchronous Motor from a Customer Point of View: REGIO 2N vs. REGIOLIS / E. Le Moal, A. Chamaret, P. Mannevy, O. Bouger // Proceedings of the International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference. — 2016. — Pp. 1–4.
4. Matsuoka K. Development trend of the permanent magnet synchronous motor for railway traction / K. Matsuoka // IEEJ Trans on Electr Electr. — 2007. — Vol. 2. — Iss. 2. — Pp. 154–161.

5. Pellegrino G. Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application / G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi, B. Boazzo // IEEE Trans. Ind. Electron. — 2012. — Vol. 59. — Iss. 2. — Pp. 803–811.
6. Казакбаев В. М. Разработка высокоэффективного синхронного реактивного двигателя: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В. М. Казакбаев. — Екатеринбург, 2017. — 22 с.
7. Taghavi S. Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications / S. Taghavi. — Concordia University Montreal, Quebec, Canada, 2015.
8. Vagati A. Design criteria of high performance synchronous reluctance motors in Industry Applications Society Annual Meeting / A. Vagati, G. Franceschini, I. Marongiu, G. P. Trogia // Conference Record of the 1992 IEEE. — 1992. — Vol. 1. — Pp. 66–73.
9. Polater N. Technical review of traction drive systems for light railways / N. Polater, P. Tricoli // Energies. — 2022. — Vol. 15. — Iss. 9. — P. 3187.
10. Yang P. Energy-Efficient Train Control: A Comparative Study Based on Permanent Magnet Synchronous Motor and Induction Motor / P. Yang, Ch. Fuwang, Ch. Feng, W. Chaoxian et al. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2024. — Pp. 1–13.
11. Kondo M. Application of permanent magnet synchronous motor to driving railway vehicles / M. Kondo // Railway technology avalanche. — 2003. — Vol. 1. — Iss. 6.
12. Liu X. Research on the performances and parameters of interior PMSM used for electric vehicles / X. Liu, H. Chen, J. Zhao, A. Belahcen // IEEE Trans. Ind. Electron. — 2016. — Vol. 63. — Iss. 6. — Pp. 3533–3545.
13. Yu D. Design and comparison of interior permanent magnet synchronous traction motors for high speed railway applications / D. Yu, X. Y. Huang, Y. T. Fang, J. Zhang // IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). — 2017.
14. Barcaro M., Fornasiero E., Bianchi N., Bolognani S. Design procedure of IPM motor drive for railway traction. IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011.
15. Ansari A. A. A Review of Different Motor Types and Selection of One Optimal Motor for Application in EV Industry. International Journal of Electrical and Power Engineering, 2022, vol. 16, Iss. 1, pp. 1–7.
16. Malan J., Kamper M. J., Williams P. N. T. Reluctance Synchronous Machine Drive for Hybrid Electric Vehicle. IEEE, 2001, vol. 37, Iss. 5, pp. 1319–1324.

Дата поступления: 27.03.2025

Решение о публикации: 03.05.2025

Контактная информация:

КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич — д-р техн. наук, доц.; kolpahchyan@pgups.ru

РЯЗАНОВ Андрей Юрьевич — студент; ryazanov.andrei@list.ru

Characteristics of a Traction Motor with Permanent Magnets on the Rotor and Its Potential Application in the Transport Industry

P. G. Kolpakhchyan, A. Yu. Ryazanov

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

For citation: Kolpakhchyan P. G., Ryazanov A. Yu. Characteristics of a Traction Motor with Permanent Magnets on the Rotor and Its Potential Application in the Transport Industry. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 145–157. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-145-157

Summary

Purpose: To consider the potential use of synchronous electric machines with permanent magnets (IPMsynRM) as traction motors on railway electric rolling stock. The primary focus of this study is an analysis of the characteristics of the IPMsynRM electric motor, with the objective of identifying the potential for its utilization in rail transport. **Methods:** A comprehensive analysis was conducted of a variety of versions of electric machines, with a focus on their control mechanisms when employed as components of a traction electric drive. **Results:** It was determined that a synchronous reluctance motor with permanent magnets (IPMsynRM) can be utilized as a traction motor. This is due to the internal arrangement of magnets and non-magnetic holes in the magnetic circuit, which provide high specific power per unit of mass and volume, efficiency, reduced weight and enhanced starting torque. The IPMsynRM characteristics and features were summarized in the paper. The utilization of the engine in electric cars and trains is a subject of consideration, thus enabling its proposition as a potential engine for vehicles. **Practical significance:** The research results will be important for the transport industry, as they expand the understanding of the features of the IPMsynRM energy-efficient electric motor in the aspect of its use as part of a traction electric drive of the railway electric rolling stock.

Keywords: IPMsynRM electric motor, transport industry, rotor, traction system, PMSMs.

References

1. Steimel A. Electric Traction-Motive Power and Energy Supply. Oldenbourg Industrieverlag GmbH: Munich, Germany, 2008.
2. Bolvashenkov I., Kammermann J., Herzog H. Methodology for Selecting Electric Traction Motors and its Application to Vehicle Propulsion Systems. Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2016, pp. 1214–1219.
3. Le Moal E., Chamaret A., Mannevy P., Bouger O. The Permanent Magnet Synchronous Motor from a Customer Point of View: REGIO 2N vs. REGIOLIS. Proceedings of the International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference, 2016, pp. 1–4.
4. Matsuoka K. Development trend of the permanent magnet synchronous motor for railway traction. IEEJ Trans on Electr Electr, 2007, vol. 2, Iss. 2, pp. 154–161.
5. Pellegrino G., Vagati A., Guglielmi P., Boazzo B. Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application. IEEE Trans. Ind. Electron, 2012, vol. 59, Iss. 2, pp. 803–811.

6. Kazakbaev V. M. *Razrabotka vysokoeffektivnogo sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a highly efficient synchronous reluctance motor: author's abstract. diss. ... cand. tech. sciences]. Ekaterinburg, 2017, 22 p. (In Russian)
7. Taghavi S. Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications. Concordia University Montreal, Quebec, Canada, 2015.
8. Vagati A., Franceschini G., Marongiu I., Troglia G. P. Design criteria of high performance synchronous reluctance motors in Industry Applications Society Annual Meeting. Conference Record of the 1992 IEEE, 1992, vol. 1, pp. 66–73.
9. Polater N., Tricoli P. Technical review of traction drive systems for light railways / N. Polater. *Energies*, 2022, vol. 15, Iss. 9, p. 3187.
10. Yang P., Fuwang Ch., Feng Ch., Chaoxian W. et al. Energy-Efficient Train Control: A Comparative Study Based on Permanent Magnet Synchronous Motor and Induction Motor. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, pp. 1–13.
11. Kondo M. Application of permanent magnet synchronous motor to driving railway vehicles. *Railway technology avalanche*, 2003, vol. 1, Iss. 6.
12. Liu X., Chen H., Zhao J., Belahcen A. Research on the performances and parameters of interior PMSM used for electric vehicles. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2016, vol. 63, Iss. 6, pp. 3533–3545.
13. Yu D., Huang X. Y., Fang Y. T., Zhang J. Design and comparison of interior permanent magnet synchronous traction motors for high speed railway applications. *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2017.
14. Barcaro M., Fornasiero E., Bianchi N., Bolognani S. Design procedure of IPM motor drive for railway traction. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011.
15. Ansari A. A. A Review of Different Motor Types and Selection of One Optimal Motor for Application in EV Industry. *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 2022, vol. 16, Iss. 1, pp. 1–7.
16. Malan J., Kamper M. J., Williams P. N. T. Reluctance Synchronous Machine Drive for Hybrid Electric Vehicle. *IEEE*, 2001, vol. 37, Iss. 5, pp. 1319–1324.

Received: March 27, 2025

Accepted: May 03, 2025

Author's information:

Pavel G. KOLPAKHCHYAN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; kolpahchyan@pgups.ru

Andrei Yu. RYAZANOV — Student; ryazanov.andrei@list.ru

УДК 531.7.08

Калибровка комплекса автоматизированного ультразвукового контроля полых осей колесных пар SHUTTLE R

Ю. А. Беленцов¹, В. Д. Ефимов², В. С. Соловьев¹

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

²Октябрьский центр метрологии — структурное подразделение Октябрьской железной дороги — филиала ОАО «РЖД», Российская Федерация, 196240, Санкт-Петербург, участок железной дороги «Лиговский канал — Пулковское шоссе», литера А

Для цитирования: Беленцов Ю. А., Ефимов В. Д., Соловьев В. С. Калибровка комплекса автоматизированного ультразвукового контроля полых осей колесных пар SHUTTLE R // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 158–171. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-158-171

Аннотация

Цель: Разработка метода калибровки, анализ применения отечественных средств калибровки и сравнение их с импортными средствами измерений. Оценка осуществимости: разработка методологии калибровки. **Методы:** Использованы аналитические и графические методы сравнения метрологических характеристик средств измерений, используемых при калибровке. Оценка рисков произведена с помощью диаграммы Исикавы. **Результаты:** Определена возможность калибровки комплекса автоматизированного ультразвукового контроля полых осей колесных пар SHUTTLE R с использованием отечественных средств измерений. Сравнение метрологических характеристик калибруемых средств измерений позволило обосновать целесообразность разработки унифицированной методики калибровки для нескольких типов средств измерений. Проведен анализ: методов измерений; отечественных средств измерений и эталонов, применяемых при калибровке, и обосновано их использование. Анализ отечественных средств калибровки показывает, что они способны решать требуемые измерительные задачи при калибровке. Определен способ передачи единицы величины. Оценены риски использования методики калибровки. **Практическая значимость:** Внедрение отечественных средств измерений повысит экономику страны. Методика калибровки для нескольких типов обеспечивает комплексный подход к калибровке и упрощает процедуры калибровки. Новая методика позволяет более точно оценить метрологические характеристики средства измерения и повышает достоверность результатов измерений. Данный подход оптимизирует процесс метрологического обеспечения, сокращает временные и материальные затраты, а также обеспечивает единообразие процедур калибровки для технически сходных средств измерений. В условиях технологического суверенитета развитие отечественных средств измерений является стратегически важной задачей, требующей координации усилий производителей, метрологических служб и регулирующих органов.

Ключевые слова: Измерительные установки, калибровка, эталоны, методы измерений, погрешность.

Введение

Безопасность движения при эксплуатации скоростных поездов «Ласточка» и «Сапсан» зависит от эксплуатационной надежности колесных пар, которая обеспечивается неразрушающим контролем. Комплекс автоматизированного ультразвукового контроля полых осей колесных пар SHUTTLE R (далее — комплекс)

контролирует оси колесных пар, установленные на подвижном составе, во время технического обслуживания.

Актуальность темы заключается в том, что экономические затраты при калибровке меньше, чем при поверке, и не требуется аккредитация в Росаккредитации.

Необходимость импортозамещения рассматривается в статье [1], в которой отмечено, что необходимо увеличить количество производства отечественных средств измерений.

Возможность калибровки SHUTTLE R

Результаты опроса, проведенного среди специалистов метрологических служб [2], свидетельствуют о том, что 87,7 % организаций пользуются услугами калибровки.

Средства неразрушающего контроля отсутствуют в перечне измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, поэтому при обслуживании подвижного состава могут быть калиброванными.

Комплекс (рис. 1) используется ООО «ВСМ-Сервис» для автоматизированного неразрушающего ультразвукового контроля при освидетельствовании и ремонте колесных пар электропоездов «Сапсан» и «Ласточка» с целью выявления внутренних и поверхностных дефектов.

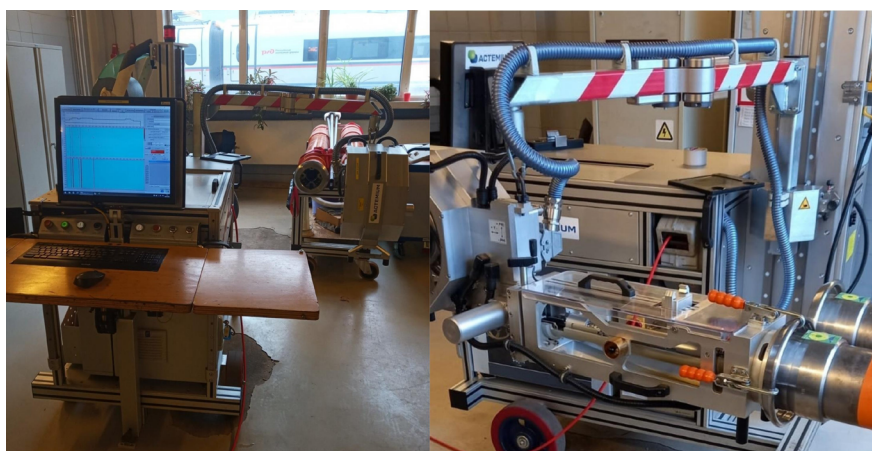


Рис. 1. Общий вид комплекса

Комплекс, согласно ГОСТ Р 8.1030 [3], относится к следующим видам измерений:

- 27 «Измерения геометрических величин»;
- 35 «Радиотехнические и радиоэлектронные»;
- 36 «Виброакустические измерения».

С помощью комплекса измеряют амплитуду эхосигналов, отраженных от дефектов, и координаты дефектов.

В Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений [4] содержатся сведения о трех утвержденных типах средства измерений «Комплекс автоматизированного ультразвукового контроля полых осей колесных пар SHUTTLE R» и один утвержденный тип «Установка ультразвукового контроля полых осей колесных пар SHUTTLE R». Для каждого типа средства измерений разработана методика поверки.

Поверку комплекса осуществляют научно-исследовательские институты и организации, аккредитованные в национальной системе аккредитации, такие как: ФГУП «ВНИИОФИ», ФГУП «ВНИИФТРИ», ФБУ «Тест-С.-Петербург», ООО «Алтек-Инвест».

Периодическая калибровка может выполняться центром метрологии, аккредитованным в Системе калибровки средств измерений ОАО «РЖД», в соответствии с областью аккредитации.

Для дефектоскопов ультразвуковых специализированных, применяемых для контроля подвижного состава, согласно рекомендации по межкалибровочным интервалам средств измерений № 335 [5], устанавливают межкалибровочный интервал 1 год.

Результаты и обсуждение

Сравнение метрологических характеристик разных типов комплексов в соответствии их описанием типа представлено на рис. 2.

В различных методиках поверки типов комплексов определяются следующие метрологические характеристики:

- 1) значение амплитуды импульсов возбуждения и длительность зондирующего импульса;
- 2) диапазон усиления и пределы допускаемой абсолютной погрешности установки усиления;
- 3) диапазон и пределы абсолютной погрешности измерений отношений амплитуд сигналов;
- 4) диапазон и пределы абсолютной погрешности измерений временных интервалов;
- 5) диапазон и пределы абсолютной погрешности измерений расстояния до дефекта.

По рис. 2 видно, что одни метрологические характеристики комплексов отличаются, а другие совпадают.

В методиках поверки используются разные средства поверки, часть которых являются импортными. В методике калибровки будут использоваться отечественные средства калибровки, аналогичные импортным средствам измерений.

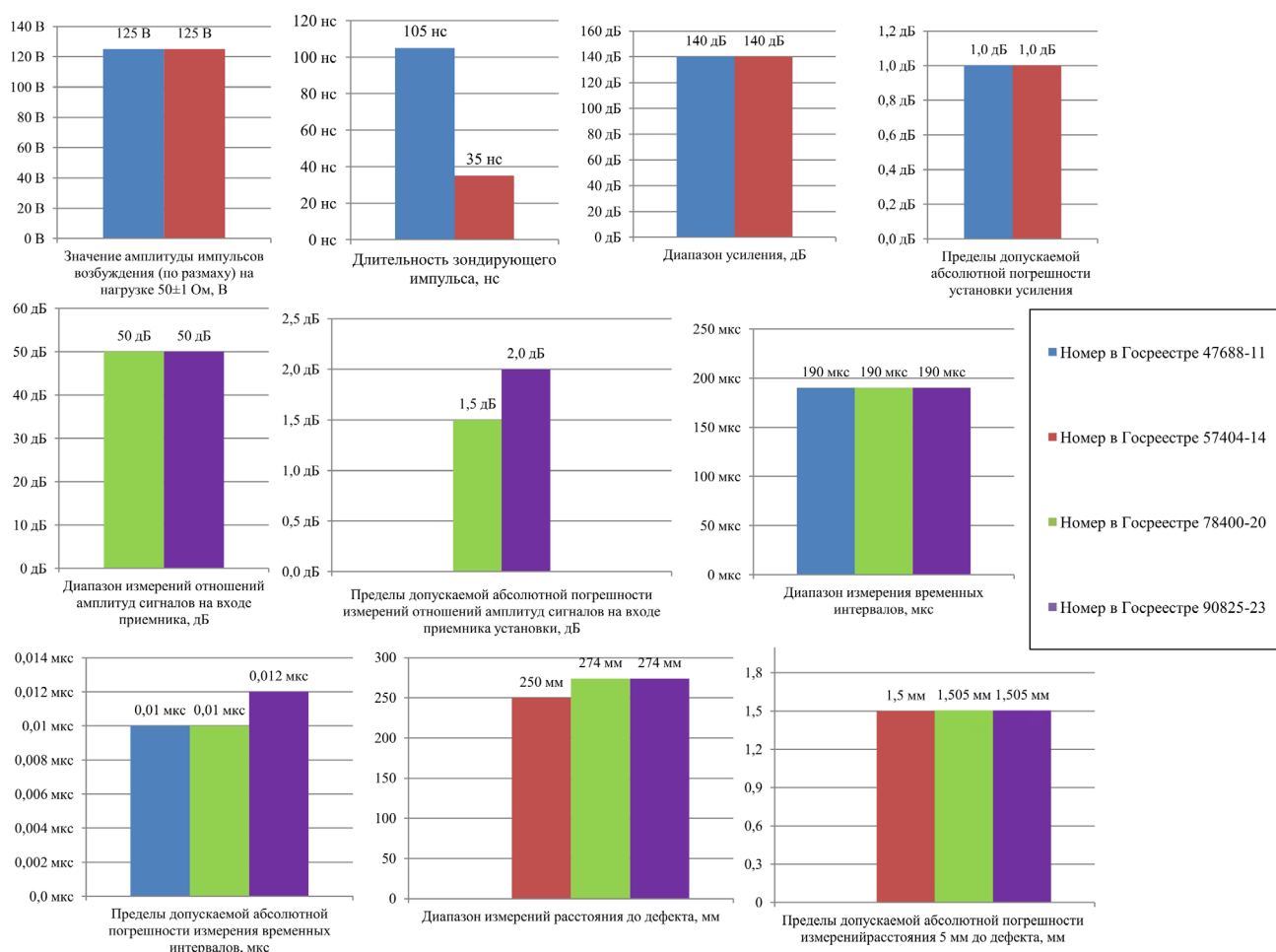


Рис. 2. Сравнение метрологических характеристик комплексов

Сравнение используемых средств поверки разных методик поверки и средств калибровки разрабатываемой методики калибровки представлено в табл. 1, в которой номер соответствует определяемой метрологической характеристике по порядку, представленному выше.

Синтезатор СС306 совмещает в себе функции осциллографа, генератора сигналов и аттенюатора. Прибор может генерировать тестовые сигналы, которые подаются на вход комплекса для определения метрологических характеристик.

Управление синтезатором сигналов производится через персональный компьютер. Имеется возможность создавать определенные сценарии в виде набора настроек для калибровки разных типов дефектоскопов. Компактная конструкция и малый вес прибора делают его оптимальным решением для мобильной калибровки комплексов на месте эксплуатации.

Значение амплитуды импульсов возбуждения и длительности зондирующего импульса измеряется синтезатором сигналов СС306, осциллограмма отображается на экране компьютера (рис. 3).

ТАБЛИЦА 1. Сравнение используемых средств поверки и средств калибровки

№	Методика поверки МП 07.86—2011	Методика поверки МП 109.Д4-13	Методика поверки МП 003.Д4-20	Методика поверки МП 651-23-033	Методика калибровки
1	Осциллограф цифровой TDS2012B	Осциллограф цифровой TDS2012B	—	—	Синтезатор сигналов СС306
2	Генератор сигналов сложной формы AFG3022, магазин затуханий М3-50-03	Генератор сигналов сложной формы AFG3022, магазин затуханий М3-50-03	—	—	Синтезатор сигналов СС306
3	—	—	Генератор сигналов сложной формы AFG3022, магазин затуханий М3-50-02	Генератор сигналов произвольной формы 33521В, аттенюатор ступенчатый ручной 8494В, аттенюатор ступенчатый ручной 8496В	Синтезатор сигналов СС306
4	Генератор сигналов сложной формы AFG3022	—	Генератор сигналов сложной формы AFG3022	Генератор сигналов произвольной формы 33521В, частотомер электронно- счетный ЧЗ-85/6	Синтезатор сигналов СС306, частотомер ПрофКиП ЧЗ-88
5	—	Комплект контрольных образцов и вспомогательных устройств КОУ-2	Комплект КОУ-2 Комплект мер ККО-3	Комплект мер для дефектоскопии АЗ-НК	Комплект мер ККО-3

Определение диапазона и абсолютной погрешности измерений отношений амплитуд сигналов на входе приемника установки, диапазона усиления и пределов допускаемой абсолютной погрешности установки усиления производится с помощью синтезатора сигналов СС306, который генерирует сигналы с определенной амплитудой и задержкой. Общая схема подключения представлена на рис. 4.

При определении диапазона и абсолютной погрешности измерений отношений амплитуд сигналов, а также диапазона усиления и пределов допускаемой абсолютной погрешности установки усиления передача единицы величины ослабления (усиления) электромагнитных колебаний производится в соответствии с государственной поверочной схемой [6].

Погрешность ослабления сигнала синтезатора сигналов в разных диапазонах колеблется от 0,1 до 0,3 дБ, что соответствует диапазону погрешности (0,01–5,0) дБ рабочих эталонов 2-го разряда.

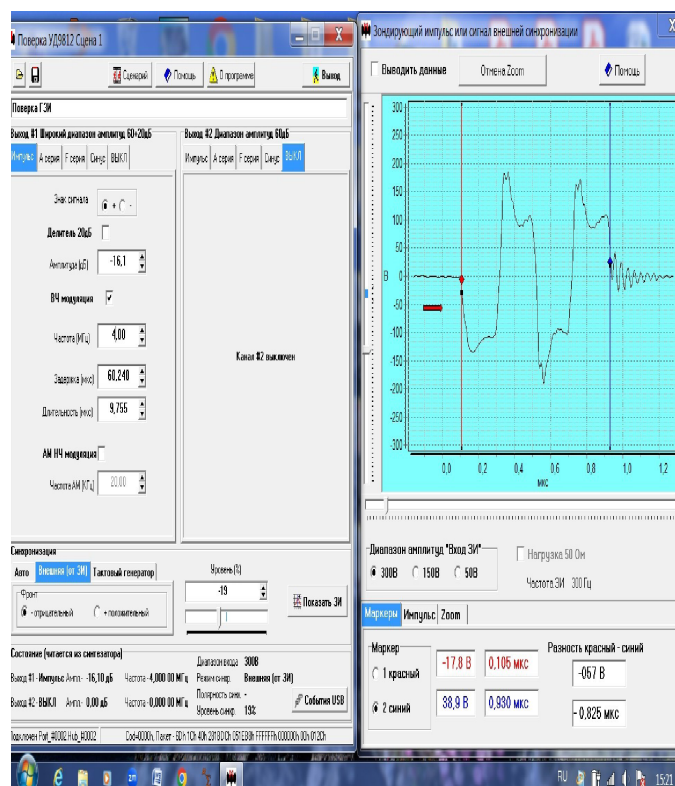


Рис. 3. Окно осциллографа

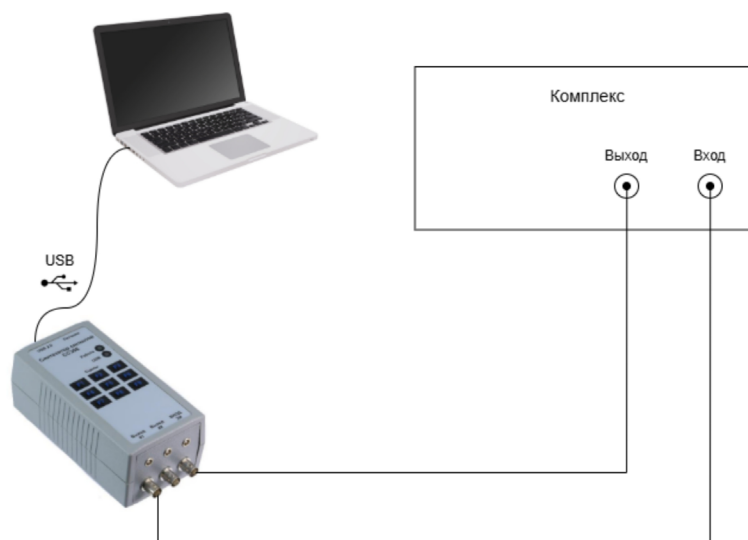


Рис. 4. Общая схема подключения

Передача единицы величины времени производится в соответствии с государственной поверочной схемой, утвержденной приказом № 2360 [7].

При определении диапазона и пределов абсолютной погрешности измерений временных интервалов используется частотомер универсальный ПрофКиП ЧЗ-88 в качестве эталона 4-го разряда. Схема подключения представлена на рис. 5.

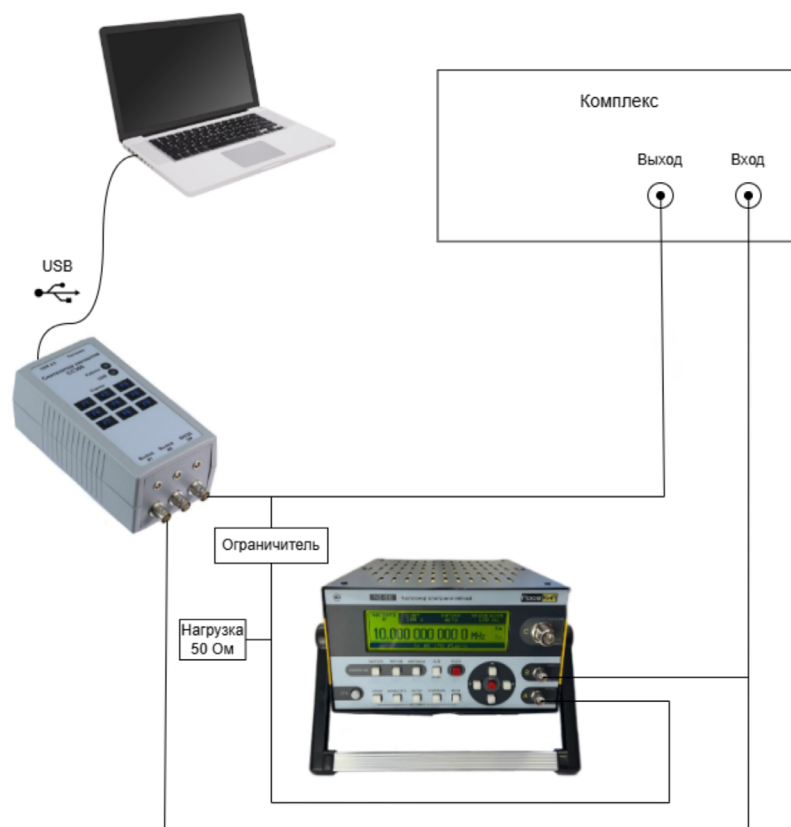


Рис. 5. Схема подключения для определения диапазона и абсолютной погрешности измерений временных интервалов

Определение диапазона и расчет абсолютной погрешности измерений расстояния до дефекта производится с помощью меры № 3 и меры № 3Р из комплекта мер ультразвуковых ККО-3.

По предложенной классификации в [8]: «Образцы первой группы предназначены для поверки (калибровки) ультразвукового оборудования и, по сути, представляют собой образцовые (эталонные) меры, воспроизводящие, наряду с геометрическими размерами, те или иные акустические характеристики, в частности скорость распространения ультразвуковых волн». Меры, предназначенные для калибровки, подтверждают метрологические характеристики средств ультразвукового контроля с требуемой точностью.

Предел допускаемых погрешностей всех рабочих эталонов должен быть как минимум в 3 раза меньше предела допускаемых погрешностей калибруемых средств измерений.

Сравнение метрологических характеристик средств калибровки со стандартом ГОСТ Р 55809—2013 [9] и требуемыми значениями при калибровке представлено на рис. 6.

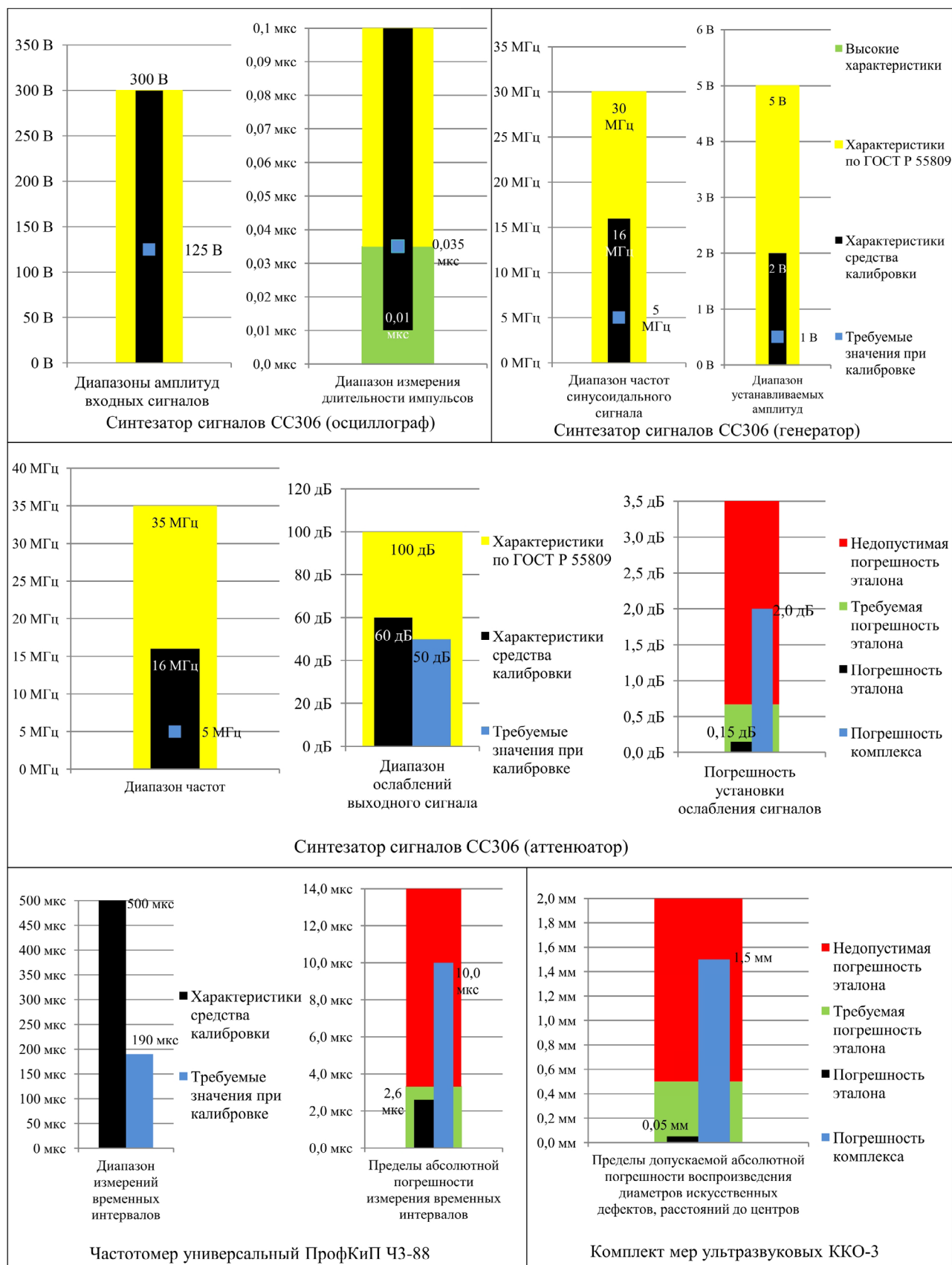


Рис. 6. Обоснование метрологических характеристик выбранных средств калибровки

На рис. 6 видно, что диапазон измерений средств калибровки обеспечивает воспроизведение и измерение требуемых значений при калибровке. Погрешность измерения временных интервалов частотомера в 3 раза меньше погрешности комплекса. Погрешность ослабления сигнала синтезатора сигналов на порядок меньше погрешности комплекса.

Сравнение характеристик импортных средств поверки со средствами калибровки представлено на рис. 7.

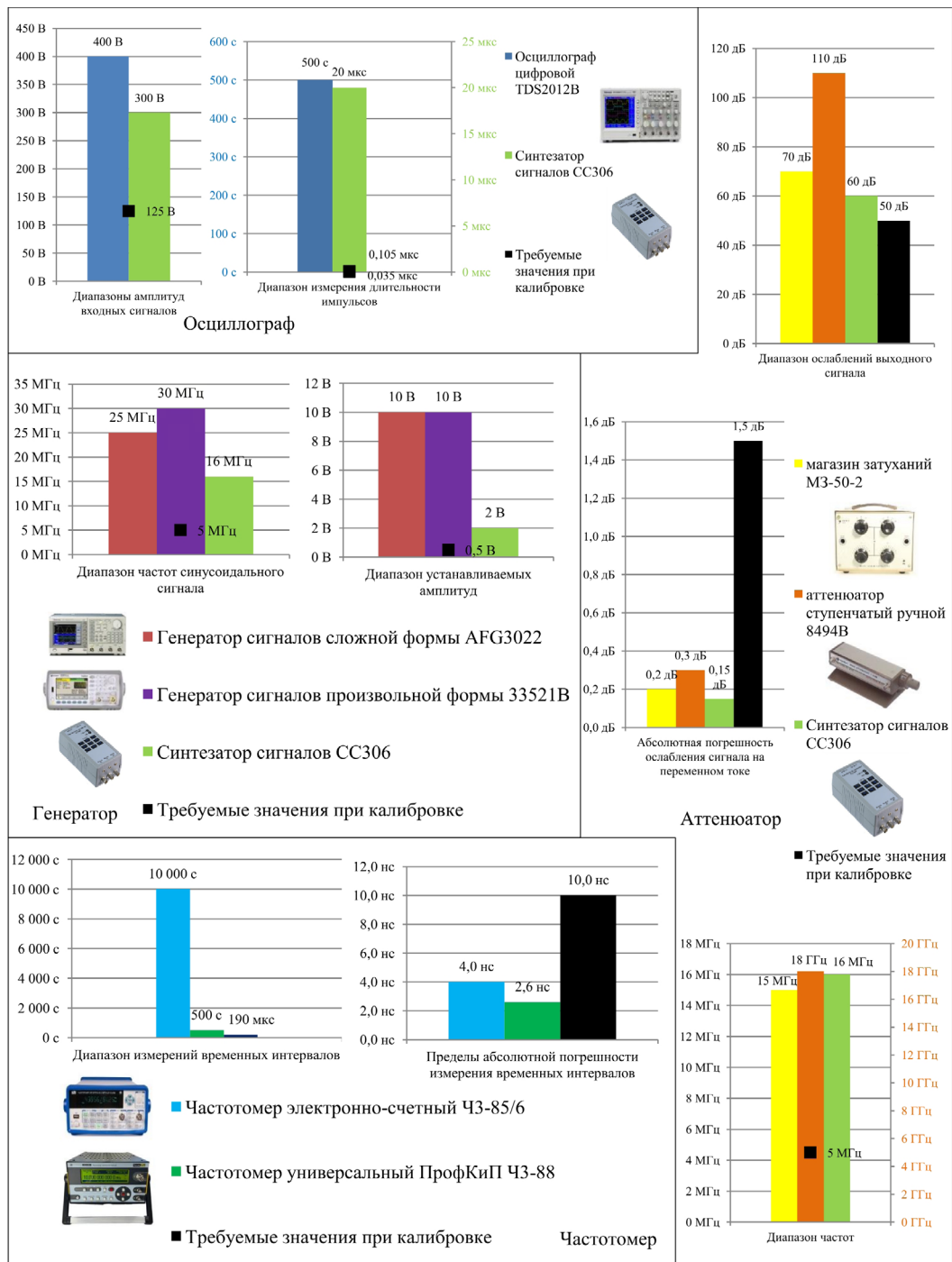


Рис. 7. Сравнение характеристик средств поверки со средствами калибровки

Погрешность ослабления сигнала синтезатора сигналов меньше, чем у импортных аналогов. Погрешность измерения временных интервалов частотомером универсальным ПрофКиП ЧЗ-88 меньше, чем у импортного частотомера электронно-счетного ЧЗ-85/6, поэтому его можно использовать для калибровки более ранних утвержденных типов комплекса.

Показатели, влияющие на качество неразрушающего контроля, рассматриваются в [10]: «Один из важнейших показателей — вероятность обнаружения дефекта».

На вероятность обнаружения влияет качество калибровки. Для оценки влияния факторов на качество калибровки используется диаграмма Исикавы, которая представлена на рис. 8.

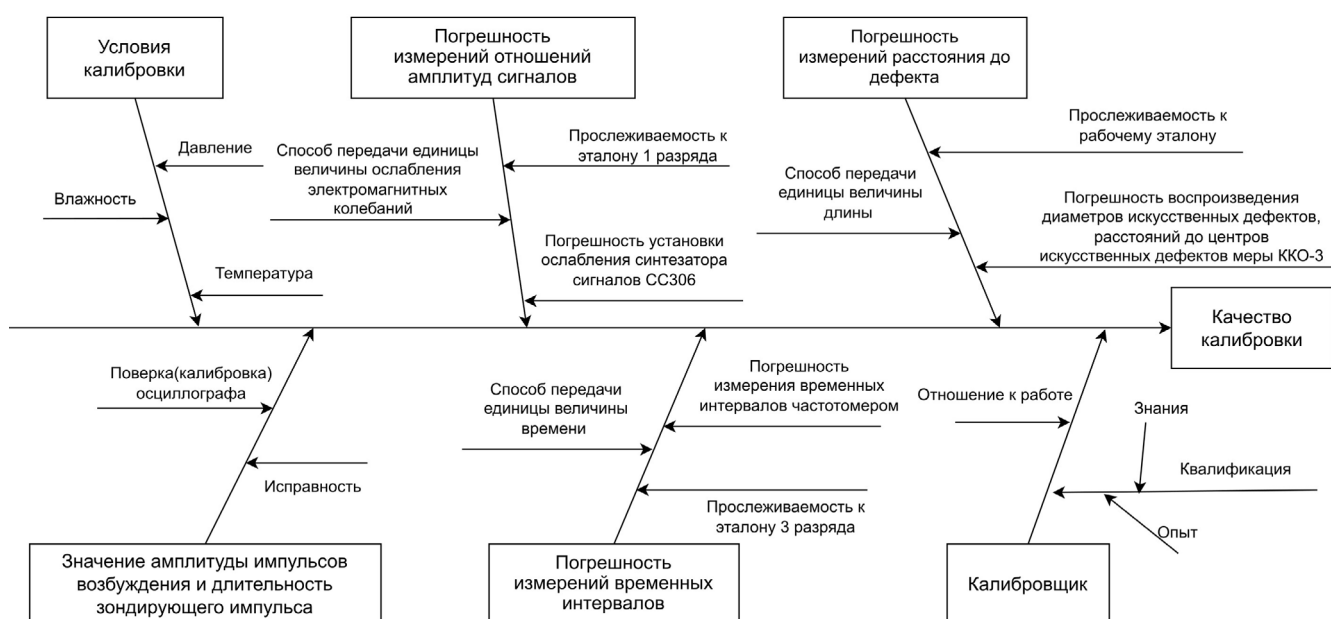


Рис. 8. Диаграмма Исикавы

В результате наиболее влияющим фактором является калибровщик, для минимизации данного фактора необходимо регулярное обучение калибровщиков. Для минимизации субъективной погрешности методика калибровки должна быть понятной и детализированной. Наиболее влияющими факторами являются погрешность измерений расстояния до дефекта, погрешность измерений временных интервалов, поэтому ультразвуковые меры и частотомер должны быть поверенными.

Заключение

Таким образом, проведен анализ различных типов комплексов и методик поверки и выяснено, что метрологические и технические характеристики практически идентичны и в методиках поверки определяются одинаковые метрологические

характеристики, это позволяет унифицировать подходы к калибровке, разработать единую методику калибровки для нескольких типов комплексов. Использование синтезатора сигналов СС306 обеспечивает мобильность и автоматизацию калибровки, что облегчает и ускоряет выполнение калибровочных операций. Реализация методики калибровки повысит эффективность калибровки и снизит зависимость от импортных средств измерений в рамках стратегии импортозамещения.

Список источников

1. Коршунов В. А. Актуальные вопросы современного развития радиотехнических и радиоэлектронных средств измерений / В. А. Коршунов, А. С. Корнев, А. М. Патапеня // Законодательная и прикладная метрология. — 2020. — № 4(166). — С. 30–35.
2. Макеева Н. А. Оценка востребованности услуг по калибровке эталонов и средств измерений / Н. А. Макеева // Компетентность/Competency (Russia). — 2018. — № 7. — С. 44–48.
3. ГОСТ Р 8.1030—2024. Государственная система обеспечения единства измерений. Классификация средств измерений. — М.: Российский институт стандартизации, 2024. — 102 с.
4. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений ФГИС «Аршин». — URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry> (дата обращения: 10.03.2025).
5. Система калибровки средств измерений в ОАО «РЖД». Межкалибровочные интервалы средств измерений (утверждены старшим вице-президентом В. А. Гапановичем от 31.10.2012 № 335; в ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 26.08.2020 № 1823/р). — М.: ОАО «РЖД», 2020.
6. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 декабря 2019 г. № 3383 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений ослабления напряжения постоянного тока и электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 20 Гц до 178,4 ГГц». — М.: Росстандарт, 2019.
7. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 сентября 2022 г. № 2360 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений времени и частоты». — М.: Росстандарт, 2022.
8. Зубарев А. С. Проблемы метрологического обеспечения мер (настроечных образцов) для ультразвукового метода неразрушающего контроля, выпускаемых в соответствии с ГОСТ Р 55724—2013 / А. С. Зубарев // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: труды XVI Международной научно-технической конференции, Суздаль, 09–12 октября 2023 года. — М.: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023. — С. 299–304.
9. ГОСТ Р 55809—2013. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Методы измерений основных параметров. — М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2013. — 16 с.
10. Иванов В. И. Метрологическая классификация методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики / В. И. Иванов, В. Н. Панчиков, И. Э. Власов // Мир измерений. — 2012. — № 6. — С. 3–7.

Дата поступления: 30.04.2025

Решение о публикации: 03.06.2025

Контактная информация:

БЕЛЕНЦОВ Юрий Алексеевич — д-р техн. наук, проф.; belets@mail.ru

ЕФИМОВ Валерий Дмитриевич — инженер I категории; Dashkin.valera@gmail.com

СОЛОВЬЕВ Вячеслав Сергеевич — студент; solovv130@gmail.com

Calibration of the Automated Ultrasonic Inspection System for SHUTTLE R Hollow Axle's Wheelsets

Yu. A. Belentsov¹, V. D. Yefimov², V. S. Solovyov¹

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

²Oktyabrsky Center of Metrology — structural unit Oktyabrskaya Railway — a branch of JSC “Russian Railways”, letter A, section of the railway “Ligovsky Canal-Pulkovskoe highway”, Saint Petersburg, 196240, Russian Federation

For citation: Belentsov Yu. A., Yefimov V. D., Solovyov V. S. Calibration of the Automated Ultrasonic Inspection System for SHUTTLE R Hollow Axle's Wheelsets. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 158–171. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-158-171

Summary

Purpose: To develop a calibration method, analyze the use of domestic calibration tools and compare them with foreign measuring tools. To undertake a feasibility assessment, with the aim of constructing a methodology for calibration. **Methods:** A comparison was made of the metrological characteristics of measuring instruments used in calibration, with analytical and graphical methods being utilized in the process. The risk assessment was conducted employing the Ishikawa diagram. **Results:** The potential for calibrating the complex of automated ultrasonic control of hollow axles of SHUTTLE R wheelsets using domestic measuring instruments has been ascertained. A comparison of the metrological characteristics of the calibrated measuring instruments made it possible to substantiate the expediency of developing a unified calibration methodology for several types of measuring instruments. The analysis of measurement methods, domestic measuring instruments, calibration standards, and their use has been justified. A thorough analysis of domestic calibration tools has revealed their capacity to fulfil the measurement tasks during the calibration process. The method of transmitting a unit of magnitude has been defined. An evaluation of the risks associated with the utilization of calibration techniques has been conducted. **Practical significance:** The introduction of domestic measuring instruments has been identified as a potential catalyst for stimulating the country's economy. The multi-type calibration methodology provides a comprehensive calibration approach and simplifies calibration procedures. The novel technique facilitates a more precise evaluation of the metrological characteristics of the measuring instrument and enhances the reliability of measurement outcomes. This approach is expected to enhance the metrological support process, reduce time and material costs, and ensure the uniformity of calibration procedures for technically similar measuring instruments. In the context of technological sovereignty, the development of domestic measuring tools is a strategically important task that requires coordination of efforts by manufacturers, metrological services and regulatory authorities.

Keywords: Measuring installation, calibration, etalons, measurement methods, measurement error.

References

1. Korshunov V. A., Kornev A. S., Patapenya A. M. Aktual'nye voprosy sovremennogo razvitiya radiotekhnicheskikh i radioelektronnykh sredstv izmereniy [Topical issues of modern development of radio engineering and radio electronic measuring instruments]. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya* [Legislative and Applied Metrology]. 2020, Iss. 4(166), pp. 30–35. (In Russian)
2. Makeeva N. A. Otsenka potrebovannosti uslug po kalibrovke etalonov i sredstv izmereniy [Assessment of the Relevance Calibration Services for Standards and Measuring Devices]. *Kompetentnost'* [Competency]. 2018, Iss. 7, pp. 44–48. (In Russian)
3. GOST R 8.1030—2024. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Klassifikatsiya sredstv izmereniy [GOST R 8.1030—2024. State system for ensuring the uniformity of measurements. Classification of measuring instruments]. 2024, 102 p. (In Russian)
4. Federal'nyy informatsionnyy fond po obespecheniyu edinstva izmereniy FGIS "Arshin" [Federal Information Fund for Ensuring Uniformity of Measurements FGIS "Arshin"]. Available at: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry> (accessed: March 10, 2025). (In Russian)
5. Sistema kalibrovki sredstv izmereniy v OAO "RZhD". Mezhhkalibrovochnye intervaly sredstv izmereniy (utverzhdeny starshim vitse-prezidentom V. A. Gapanovichem ot 31.10.2012 № 335; v red. rasporyazheniya OAO "RZhD" ot 26.08.2020 № 1823/r) [Calibration system for measuring instruments in JSC "Russian Railways". Calibration intervals of measuring instruments (approved by Senior Vice President V. A. Gapanovich dated 31.10.2012 № 335; as amended by the order of JSC "Russian Railways" dated 26.08.2020 № 1823/r)]. Moscow: OAO "RZhD" Publ., 2020. (In Russian)
6. Prikaz Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 30 dekabrya 2019 g. № 3383 "Ob utverzhdenii Gosudarstvennoy poverochnoy skhemy dlya sredstv izmereniy oslableniya napryazheniya postoyannogo toka i elektromagnitnykh kolebaniy v diapazone chastot ot 20 Gts do 178,4 GGts" [Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 30, 2019 № 3383 "On approval of the State Verification Scheme for measuring instruments of direct current voltage attenuation and electromagnetic oscillations in the frequency range from 20 Hz to 178.4 GHz"]. Moscow: Rosstandart Publ., 2019. (In Russian)
7. Prikaz Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 26 sentyabrya 2022 g. № 2360 "Ob utverzhdenii Gosudarstvennoy poverochnoy skhemy dlya sredstv izmereniy vremeni i chastoty" [Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 26, 2022 № 2360 "On approval of the State Verification Scheme for measuring instruments of time and frequency"]. Moscow: Rosstandart Publ., 2022. (In Russian)
8. Zubarev A. S. Problemy metrologicheskogo obespecheniya mer (nastroechnykh obraztsov) dlya ul'trazvukovogo metoda nerazrushayushchego kontrolya, vypuskaemykh v sootvetstvii s GOST R 55724—2013 [Problems of metrological support for measures (calibration samples) for the ultrasonic method of non-destructive testing, produced in accordance with GOST R 55724-2013]. *Akustoopticheskie i radiolokatsionnye metody izmereniy i obrabotki informatsii: trudy XVI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Suzdal', 09–12 oktyabrya 2023 goda* [Acousto-optic and radar methods of measurements and information processing: proceedings of the XVI

International Scientific and Technical Conference, Suzdal, October 9–12, 2023]. Moscow: Nauchno-tekhnologicheskiiy tsentr unikal'nogo priborostroeniya RAN Publ., 2023, pp. 299–304. (In Russian)

9. *GOST R 55809—2013. Kontrol' nerazrushayushchiy. Defektoskopy ul'trazvukovye. Metody izmereniy osnovnykh parametrov* [GOST R 55809—2013. Non-destructive testing. Ultrasonic flaw detectors. Methods of measuring the main parameters]. Moscow: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology Publ., 2013, pp. 16. (In Russian)

10. Ivanov V. I., Pinchukov V. N., Vlasov I. E. Metrologicheskaya klassifikatsiya metodov i sredstv nerazrushayushchego kontrolya i tekhnicheskoy diagnostiki [Meteorological classification of methods and means of non-destructive testing and technical diagnostics]. *Mir izmereniy* [World of Measurements]. 2012, Iss. 6, pp. 3–7. (In Russian)

Received: April 30, 2025

Accepted: June 03, 2025

Author's information:

Yuri A. BELENTSOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; belets@mail.ru

Valery D. YEFIMOV — Engineer of the First Category; Dashkin.valera@gmail.com

Vyacheslav S. SOLOVYOV — Student; solovv130@gmail.com

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 378:519.2

Центральная предельная теорема в задачах прогнозирования неуспеваемости студентов вузов**Р. С. Кударов, Р. С. Кударов**

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

Для цитирования: Кударов Р. С., Кударов Р. С. Центральная предельная теорема в задачах прогнозирования неуспеваемости студентов вузов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 172–189. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-172-189

Аннотация

Цель: В государственной программе «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» важное место отводится подготовке высококвалифицированных инженеров нового поколения, способных обеспечить стране достижение технологического суверенитета. Высшие учебные заведения страны преобразуются в передовые инженерные школы для выпуска специалистов, владеющих современными наукоемкими и мультидисциплинарными технологиями. Повышено внимание к дисциплинам первых лет обучения, без освоения которых дальнейшая учеба становится неполноценной. В настоящей статье приводится способ прогнозирования количества неуспевающих студентов, который призван оказать содействие в планировании мероприятий по обеспечению своевременного выполнения учебного плана. **Методы:** Прогнозирование количества неуспевающих студентов выполняется на основе центральной предельной теоремы. Применимость центральной предельной теоремы устанавливается по условию Ляпунова. Сходимость распределения количества неуспевающих студентов к закону Гаусса изучается с помощью неравенства Эссеена, при этом эмпирическая функция распределения моделируется методом Монте-Карло. **Результаты:** Построен доверительный интервал для оценки количества неуспевающих студентов при известных вероятностях неуспеваемости каждого студента. Введена поправка к надежности доверительного интервала на отклонение эмпирического распределения от закона Гаусса. **Практическая значимость:** Вычислен интервальный прогноз количества неуспевающих первокурсников на конец учебного года.

Ключевые слова: Центральная предельная теорема, закон Гаусса, метод Монте-Карло, Educational Data Mining, анализ образовательных данных, прогнозирование результатов обучения, прогнозирование неуспеваемости студентов.

Введение

Научная работа содержит результаты исследования, начатого введением случайной величины неуспеваемости отдельного студента и представляющего собой последовательное решение следующих задач: суммирование введенных случайных величин, запись предельной формы распределения суммы этих величин, оценка отклонения эмпирического распределения от его предельной формы,

построение доверительного интервала для оценки (т. е. прогнозируемого значения) количества неуспевающих студентов при известных вероятностях неуспеваемости каждого студента, введение поправки к надежности интервальной оценки на отклонение от предельного распределения. На основе реальных данных составляется интервальный прогноз количества неуспевающих студентов.

Публикуемые результаты направлены на достижение целей университета, относящихся к реализации федерального проекта «Передовые инженерные школы».

Центральная предельная теорема

Будем рассматривать неуспеваемость k -го студента как случайную величину:

$$X_k = \begin{cases} 1, & \text{если студент имеет задолженности,} \\ 0, & \text{если студент задолженностей не имеет.} \end{cases}$$

Тогда количество μ_n фактически неуспевающих студентов (среди общего числа n студентов) по итогам сессии представимо суммой:

$$\mu_n = X_1 + \dots + X_k + \dots + X_n,$$

в которой каждое слагаемое подчинено распределению Бернулли:

$$\begin{array}{c|c|c} x & 1 & 0 \\ \hline P(X_k = x) & p_k & q_k \end{array}, \quad (1)$$

где p_k — вероятность неуспеваемости k -го студента;

$q_k = 1 - p_k$ — вероятность успеваемости k -го студента.

Случайные величины, входящие в сумму μ_n , положим взаимно независимыми:

$$X_1, \dots, X_k, \dots, X_n \text{ — взаимно независимы;}$$

то есть примем тот факт, что по неуспеваемости отдельного студента (или группы студентов) нельзя сделать вывод о неуспеваемости остальных студентов.

Мы исключаем возможность того, что двух или более студентов все экзаменаторы сессии в равной мере аттестуют или не аттестуют. Например, если какой-либо студент успешно осваивает образовательную программу и в состоянии оказать академическую помощь одному или нескольким своим однокурсникам, то успешный результат по всем дисциплинам сессии никто гарантировать этим студентам не может. Обратный случай с побуждением сокурсников к уклонению от плана обучения упреждается постоянным мониторингом учебного процесса и воспитательной системой университета.

Также мы пренебрегаем маловероятными случаями, когда несколько студентов имеют общее, зависящее или независящее от чьей-либо воли, препятствие для

выполнения учебного плана в срок. Например, если в один из дней сессии произошел сбой в работе городского (или пригородного) транспорта, повлекший за собой неявку совокупности студентов на экзаменационное испытание, то у каждого студента этой совокупности без исключения возникнет академическая задолженность. Такие случаи возможны, но слишком редки, чтобы оказать существенное влияние на системный характер изучаемой в настоящей работе закономерности.

Возвращаясь к распределению Бернулли, приступим к суммированию случайных величин X_k . Если для отдельно взятого студента случайная величина $\mu_1 = X_1$ принимает одно из двух возможных значений (1 — «не успевает» или 0 — «успевает») и подчинена закону Бернулли, то для произвольной пары студентов сумма случайных величин $\mu_2 = X_1 + X_2$ имеет три возможных значения (2 — «не успевают оба», 1 — «не успевает один из двух», 0 — «успевают оба») и подчинена закону, отличному от распределения Бернулли:

x	2	1	0
$P(\mu_2 = x)$	$p_1 p_2$	$p_1 q_2 + q_1 p_2$	$q_1 q_2$

Распределение Бернулли не является устойчивым относительно суммирования. Однако при увеличении общего числа случайных величин X_k определенная закономерность все же формируется. При больших значениях n в распределении количества μ_n неуспевающих студентов особую роль приобретает закон Гаусса.

Придем к этому математически, используя результаты [1, с. 164–170].

Обозначив математическое ожидание и дисперсию суммы μ_n соответственно через

$$a_n = \sum_{k=1}^n M(X_k) = p_1 + \dots + p_n, \quad B_n = \sum_{k=1}^n D(X_k) = p_1 q_1 + \dots + p_n q_n,$$

введем нормированную сумму

$$\zeta_n = \frac{\mu_n - a_n}{\sqrt{B_n}}.$$

Теперь убедимся, что выполняется условие *Ляпунова*:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_d = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{C_n}{B_n^{1+d/2}} = 0,$$

где $C_n = c_1 + \dots + c_n$, $c_k = M|X_k - M(X_k)|^{2+d}$, $d > 0$.

Из распределения (1) случайных величин X_k вычислим абсолютные центральные моменты порядка $2 + d$:

$$M|X_k - M(X_k)|^{2+d} = p_k^{2+d} q_k + p_k q_k^{2+d} = p_k q_k \underbrace{(p_k^{1+d} + q_k^{1+d})}_{\leq 1} \leq p_k q_k,$$

сумму абсолютных случайных моментов:

$$C_n = \sum_{k=1}^n p_k q_k (p_k^{1+d} + q_k^{1+d}) \leq p_1 q_1 + \dots + p_n q_n$$

и предел:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_d \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{p_1 q_1 + \dots + p_n q_n}{(p_1 q_1 + \dots + p_n q_n)^{1+d/2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(p_1 q_1 + \dots + p_n q_n)^{d/2}} = 0.$$

Неотрицательность отношения L_d дает $\lim_{n \rightarrow \infty} L_d = 0$.

Выполнимости условия *Ляпунова* достаточно для выполнения условий *Линдеберга*, которые являются необходимыми и достаточными для асимптотической нормальности суммы независимых разнораспределенных случайных величин:

$$F(x) \rightarrow G(x),$$

где $F(x)$ — функция распределения нормированной суммы ζ_n ;

$G(x)$ — функция распределения стандартного закона Гаусса.

В силу *центральной предельной теоремы* теории вероятностей [2, с. 484] вероятность того, что количество фактически неуспевающих студентов μ_n будет удовлетворять неравенству

$$a_n + x_1 \sqrt{B_n} < \mu_n < a_n + x_2 \sqrt{B_n}, \quad (2)$$

стремится с ростом числа n студентов к определенному (от x_1 до x_2) интегралу от функции плотности вероятности стандартного закона Гаусса.

На практике предельное значение вероятности выполнения соотношения (2) или *уровень доверия* P находится с помощью функции $G(x)$ распределения стандартного закона Гаусса по формуле:

$$P = G(x_2) - G(x_1). \quad (3)$$

В анализе образовательных данных, при ограниченном числе студентов, отсутствие возможности наращивать n до приемлемой сходимости $F(x)$ к $G(x)$ порождает отклонения, при которых уравнение (3) будет нарушаться (например, вместо уровня доверия P будет иметь место $0,95P$ или $0,93P$).

В настоящей работе предполагается, что абсолютное отклонение Δ_n функции $F(x)$ от закона $G(x)$ оказывает аддитивное влияние на величину предельной вероятности P . При этом в качестве поправки берется максимально возможная ошибка, равная двум абсолютным отклонениям, поскольку в формуле (3) стандартный закон Гаусса используется дважды (в точках x_1 и x_2). В результате чего вводится понятие скорректированной предельной вероятности P_Δ , или *уровня доверия с поправкой на отклонение от закона Гаусса*, в виде:

$$P_\Delta = P - 2\Delta_n. \quad (4)$$

В качестве оценки величины Δ_n берется *теоретическое отклонение* $\delta_n^{\text{теор}}$, получаемое как $\delta_n^{\text{теор}} = AL_n$ из *неравенства Эссеена* [3, с. 139]:

$$\sup_x |F(x) - \Phi(x)| \leq AL_n, \quad (5)$$

где $F(x) = P\left(\bar{B}_n^{-1/2} \sum_{k=1}^n \bar{X}_k < x\right),$

$$L_n = \bar{B}_n^{-3/2} \sum_{k=1}^n M|\bar{X}_k|^3.$$

В неравенстве (5) участвуют центрированные случайные величины $\bar{X}_k = X_k - p_k$, сумма их дисперсий $\bar{B}_n = D(\bar{X}_1) + \dots + D(\bar{X}_n) = B_n$ и сумма абсолютных третьих моментов $\sum M|\bar{X}_k|^3 = \sum p_k q_k (p_k^2 + q_k^2)$.

Применимость неравенства Эссеена требует, сверх принятого выше, существования конечных абсолютных моментов третьего порядка:

$$M|X_k - p_k|^3 < \infty.$$

В этом несложно убедиться:

$$M|X_k - p_k|^3 = p_k q_k (p_k^2 + q_k^2) \leq 0,25 < \infty;$$

что и требовалось показать.

Значение числа A , впервые полученное в 1942 году, до сих пор продолжает улучшаться. В работе [4] наилучшим значением A названа оценка Шевцовой:

$$A = 0,469.$$

Теоретически, при неограниченных объемах выборки имеем:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_n = \lim_{n \rightarrow \infty} L_d|_{d=1} = 0,$$

$$\delta_n^{\text{теор}} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \text{ и } P_\Delta \xrightarrow{n \rightarrow \infty} P.$$

На деле контингент студентов вуза ограничен конечным числом M и максимально возможный объем выборки не превосходит этого числа. Для имеющегося контингента студентов при максимальном объеме выборки $n_{\max} = M$ поправка $2\Delta_n$ принимает фиксированное значение и регулировать P_Δ возможно лишь путем изменения P , при этом верхней границей P_Δ выступает $1 - 2\Delta_n$:

$$P_\Delta \xrightarrow{P \rightarrow 1} 1 - 2\Delta_n.$$

Вычисление отклонения Δ_n позволяет выполнять подгонку P_Δ к ее верхней границе с помощью графика нелинейной¹ зависимости P_Δ от параметра

$$c = \frac{P}{(1-P)},$$

который (параметр c) показывает, во сколько раз вероятность выполнения соотношения (2) превосходит вероятность его невыполнения.

Практический интерес в задачах прогнозирования количества неуспевающих студентов представляет не столько вычисление уровня доверия P при заданных границах интервала (x_1, x_2) , сколько построение симметричного относительно ожидаемого количества неуспевающих студентов интервала $(-x, x)$ для заданного уровня доверия P .

Следовательно, вместо соотношения (2) практичнее использовать происходящую из него формулу доверительного интервала для оценки количества μ_n неуспевающих студентов (среди n студентов):

$$P\left(\left|\mu_n - \sum_{k=1}^n p_k\right| < x \sqrt{\sum_{k=1}^n p_k q_k}\right) = 2\Phi(x) \quad (6)$$

или

$$P(|\mu_n - a_n| < \epsilon_\gamma) = \gamma, \quad (7)$$

где a_n — ожидаемое количество неуспевающих студентов;

γ — надежность доверительного интервала;

ϵ_γ — точность доверительного интервала при надежности γ .

Значение x вычисляется через функцию Лапласа:

$$x = \Phi^{-1}(\gamma / 2), \quad \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-z^2/2} dz.$$

В определенных случаях (табл. 1) вместо надежности γ целесообразно использовать *надежность γ_Δ с поправкой на отклонение эмпирической функции распределения от закона Гаусса*: $\gamma_\Delta = \gamma - 2\Delta_n$.

Для использования приведенных выше соотношений необходимо знать вероятности p_k неуспеваемости каждого студента исследуемого контингента. Поскольку истинные p_k узнать невозможно, на практике они замещаются статистическими вероятностями², вычисленными прогностической моделью, построенной на данных прошлого опыта. Так, для оценки вероятности p_k неуспеваемости

¹ Графически такая зависимость представляется более удобной для подгонки предельной вероятности, по сравнению с линейным уравнением (4).

² Вероятность p_k распределения Бернулли, которая является математическим ожиданием величины X_k , в статистическом моделировании рассматривается как выборочное условное математическое ожидание, зависящее от специально выбранных характеристик (факторов неуспеваемости) студентов.

ТАБЛИЦА 1. Рекомендации к выбору надежности доверительного интервала

Отклонение от закона Гаусса	Рекомендации к выбору надежности	
	Надежность	Примечание
$\Delta_n < 0,005$ (малое)	γ	При малом отклонении поправка не имеет смысла: $\gamma_\Delta \approx \gamma$
$0,005 \leq \Delta_n \leq 0,05$ (допустимое)	γ_Δ	При допустимом отклонении рекомендуется использовать поправку: $0,9 \cdot \gamma \leq \gamma_\Delta < \gamma$
$\Delta_n > 0,05$ (критическое)	$\gamma_\Delta^{\text{крит}}$ или γ^*	При критическом отклонении $\gamma_\Delta^{\text{крит}} < 0,9$ и, возможно, необходим поиск другого правила, взамен уравнения (6), с перерасчетом γ^*

первокурсников в текущем учебном году используется модель, обученная на экзаменационных оценках и характеристиках первокурсников прошлого учебного года.

В настоящей работе расчет теоретического отклонения $\delta_n^{\text{теор}}$, получаемого из неравенства Эссеена, сопровождается вычислением наблюдаемого отклонения $\delta_n^{\text{набл}}$ как наибольшего из абсолютных отклонений в узлах $x_i = 0, 1, 2, \dots, n, n+1$ построения эмпирической функции распределения $F_n(x)$:

$$\delta_n^{\text{набл}} = \max_{x_i} |F_n(x_i) - G_n(x_i)|,$$

где $G_n(x)$ — закон Гаусса, соответствующий эмпирической функции распределения $F_n(x)$.

Воспроизведение эмпирической функции распределения $F_n(x)$ подразумевает многократную сдачу одной и той же экзаменационной сессии теми же самыми n студентами при сохранении всех сопутствующих условий. Каждая из таких сессий называется *репликой* выборки n студентов.

В каждой i -й *реплике* мы наблюдаем за количеством $\mu_n^{(i)}$ неуспевающих студентов (среди n выбранных студентов). По итогам t *реплик* составляется наблюдаемое распределение количества μ неуспевающих студентов:

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} \mu_j & 0 & 1 & \dots & n \\ \hline w_j & w_0 & w_1 & \dots & w_n \end{array}, \quad (8)$$

где μ_j — возможные значения количества неуспевающих студентов;
 w_j — относительная частота появления μ_j в t *репликах*.

Тогда эмпирическая функция распределения $F_n(x)$ строится по уравнению:

$$F_n(x) = \sum_{\mu_j < x} w_j.$$

Закон Гаусса $G_n(x)$, соответствующий распределению (8), задается выборочными параметрами:

$$a_B = \sum_{j=0}^n w_j \mu_j,$$

$$s_B = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=0}^n w_j (\mu_j - a_B)^2}.$$

Поскольку осуществлять многочисленные выборки один и тех же n студентов с результатами единственной сессии не представляется возможным, задача исследования сходимости эмпирической функции распределения количества неуспевающих студентов к закону Гаусса неразрешима без привлечения методов статистических испытаний.

Метод Монте-Карло

Вообразим, что студент четыре раза проживает одну и ту же сессию. При своем студенту индекс $k=1$ и допустим, что на все время проведения эксперимента вероятность неуспеваемости этого студента оценивается как $p_1 = 0,3414$. Тогда случайная величина X_1 неуспеваемости данного студента задается следующим распределением вероятности:

x	1	0
$P(X_1 = x)$	0,3414	0,6586

Воображаемый эксперимент эквивалентен *четырем статистическим испытаниям по разыгрыванию случайной величины X_1 или разыгрыванию четырех значений случайной величины X_1* :

$$X_1^{(1)}, X_1^{(2)}, X_1^{(3)}, X_1^{(4)}.$$

Для осуществления статистических испытаний вводится непрерывная случайная величина R , распределенная равномерно в интервале $(0; 1)$. Возможные значения r равномерной случайной величины R называют *случайными числами*³.

Интервал $(0; 1)$ возможных значений случайной величины R делится величиной $p_1 = 0,3414$ на два промежутка:

$$(0; 0,3414] \quad (0,3414; 1).$$

Затем генерируются⁴ четыре случайных числа $r_1^{(1)}, r_1^{(2)}, r_1^{(3)}$ и $r_1^{(4)}$:

$$0,1009 \quad 0,7325 \quad 0,3376 \quad 0,5201.$$

³ Если быть точнее, используется не равномерно распределенная случайная величина, которая принимает значения с бесконечным числом десятичных знаков, а *квазиравномерная* случайная величина, значения которой имеют конечное количество знаков. В настоящей работе применяются *случайные числа* с четырьмя знаками после запятой.

⁴ Случайные числа выбраны из книги A Million Random Digits Random Digits with 100 000 Normal Deviates, первоначально опубликованной в 1955 году корпорацией RAND, у которой возникла потребность в генерации случайных чисел для решения задач методом Монте-Карло. В отечественной литературе первые 12 500 из миллиона этих случайных чисел содержатся в «Таблицах математической статистики» Л. Н. Большева и Н. В. Смирнова.

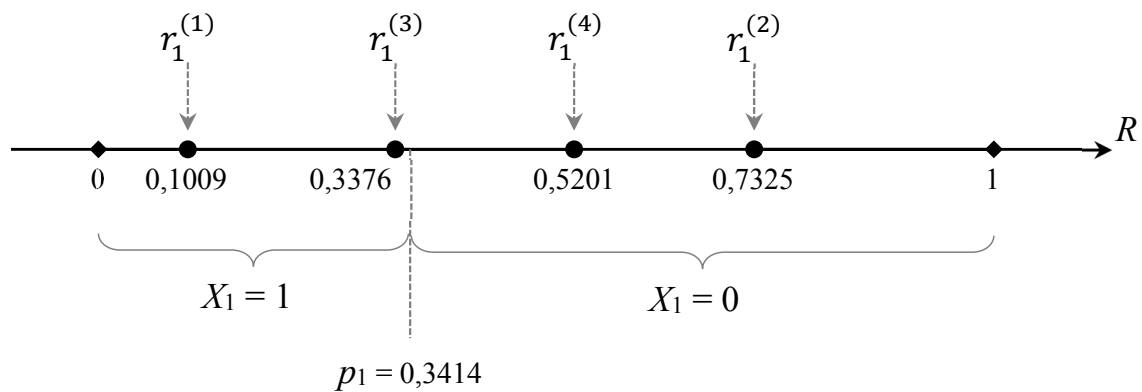


Рис. 1. Разыгрывание значений случайной величины

Поскольку $r_1^{(1)} = 0,1009$ попадает в промежуток $(0; 0,3414]$, то $X_1^{(1)} = 1$; аналогично получаем $X_1^{(2)} = 0$, $X_1^{(3)} = 1$ и $X_1^{(4)} = 0$ (рис. 1).

Итог воображаемого эксперимента таков: в первую и третью вымышленные жизни у студента возникли академические долги, а во вторую и четвертую — он сдал сессию без долгов.

Представим теперь, что в том же самом эксперименте вместо одного студента участвуют три студента. Двум новым студентам присвоим индексы $k = 2, 3$ и допустим, что оценки вероятности их неуспеваемости равны соответственно $p_2 = 0,3031$ и $p_3 = 0,7740$.

Для каждого нового студента сгенерируем четыре ($t = 4$) новых случайных числа. Генерацию новых случайных чисел выполним, не изменяя способ генерирования, но изменяя начальное положение генератора случайных чисел (*random state*)⁵.

Все результаты сведем в таблицу:

	i	1	2	3	4
$p_1 = 0,3414$	$r_1^{(i)}$	0,1009	0,7325	0,3376	0,5201
	$X_1^{(i)}$	1	0	1	0
$p_2 = 0,3031$	$r_2^{(i)}$	0,3754	0,2048	0,0564	0,8947
	$X_2^{(i)}$	0	1	1	0
$p_3 = 0,7740$	$r_3^{(i)}$	0,0842	0,2689	0,5319	0,6450
	$X_3^{(i)}$	1	1	1	1

Здесь i — порядковый номер статистического испытания или номер реплики.

⁵ Как и в первом эксперименте, здесь случайные числа выбраны из таблицы A Million Random Digits Random Digits with 100 000 Normal Deviates, при этом для каждого следующего студента выбор четырех случайных чисел произведен с начала новой (которая не использовалась до сих пор) строки. В этом случае начальным положением генератора случайных чисел служат номера взятых строк: *random state* = 1, 2, 3. Объем n выборки и *random state* являются гиперпараметрами, изменение которых влечет за собой изменение значений выборочных параметров a_B и S_B , вычисленных в статистических испытаниях.

Реплика $i=1$ дала сумму $\mu_3^{(1)} = X_1^{(1)} + X_2^{(1)} + X_3^{(1)} = 2$: в первую вымышленную жизнь среди группы 3 студентов оказалось 2 неуспевающих студента. Другие реплики дали $\mu_3^{(2)} = 2$, $\mu_3^{(3)} = 3$, $\mu_3^{(4)} = 1$.

Таким образом, методом Монте-Карло на основе четырех статистических испытаний ($t=4$) получено эмпирическое распределение случайной величины μ_3 :

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} \mu_j & 0 & 1 & 2 & 3 \\ \hline w_j & 0 & 1/4 & 1/2 & 1/4 \end{array}, F_3(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1 \\ 1/4, & 1 < x \leq 2 \\ 3/4, & 2 < x \leq 3 \\ 1, & x > 3 \end{cases}$$

Далее, вычислив выборочные параметры $a_B = 2$ и $s_B \approx 0,8165$ закона Гаусса, находим в узлах $x_i = 0, 1, 2, 3, 4$ абсолютные отклонения

x_i	0	1	2	3	4
$ F_3(x_i) - G_3(x_i) $	0,0072	0,1103	0,25	0,1397	0,0072

и получаем наблюдаемое отклонение $\delta_3^{\text{набл}}$ эмпирической функции распределения $F_3(x)$ от соответствующего закона Гаусса $G_3(x)$:

$$\delta_3^{\text{набл}} = 0,25 \quad (t=4).$$

При вычислении теоретического отклонения $\delta_3^{\text{теор}}$ проведение статистических испытаний не требуется, используются $p_1 = 0,3414$, $p_2 = 0,3031$ и $p_3 = 0,7740$:

$$\sum_{k=1}^3 M |\bar{X}_k|^3 = \sum_{k=1}^3 p_k q_k (p_k^2 + q_k^2) = 0,3595,$$

$$\bar{B}_3^{-3/2} = \left(\sum_{k=1}^3 p_k q_k \right)^{-3/2} = 2,0938,$$

$$\delta_3^{\text{теор}} = 0,353.$$

Нам удалось убедиться, что для трех студентов в четырех репликах наблюдаемое отклонение $\delta_3^{\text{набл}}$ не превосходит теоретического отклонения $\delta_3^{\text{теор}}$.

Наперед заметим, что изменение числа реплик t оказывает обратное влияние на величину наблюдаемого отклонения $\delta_n^{\text{набл}}$.

Уменьшив число статистических испытаний до $t=3$, отбрасыванием последней из приведенных выше реплик, получаем завышенное наблюдаемое отклонение:

$$\delta_3^{\text{набл}} = 0,2819 \quad (t=3).$$

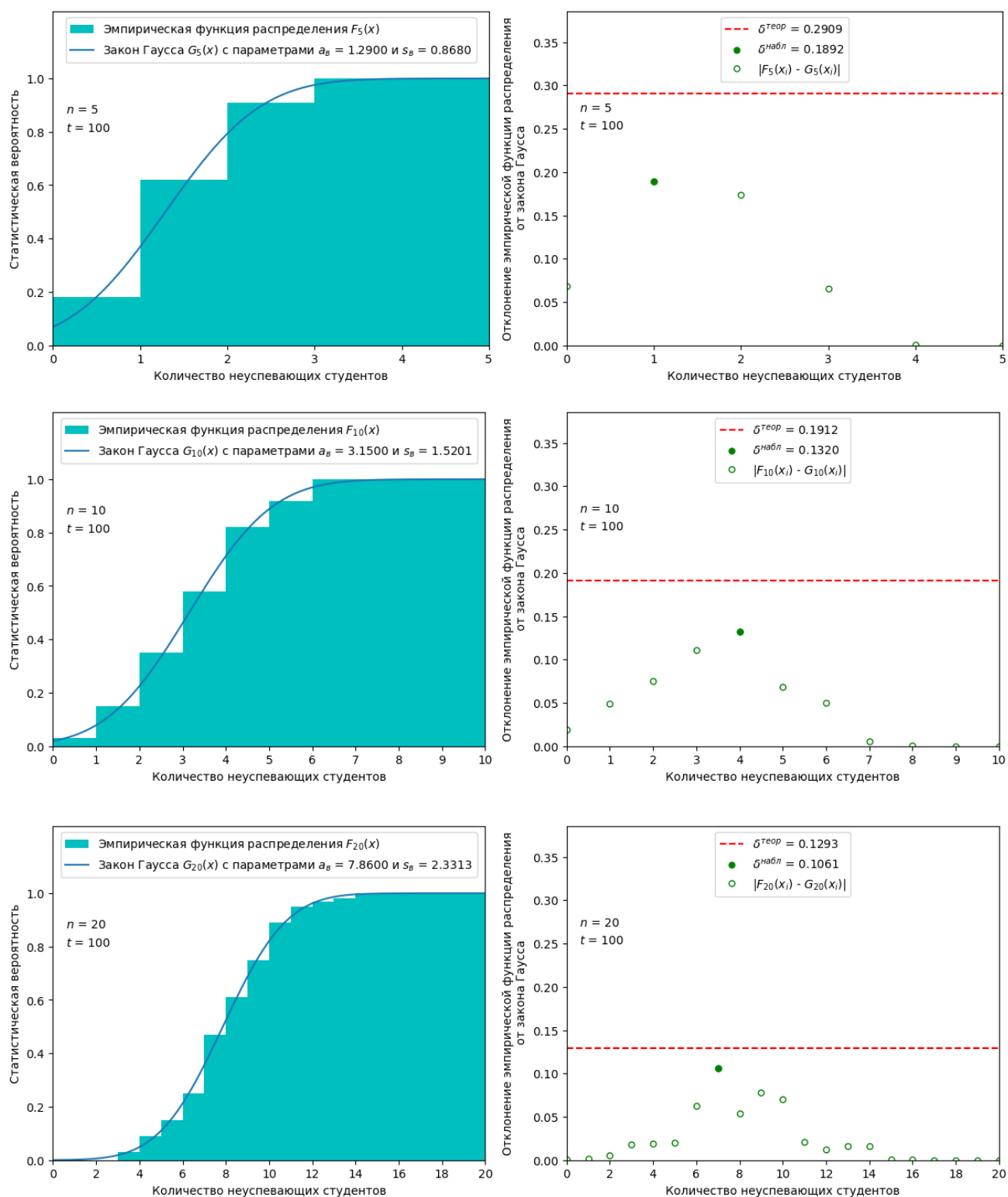


Рис. 2. Сопоставление эмпирического распределения количества неуспевающих студентов с законом Гаусса при наращивании объема выборки студентов $n = 5, 10, 20$ ($t = 100$ статистических испытаний)

Исследование сходимости распределения количества неуспевающих студентов к закону Гаусса

В начале 2023/24 учебного года вычислены прогнозные вероятности p_k неуспеваемости целого контингента 1232 студентов первого курса очной формы обучения ПГУПС⁶.

Выполнен предварительный анализ сходимости эмпирического распределения количества неуспевающих студентов к закону Гаусса при наращивании объема n выборки случайно отобранных студентов: $n = 5, 10, 20$. На рис. 2 приведено сопоставление эмпирического распределения количества неуспевающих студентов с соответствующим законом Гаусса. Результаты получены в $t = 100$ статистических испытаниях⁷.

На графиках рис. 2 видно, как при увеличении количества n студентов эмпирическая функция распределения сближается с законом Гаусса. Наблюдаемые отклонения не превосходят теоретического отклонения $\delta_n^{\text{теор}}$.

Проведено сопоставление эмпирического распределения количества неуспевающих студентов с законом Гаусса для целого контингента студентов $n = 1232$ (рис. 3). На левом графике различие визуально не заметно; на правом — видно, что наблюдаемое отклонение $\delta_{1232}^{\text{набл}} = 0,054$ в несколько раз превышает теоретическое отклонение $\delta_{1232}^{\text{теор}} = 0,0173$.

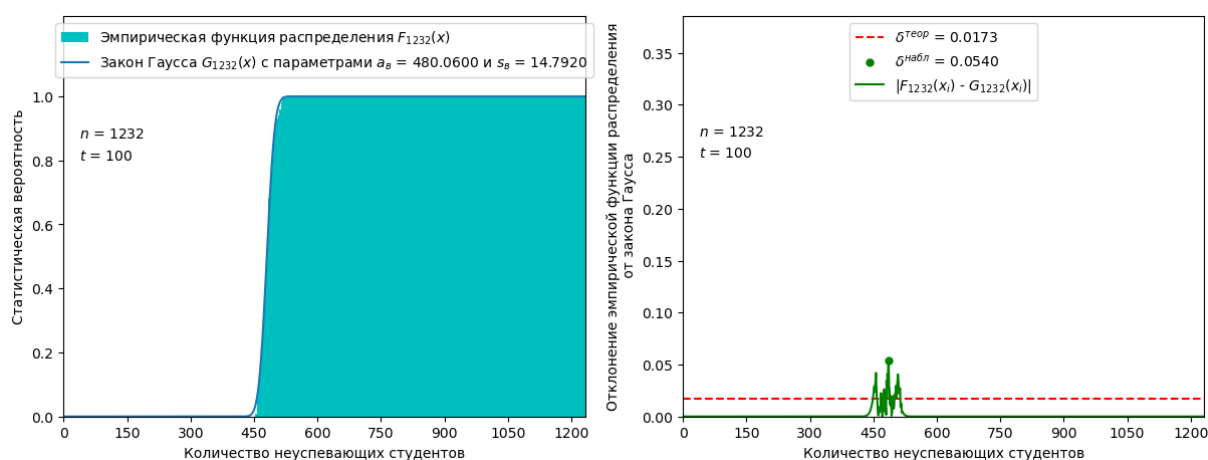


Рис. 3. Сопоставление эмпирического распределения количества неуспевающих студентов с законом Гаусса для целого контингента студентов $n = 1232$ ($t = 100$ статистических испытаний)

⁶ По состоянию на 6 сентября 2023 года.

⁷ Многократные статистические испытания построены на псевдослучайных числах, сгенерированных алгоритмом «Вихрь Мерсенна». Это наиболее популярный детерминированный и повторяемый алгоритм, разработанный в 1997 году. Последовательность чисел, порожденная им, статистически неотличима от истинно случайной и имеет период, равный числу с шестью тысячами знаков (Matsumoto M., Nishimura T. Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 1998, Vol. 8, Iss. 1, Pp. 3–30). Использована имплементация этого алгоритма в библиотеке NumPy для научных вычислений на языке Python.

Динамика наблюдаемого отклонения $\delta_{1232}^{\text{набл}}$ при увеличении числа t статистических испытаний изображена на рис. 4 (левый график).

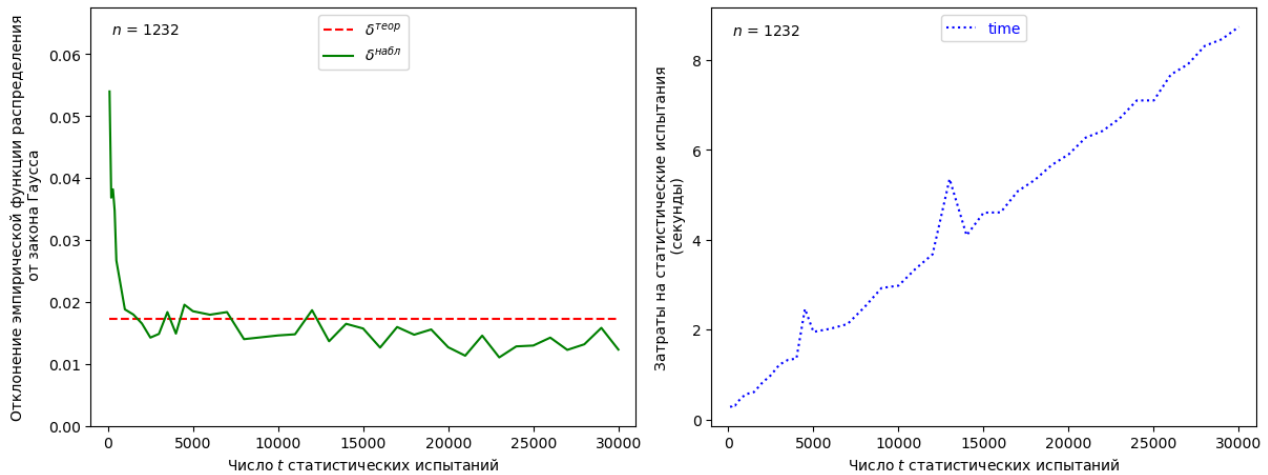


Рис. 4. График отклонения эмпирического распределения количества неуспевающих студентов от закона Гаусса и график затрат на статистические испытания при различных значениях числа t реплик

Из рис. 4 видно, что при числе $t > 15\,000$ статистических испытаний наблюдаемые отклонения $\delta_{1232}^{\text{набл}}$ не превосходят теоретического отклонения $\delta_{1232}^{\text{теор}} = 0,0173$. Если проведение статистических испытаний не связано с высокими затратами на их осуществление, то имеется возможность добиться уровня сходимости, не превышающего $\delta^{\text{теор}}$.

Увеличение числа t статистических испытаний обеспечивает выполнение неравенства $\delta^{\text{набл}} < \delta^{\text{теор}}$ и приближает выборочные параметры a_B, s_B к теоретическим параметрам a_n и $b_n = \sqrt{B_n}$ (рис. 5).

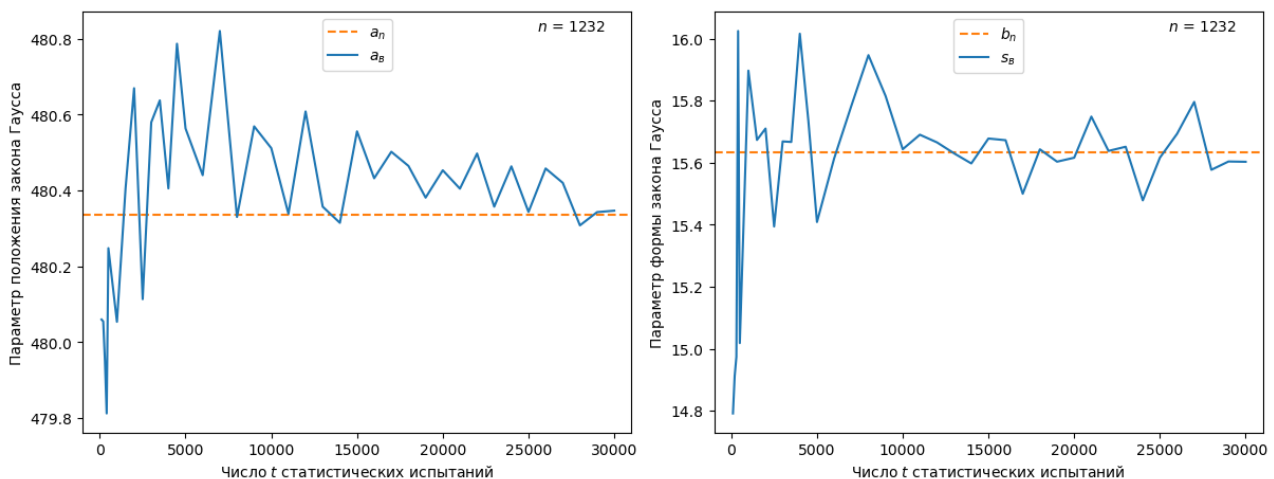


Рис. 5. Графики параметров положения и формы закона Гаусса при различных значениях t числа реплик

После проведения $t = 100\,000$ статистических испытаний для целого контингента студентов $n = 1232$ имеем практически совпадающие значения параметров $a_B \approx a_n$ и $s_B \approx b_n$:

$$\begin{aligned} a_B &= 480,3351 & a_n &= 480,3346; \\ s_B &= 15,6116 & b_n &= 15,6343 & (B_n &= 244,4305). \end{aligned}$$

Таким образом, установлено, что функция распределения количества неуспевающих студентов (среди целого контингента $n = 1232$ студентов набора 2023 года) сходится к закону Гаусса с параметрами $a_n = 480,3346$ и $B_n = 244,4305$. Оценка отклонения Δ_n равна 0,0173.

Доверительный интервал для оценки ожидаемого количества неуспевающих студентов

В качестве надежности доверительного интервала выбирается значение $\gamma = 0,9995$, которое обеспечивает достаточную близость γ_Δ к верхней границе $1 - 2\Delta_n = 0,9654$. Дальнейшее увеличение γ не дает существенного прироста надежности γ_Δ с поправкой (рис. 6).

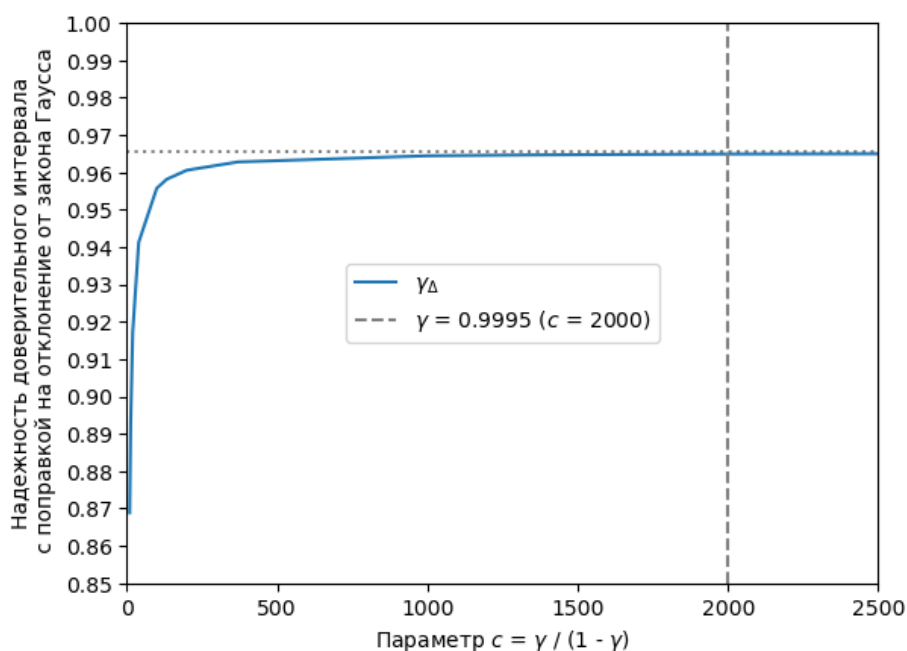


Рис. 6. Подгонка надежности γ_Δ с поправкой к верхней границе $1 - 2\Delta_n = 0,9654$

При $\gamma = 0,9995$ имеем $x = 3,4808$ и по формуле (6) получаем

$$P(|\mu_{1232} - 480,3346| < 54,4199) = 0,9995.$$

Таким образом, в начале 2023/24 учебного года получен следующий прогноз с учетом поправки $2\Delta_n = 0,0346$: количество μ неуспевающих студентов окажется в интервале (426; 535) с надежностью $\gamma_n = 0,9649$.

Часть распределения количества неуспевающих студентов, соответствующая интервалу (426; 535), выделена на графиках рис. 7. В этом интервале (с учетом поправки) заключено 96,49 % всех ожидаемых исходов. Исходы за пределами этого интервала относятся к практически невозможным событиям: с вероятностью 0,0351 количество неуспевающих студентов окажется меньше 426 или более 535.

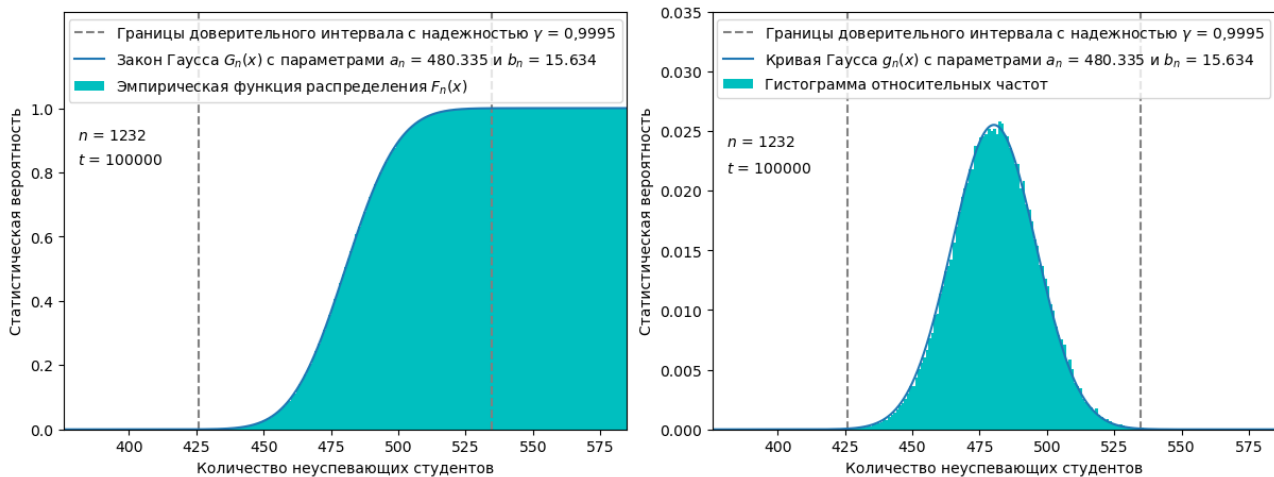


Рис. 7. Границы доверительного интервала

Смысл поправки в том, что с ее учетом в несколько раз возрастают вероятности экстремальных значений:

без поправки	с поправкой
$P(\mu_{1232} < 426) = 0,00025$	$P_{\Delta}(\mu_{1232} < 426) = 0,01755$
$P(\mu_{1232} > 535) = 0,00025$	$P_{\Delta}(\mu_{1232} > 535) = 0,01755$

Отклонение распределения количества неуспевающих студентов от соответствующего закона Гаусса на величину $\Delta_n = 0,0173$ приводит к увеличению вероятностей экстремальных значений в 70 раз.

Из рис. 7 видно также, что наряду со сходимостью функций распределений имеет место сходство формы гистограммы относительных частот с формой кривой Гаусса

$$g_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 244,4305}} e^{-\frac{(x-480,3346)^2}{2 \cdot 244,4305}}.$$

Сравнение с классическим доверительным интервалом

Классический доверительный интервал, получаемый из интегральной теоремы Муавра — Лапласа, использует величину p , которая определяется как доля неуспевающих студентов в завершившемся учебном году. Такой интервал

равносителен построенному в настоящей работе доверительному интервалу (6), в котором все p_k постоянны и равны p .

Известно, что в завершившемся 2022/23 учебном году доля неуспевающих студентов составила 0,38 от целого контингента первокурсников. При $p = 0,38$ классический доверительный интервал для оценки количества неуспевающих студентов в 2023/24 учебном году оказывается более смещенным относительно истинного⁸ $\mu_{1232} = 496$ по сравнению с построенным в настоящей работе интервалом (рис. 8).

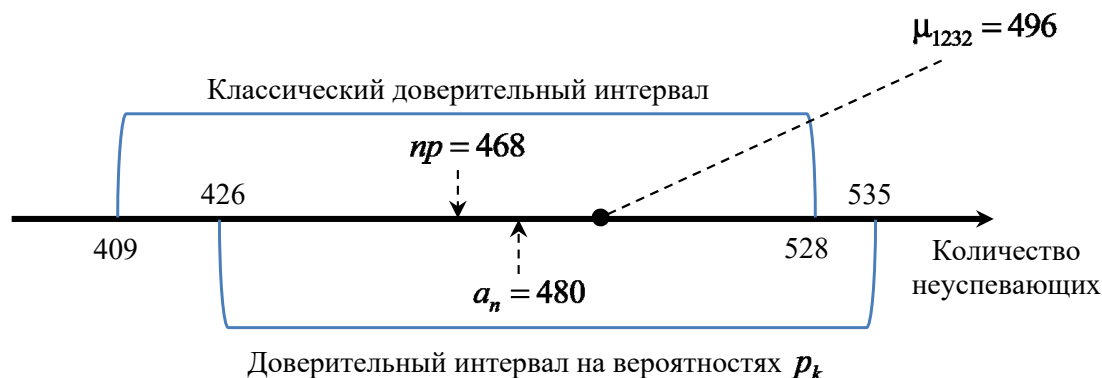


Рис. 8. Границы доверительных интервалов

Параметризация интервального прогноза

Положение и размер доверительного интервала (7) определяется несколькими величинами:

величина	тип	зависимость
a_n	параметр	звисит от p_k
ϵ_γ	параметр	зависит от p_k и γ
p_k	гиперпараметры	назначаются прогностической моделью
γ, γ_Δ	гиперпараметры	выбираются исследователем

Заключение

В настоящей статье обоснована особая роль закона Гаусса в задаче прогнозирования ожидаемого количества неуспевающих студентов. На основе центральной предельной теоремы построен доверительный интервал для прогнозного количества неуспевающих студентов при известных вероятностях их неуспеваемости. Применимость центральной предельной теоремы установлена по условию Ляпунова. Для оценки отклонения функции распределения количества неуспевающих студентов от закона Гаусса использовано неравенство Эссеена, в котором

⁸ Количество неуспевающих первокурсников по состоянию на 1 июня 2024 года.

построение эмпирической функции распределения выполнено методом статистических испытаний Монте-Карло. Предложено использовать вычисленную оценку отклонения для поправки к надежности доверительного интервала.

Теоретические предложения апробированы на реальных данных студентов первого курса ПГУПС. Изучена сходимость эмпирического распределения количества неуспевающих студентов к закону Гаусса. Показано, что отклонения порядка 0,01–0,02 от закона Гаусса приводят к тому, что в десятки раз возрастают вероятности экстремальных значений.

Приведена параметризация интервального прогноза, из которой видно, что положение и размер доверительного интервала определяются оптимальностью прогнозной модели, используемой для вычисления вероятностей неуспеваемости студентов, и заявленным уровнем надежности. Оба обстоятельства требуют дальнейшего рассмотрения. Касательно выбора уровня надежности будет полезно, если руководство установит пределы для практической достоверности (достаточно ли 0,99; 0,999; 0,9995 или требуется этот уровень увеличить). Это обращение к руководству в свое время упоминал Якоб Бернулли в одной из аксиом своего труда «Искусство предположений» [5, с. 31].

Список источников

1. Боровков А. А. Теория вероятностей / А. А. Боровков. — М.: Эдиториал УРСС, 1999. — 472 с.
2. Математический энциклопедический словарь / Гл. ред. Ю. В. Прохоров; ред. кол.: С. И. Адян, Н. С. Бахвалов, В. И. Битюцков, А. П. Ершов и др. — М.: Сов. энциклопедия, 1988. — 847 с.
3. Петров В. В. Суммы независимых случайных величин / В. В. Петров. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972. — 416 с.
4. Zolotukhin A. On a bound of the absolute constant in the Berry-Esseen inequality for i.i.d. Bernoulli random variables / A. Zolotukhin, V. Nagaev, V. Chebotarev // Modern Stochastics Theory and Applications. — 2018. — Vol. 5(3). — Pp. 1–26. — DOI: 10.15559/18-VMSTA113.
5. Бернулли Я. О законе больших чисел: Пер. с лат. / Я. Бернулли. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 176 с.

Дата поступления: 27.01.2025

Решение о публикации: 13.03.2025

Контактная информация:

КУДАРОВ Руслан Серикович — канд. техн. наук, доц.; r.s.kudarov@gmail.com

КУДАРОВ Руслан Серикович — канд. техн. наук, доц.; kudarovrs@mail.ru

Central Limit Theorem Applied to Predicting Underachievement among University Students

R. S. Kudarov, R. S. Kudarov

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

For citation: Kudarov R. S., Kudarov R. S. Central Limit Theorem Applied to Predicting Underachievement Among University Students. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, Pp. 172–189. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-172-189

Summary

Purpose: The State Programme “Scientific and Technological Development of the Russian Federation” gives an important place to the training of a new generation of highly qualified engineers capable of ensuring the country’s technological sovereignty. Higher education institutions are being transformed into “advanced engineering schools” to train specialists in modern knowledge-intensive and multidisciplinary technologies. Greater attention is being paid to the disciplines of the first years of study, without which further study is incomplete. This article presents a method for predicting the number of underachieving students, which should help in planning measures to ensure timely implementation of the curriculum. **Methods:** The prediction of the number of underachieving students is based on the central limit theorem. The applicability of the central limit theorem is established using the Lyapunov condition. The convergence of the distribution of the number of underachieving students to Gauss’s law is studied using the Esseen inequality, while the empirical distribution function is modelled using the Monte Carlo method. **Results:** A confidence interval is constructed to estimate the number of underachieving students with known probabilities of underachievement for each student. A modification has been introduced to the reliability of the confidence interval for the deviation of the empirical distribution from Gauss Law. **Practical significance:** The interval prediction of the number of underachieving first-year students at the end of the academic year has been calculated.

Keywords: The central limit theorem, Gauss Law, Monte Carlo method, Educational Data Mining, educational data analysis, forecasting learning outcomes, prediction of student underachievement.

References

1. Borovkov A. A. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Editorial URSS Publ., 1999, 472 p. (In Russian)
2. *Matematicheskiiy entsiklopedicheskiy slovar’*. Gl. red. Yu. V. Prokhorov; red. kol.: S. I. Adyan, N. S. Bakhvalov, V. I. Bityutskov, A. P. Ershov i dr. [Mathematical encyclopedic dictionary. Ch. ed. Yu. V. Prokhorov; ed. quantity: S. I. Adyan, N. S. Bakhvalov, V. I. Bityutskov, A. P. Ershov et al.]. Moscow: Sov. entsiklopediya Publ., 1988, 847 p. (In Russian)
3. Petrov V. V. *Summy nezavisimyykh sluchaynykh velichin* [Sums of independent random variables]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit. Publ., 1972, 416 p. (In Russian)
4. Zolotukhin A., Nagaev V., Chebotarev V. On a bound of the absolute constant in the Berry-Esseen inequality for i.i.d. Bernoulli random variables. *Modern Stochastics Theory and Applications*, 2018, vol. 5(3), Pp. 1–26. DOI: 10.15559/18-VMSTA113.
5. Bernulli Ya. *O zakone bol’shiikh chisel: Per. s lat.* [On the law of large numbers: Trans. from Latin]. M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit. Publ., 1986, 176 p. (In Russian)

Received: January 27, 2025

Accepted: March 13, 2025

Author’s information:

Ruslan S. KUDAROV — PhD in Engineering, Associate Professor; r.s.kudarov@gmail.com

Rustem S. KUDAROV — PhD in Engineering, Associate Professor; kudarovrs@mail.ru

УДК 330.322.2

Экономическая политика зеленой экономики: от энергетических шоков к устойчивому развитию

В. М. Шавшуков¹, М. Т. Рахимов²

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

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

Для цитирования: Шавшуков В. М., Рахимов М. Т. Экономическая политика зеленой экономики: от энергетических шоков к устойчивому развитию // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 190–202. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-190-202

Аннотация

Денежно-кредитная политика трансформируется в ключевой механизм поддержания экономической устойчивости в контексте глобальных климатических изменений и перехода к низкоуглеродной экономической модели. **Цель:** Заключается в разработке теоретической базы для модернизации монетарных стратегий, направленных на преодоление рисков, связанных с удорожанием энергоресурсов, и содействие реализации экологически ориентированной трансформации экономических систем. **Методы:** С помощью методов статистики, сравнения и прогнозирования анализируется влияние шока цен на экономический рост и энергобезопасность, оценивается поток инвестиций в зеленую экономику. **Результаты:** Показано, что технологически неподготовленный переход к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) вызвал энергокризис 2020–2023 гг., рост цен на энергоносители и инфляцию. Структурирование антикризисных мер позволило выявить противоречия между ростом ключевых ставок и замедлением экономического развития, зеленым переходом и инфляцией. Подтверждена необходимость инвестиций в зеленую экономику, проведения мягкой монетарной политики для создания новых рабочих мест в секторе ВИЭ, снижения затрат на энергоносители, улучшения качества жизни, доступа к устойчивой энергетике, сохранения экосистем и адаптации к климатическим изменениям. Сравнительный анализ страновых зеленых стратегий в условиях высоких цен на энергоресурсы показал необходимость, во-первых, баланса между экономическим ростом и экологической устойчивостью, во-вторых — интеграции зеленых финансов в денежно-кредитную политику и корпоративные финансы.

Ключевые слова: Энергетический шок, инфляция, экономическая политика, энергокризис 2020–2023 гг., зеленый переход, зеленая экономика.

Введение

Мировая экономика XXI века находится в условиях перехода к шестому технологическому укладу (в рамках которого наука и бизнес сосредоточили организационные, финансовые усилия на поиск, апробацию и принятие инновационных технологически и экономически приемлемых решений энергетики будущего), сопровождаемому глобальным изменением климата, обострением геоэкономических и геополитических противоречий.

Во времени и пространстве совпали конфликт старых и новых технологий, энергоресурсов, стоимости воспроизводственного процесса, инфляции, потребления, конкурентоспособности бизнеса и национальных экономик. С одной стороны, эти явления, включая энергетические шоки 2021–2022 гг., спровоцировали инфляцию, вынудили центральные банки ужесточать денежно-кредитную политику, с другой — сдерживали финансирование зеленых проектов. Вместе с тем именно зеленый переход рассматривается ООН, международными экономическими организациями и правительствами как стратегическое направление в обеспечении долгосрочной энергетической безопасности.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска баланса между краткосрочными антиинфляционными мерами и долгосрочными инвестициями в устойчивое экономическое развитие с использованием зеленой энергетики. Научно-практическое значение имеет систематизация мер и инструментов денежно-кредитной политики, влияющих на экологическую экономику в условиях энергетической нестабильности. В рамках исследования с помощью методов статистики, сравнения и прогнозирования решаются задачи оценки влияния высоких цен на энергоносители, на инфляцию и экономический рост; эффекты зеленых финансов в снижении энергозависимости от традиционных источников энергии; сравнения стратегий ЕС, Китая, Индии и США по включению экологических целей в экономическую политику развитых и развивающихся стран. Цель исследования состоит в обосновании инновационных решений в денежно-кредитной политике в условиях высоких цен на энергоносители и обеспечения зеленого перехода.

Материалы и методы исследования

Исследование подготовлено по материалам ООН, международных и национальных экономических, финансовых, статистических и экологических организаций, законодательных актов Российской Федерации, решений, научных работ. С помощью методов статистики, сравнения и прогнозирования анализируется влияние шока энергетических цен на экономический рост и энергобезопасность, оценивается поток инвестиций в зеленую экономику.

Результаты исследования и их обсуждение

Контроль инфляции, содействие зеленому переходу с помощью процентных ставок

Энергетические кризисы с 1970-х гг. XX века стали составной частью противоречий мировой экономики, драйверами геополитических, финансовых и технологических решений. Общая их природа заключается в превышении совокупного спроса (AD) на энергоносители над совокупным предложением (AS). Яркий тому пример — кризис 1973 г., когда ОПЕК, снизив объем добычи на 5 %, вызвал рост цен на 70 %, привел, с одной стороны, к глубоким структурным изменениям в автомобильной промышленности США, с другой, и это более значимо для мировой экономики, — девальвации доллара США к золоту на 11 %, переходу 10 крупнейших центральных банков (ЦБ) мира на валютный режим плавающих курсов, росту цен на золото, инфляции и спаду в развитых экономиках. Описанный сценарий стал неким алгоритмом последующих энергокризисов в 1979–1980 гг. (перепроизводство нефти привело к превышению AS над совокупным спросом (AD)), 2004 г. (дефицит танкеров привел к проблемам в логистике), 2008–2009 гг. (глобальный кризис, сократив спрос на нефть, вызвал рост цен, подтолкнул к разработке и производству альтернативных видов энергии).

Энергетический кризис ЕС в 2020–2023 гг. был вызван сокращением снабжения газом в связи с санкциями Евросоюза против Российской Федерации. При этом климатическая повестка стала поводом принятия ЕС деформирующих энергетiku мер, которые сыграли главную роль в провоцировании полномасштабного энергетического кризиса [1]. Неподготовленный переход к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), отказ от АЭС, снижение потребления угля, погодные условия снизили генерацию и надежность энергоснабжения, привели к беспрецедентному росту цен на энергоносители и увеличению себестоимости продукции в энергоемких и фондоемких отраслях.

Центральные банки (которые в соответствии с законами о ЦБ ответственны за уровень инфляции) были вынуждены повышать ключевые и другие процентные ставки. В результате регуляторы столкнулись с противоречиями в макроэкономическом регулировании. С одной стороны, ужесточение денежно-кредитной политики привело к сокращению заимствований, инвестиций, в конечном итоге — замедлению экономического роста, с другой — отказ от монетарного повышения цены денег усилил инфляционное давление на домашние хозяйства и бизнес.

Поскольку на монетарные власти была возложена ответственность за финансовое содействие зеленому переходу, ЦБ стремились использовать процентные ставки для экологически чистого производства и устойчивого развития. В трехуровневой банковской системе ЕС цена денег определяется ЕЦБ. С 2016 г. по июль

2022 г. процентная ставка еврозоны составляла 0 %. За период с июля 2022-го по сентябрь 2023 г. в результате инфляционного давления десятью шагами регулятор увеличил ставку в 4,5 раза — до 4,5 %. С сентября 2023 г. по март 2025 г. шестью решениями ставка была сокращена до 2,7 % [2]. Крупнейший в зоне евро Дойче Бундесбанк следовал за ЕЦБ: в июле 2022 г. процентная ставка составляла 0,5 %, которую регулятор также десятью шагами поднял до 4,5 % в сентябре 2023 г., после чего перешел к поэтапному снижению до уровня 2,65 % в марте 2025 г. [3].

Долгосрочные проекты возобновляемой энергетики (солнечные парки, морские ветровые электростанции) требуют больших капиталовложений. Более низкие ставки позволяют им быть прибыльными. Высокие ставки увеличивают будущие доходы от возобновляемых источников энергии по дисконтированным значениям, делая их менее привлекательными. Напротив, мягкая политика снижает риски для инвесторов.

Л. Киллиана и Сяоцин Чжоу установили корреляционную закономерность значительного, но краткосрочного влияния роста энергетических цен на инфляцию в США: увеличение стоимости потребительской цены на бензин на 10 % привело в течение двух месяцев к росту индекса потребительской инфляции на 0,3 % [4]. В исследовании подчеркивается необходимость введения налога на углерод для достижения климатических целей и прогнозируется значительное повышение цен на различные виды энергии. Это может привести к долгосрочным экономическим последствиям, таким как устойчивый рост инфляции и высокие процентные ставки.

Инвестиции в зеленую экономику: рабочие места, инновации и снижение бедности

Инвестиции в область возобновляемых источников энергии становятся важным фактором увеличения числа рабочих мест. Исследование Global Energy Monitor 2023 г. показывает, что каждый 1 млрд долларов, инвестируемый в солнечные и ветровые проекты, генерирует создание от 5 до 7 тысяч новых рабочих мест.

Новые технологические подходы способствуют росту смежных отраслей. В странах ЕС проекты по производству зеленого водорода привлекли частные инвестиции на сумму 200 млрд евро, что ускорило развитие технологий хранения энергии и транспортировки водорода.

Современные колебания на энергетических рынках способны запустить цепь событий с далеко идущими последствиями для экологической повестки. Специалисты в области экономики и экологии предупреждают: удержание глобального потепления в рамках 2 °C возможно при условии введения механизмов финансового регулирования выбросов. Речь идет о компенсационных платежах за углеродный след. Их размер, по оценкам Международного валютного фонда [5], может

превысить 75 долларов за каждую тонну парниковых газов. Последствия таких мер уже просчитываются МВФ. К началу следующего десятилетия уголь подорожает на 200–250 %, цены на газ приблизятся к 70%-й отметке роста, а стоимость электроэнергии для домохозяйств увеличится на 50 %, бензин подорожает минимум на 15 %.

Подобная ценовая динамика способна переформатировать глобальную экономику: инфляционное давление может стать хроническим, вынуждая ЦБ годами сохранять жесткую монетарную политику с повышенными ставками.

В анализ реструктуризации глобальной экономики вошел термин «гринфляция» (Greenflation), описывающий парадоксальную связь между зеленой трансформацией и ростом издержек. Попытки сократить зависимость от традиционного ископаемого топлива приводят к удорожанию товаров и услуг по всей производственной цепочке. Эта дилемма ставит правительства перед сложным выбором: ускорение экологического перехода усиливает социальное напряжение, а замедление — делает климатические цели недостижимыми.

В этой связи актуален вопрос о поиске баланса между зеленой трансформацией и социально и экономически приемлемой ценой. Без продуманной системы компенсаций для уязвимых отраслей и населения, без инвестиций в инновационные технологии декарбонизации зеленая повестка рискует стать триггером длительной стагфляции. Решение лежит в плоскости как политической воли, так и принципиально новых подходов к моделированию экономических рисков в условиях климатических изменений. Примеры зеленых стратегий, результаты и проблемы приведены в табл. 1.

Сравнительный анализ реализации зеленых стратегий на примере ряда развитых и развивающихся экономик выявил достижения, проблемы и варианты решений.

В ЕС в рамках Фонда поддержки регионов на модернизацию угольных регионов Восточной Европы выделено десятки млрд евро в 2021–2027 гг. [18], что недостаточно для текущего и стратегического фондирования. Инцидент 2023 г. о несовместимости энергосистем Германии и Норвегии привел к убыткам в 1,2 млрд евро и обусловил необходимость синхронизации всех систем энергоснабжения еврозоны.

В китайской экономике актуальными стали вопросы трудоустройства работников угольной отрасли и социальной защиты этих регионов. В рамках китайской стратегии производства редкоземельных металлов требуется гибкая политика экспортно-импортных пошлин всех участников мирового рынка галлия и германия. В 2024 г. ограничения на их экспорт спровоцировали рост цен на ветрогенераторы. Снятие барьеров и низкие таможенные пошлины придадут импульс производству и потреблению ВИЭ в мире, усилят доверие к китайским поставщикам и долю Китая в мировой зеленой экономике.

ТАБЛИЦА 1. Зеленые стратегии, результаты и проблемы в ряде ведущих экономик мира

Страны	Стратегии	Результаты	Проблемы
ЕС	«Зеленое соглашение» (Green Deal). Основной стратегический документ, нацеленный на достижение углеродной нейтральности к 2050 г. Включает инициативы по сокращению выбросов парниковых газов, увеличению доли ВИЭ, улучшению энергоэффективности. Финансирование. В рамках программы NextGenerationEU выделен бюджет на 2021–2026 гг. в размере около 220 млрд EUR на поддержку зеленых проектов и технологий	– значительное увеличение доли возобновляемых источников в энергетическом балансе стран ЕС, таких как Германия и Дания; – успехи в области электромобильного транспорта и развития инфраструктуры для зарядки	– разные уровни экономического развития и политические позиции стран — членов ЕС затрудняют согласование совместных действий; – необходимость политического и монетарного балансирования между экономическим ростом и экологическими целями
Китай	Национальная стратегия 2021–2025 гг. по развитию ВИЭ [6]. Китай активно инвестирует в солнечную и ветровую энергетику, стремясь сократить зависимость от угля. Городские инициативы: разработка умных городов с акцентом на устойчивую транспортную инфраструктуру	– лидерство в производстве солнечных панелей и электромобилей. Китай является крупнейшим производителем солнечных модулей, на его долю приходится 76 % мирового производства в 2021 г. [7]; – существенное снижение углеродных выбросов в некоторых регионах Китая благодаря переходу на чистую энергию	– продолжение зависимости от угольной энергетики (56 % в 2023 г.) [8], что затрудняет достижение национальных целей по сокращению выбросов
США	Федеральные инициативы по поддержке зеленых технологий и инвестиций в производство «чистой энергии»: – Inflation Reduction Act (IRA): 369 млрд долл. на климатические и энергетические проекты (2022–2031 гг.) [9]; – Infrastructure Investment and Jobs Act (IIJA): 65 млрд долл. на модернизацию энергосистем и ВИЭ (2021–2026 гг.) [9]. Штатные программы. Калифорния и другие штаты устанавливают строгие экологические нормы и принимают программы по сокращению выбросов	– увеличение доли возобновляемых источников энергии в энергетическом балансе страны. В 2023 г. доля ВИЭ в генерации электроэнергии составила 21,3 % [10–11].	– необходимость значительных инвестиций в модернизацию энергетической инфраструктуры

Окончание табл. 1

Страны	Стратегии	Результаты	Проблемы
Германия	Энергетический переход (Energiewende). Стратегия, Закон о сокращении и прекращении производства электроэнергии на угольных электростанциях (Kohleausstiegsgesetz) от 13 августа 2020 г., направленная на уход от ядерной и угольной энергетики, с акцентом на ВИЭ	– увеличение доли ВИЭ до более чем 40 % в общем объеме производства электроэнергии в 2020 г. [12]; – успешная реализация программ по энергоэффективности в домах и на промышленных предприятиях	– высокие затраты на переход и необходимость модернизации существующей инфраструктуры; – проблемы с обеспечением стабильности энергоснабжения из-за переменных природы возобновляемых источников
Индия	Национальная программа по солнечной энергии. Цель — достичь 100 ГВт солнечной энергии к 2022 г. (в настоящее время программа пролонгирована до 2026 г.).	– увеличение установленной мощности солнечных электростанций. Индия становится одним из крупнейших рынков для производства солнечной энергии. Динамика роста: 2015 г. — 5 ГВт, 2020 г. — 40 ГВт, 2023 г. — 82 ГВт [13–15]. Среднегодовой темп роста: 35 % (2015–2023 гг.). Прогноз к 2030 г.: 500 ГВт общая мощность ВИЭ, включая 280 ГВт солнечной энергии; – активное участие в международных климатических инициативах, таких как Парижское соглашение 2015 г.	– балансирование между экономическим ростом и экологическими требованиями, особенно в условиях высокой бедности в стране; – инфраструктурные ограничения и необходимость значительных инвестиций для достижения поставленных целей
Канада	Национальная политика по климату. Цели по сокращению выбросов парниковых газов и переходу на чистую энергию. Закон Канады об ответственности за достижение нулевого уровня выбросов, вступивший в силу в июне 2021 г., закрепляет в законодательстве обязательство Канады достичь нулевого уровня выбросов к 2050 году [16]. Поддержка местных сообществ: включение коренных народов в процесс принятия решений о природных ресурсах	– успешное внедрение программ по улучшению энергоэффективности и переходу на ВИЭ; – программы энергоэффективности: Canada Greener Homes Grant: • 5,6 млрд CAD на модернизацию 700 000 домов (2021–2027 гг.). • Экономия энергии: до 20 % на домохозяйство [17]; – развитие рынка электромобилей и инфраструктуры для их зарядки	– зависимость от углеводородов в некоторых провинциях, что создает конфликты интересов между регионами, экономика которых тесно связана с добычей углеводородов, и общегосударственной властью, продвигающей климатическую повестку; – необходимость интеграции экологической политики с экономическими интересами бизнеса, интересами провинций и коренных народов

Составлено авторами по [6–17].

В США (см. табл. 1) на фоне приведенных результатов энерготрансформации — увеличение доли ВИЭ до 40% в общем объеме генерации электроэнергии в 2020 г. [12] — существуют инфраструктурные ограничения. Устаревшие сети не справляются с ростом ВИЭ, отстает строительство новых линий электропередач (ЛЭП) [19]. Решение вышеперечисленных проблем, возможно, будет найдено через частно-государственное партнерство и унификацию экологических стандартов на федеральном уровне. Второй проблемой стал указ президента Д. Трампа от 8 апреля 2025 г. о «Защите американской энергетики от государственного перенапряжения» [20], поставивший под сомнение саму климатическую политику в связи с глобальным потеплением.

Индия недостаточно использует потенциал зеленых финансов, в частности зеленых облигаций (Green Bonds). Для достижения цели Национальной программы по солнечной энергии в 250 ГВт к 2030 г. требуется фондирование с рынка 100 млрд долл., тогда как в 2023 г. удалось привлечь только 42 млрд долл.

В Канаде ключевым результатом стали программы энергомодернизации, включая инициативу Canada Greener Homes Grant. Финансирование в размере 5,6 млрд CAD ориентировано на повышение энергоэффективности 700 тыс. домов, сократив потребление энергии на 20 % в каждом. Параллельно развивается инфраструктура для электротранспорта, стимулируя переход на альтернативные источники энергии.

Заключение

Переход к устойчивой экономике на основе технологической трансформации вышел за рамки экологии, став инструментом монетарной и промышленной политики. Сравнительный анализ опыта Китая, Германии, Индии, США, ЕС позволяет выявить некоторые тенденции и закономерности. Включение экологических целей в публичные и корпоративные финансы (от налоговых льгот до эмиссии зеленых облигаций) не только сокращает выбросы CO₂, но и наполняет новым содержанием налогово-бюджетную и денежно-кредитную политику:

1. На зеленый переход работают процентные ставки ЦБ, налоговые стимулы для бизнеса, внедряющего экологически чистые технологии и производственные процессы.

2. Инвестиции в зеленую экономику создают новые рабочие места в секторе устойчивой ВИЭ, снижают энергозатраты, повышают конкурентоспособность национального бизнеса.

3. Технологическая трансформация в генерации энергетики улучшает качество жизни (чистый воздух и вода), сокращает бедность в регионах с зелеными проектами, способствует сохранению экосистем и адаптации к климатическим изменениям.

4. Успех зеленого перехода к зеленой экономике зависит от баланса регуляций, социальной поддержки и международной кооперации, где прибыль и экология дополняют друг друга.

Энергокризис 2020–2023 гг. оказал влияние на технологическую трансформацию, геоэкономику, монетарную политику и по своим последствиям сопоставим с энергетическим кризисом 1973 г.

Список источников

1. Рогинко С. А. Энергетический кризис ЕС и европейский энергетический рынок / С. А. Рогинко // Современная Европа. — 2024. — № 3. — С. 95–110. — URL: <http://www.sov-europe.ru/images/pdf/2024/3-2024/Roginko-3-24.pdf> (дата обращения: 12.04.2025).
2. TradingEconomics. Зона евро. Процентная ставка, 2022–2025. Статистика. — URL: <https://ru.tradingeconomics.com/euro-area/interest-rate> (дата обращения: 15.04.2025).
3. TradingEconomics. Германия. Процентная ставка, 2022–2025. Резюме. — URL: <https://ru.tradingeconomics.com/germany/interest-rate> (дата обращения: 15.04.2025).
4. Kilian L. Oil Price Shocks and Inflation / L. Kilian, X. Zhou. — Pp. 2–3. — URL: <https://www.dallasfed.org/~media/documents/research/papers/2023/wp2312.pdf> (дата обращения: 12.04.2025).
5. International Monetary Fund (IMF). 2019. Fiscal Monitor: How to Mitigate Climate Change. Washington, October. — P. VIII — URL: <https://www.imf.org/en/Publications/FM/Issues/2019/09/12/fiscal-monitor-october-2019> (дата обращения: 12.04.2025).
6. National Development and Reform Commission (NDRC). Notice on the issuance of the “14th Five-Year Plan” for the development of renewable energy. — P. 7 — URL: <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/P020220602315308557623.pdf> (дата обращения: 03.05.2025).
7. IEA (International Energy Agency). Special Report on Solar PV Global Supply Chains, 2022. — Pp. 7–8. — URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2ee601d-6b1a-4cd2-a0e8-db02d-c64332c/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf> (дата обращения: 03.05.2025).
8. Energy Institute. Statistical Review of World Energy 2024. — P. 7. — URL: https://www.energyinst.org/__data/assets/pdf_file/0006/1542714/684_EI_Stat_Review_V16_DIGITAL.pdf (дата обращения: 03.05.2025).
9. The White House. Inflation Reduction Act Guidebook. December 2022. — P. 3 — URL: <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2022/12/Inflation-Reduction-Act-Guidebook.pdf> (дата обращения: 03.05.2025).
10. U.S. Congress. Infrastructure Investment and Jobs Act, 2021. pp. 1130–1133 (Sec. 40101). pp. 1137–1140 (Sec. 40103). pp. 1152–1155 (Sec. 40106). pp. 1245–1250 (Sec. 40301). — URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/BILLS-117hr3684enr/pdf/BILLS-117hr3684enr.pdf> (дата обращения: 03.05.2025).

11. Statista. Share of Renewables in U.S. Energy Supply by Source. — P. 1. — URL: <https://www.statista.com/statistics/201199/share-of-renewables-in-us-energy-supply-by-source/> (дата обращения: 03.05.2025).
12. Fraunhofer ISE. Energy-Charts: Electricity Production in Germany, 2023. — URL: <https://energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?l=en&c=DE&year=2023> (дата обращения: 03.05.2025).
13. Government document, India. Uploaded August 2, 2023. — URL: <https://cdnbbsr.s3waas.gov.in/s3716e1b8c6cd17b771da77391355749f3/uploads/2023/08/2023080283.pdf> (дата обращения: 03.05.2025).
14. Government document, India. Uploaded August 31, 2023. — URL: <https://cdnbbsr.s3waas.gov.in/s3716e1b8c6cd17b771da77391355749f3/uploads/2023/08/202308311964406929.pdf> (дата обращения: 03.05.2025).
15. Government document, India. Uploaded October 1, 2024. — URL: <https://cdnbbsr.s3waas.gov.in/s3716e1b8c6cd17b771da77391355749f3/uploads/2024/10/20241014958242917.pdf> (дата обращения: 03.05.2025).
16. Government of Canada. Canada's 2050 Net-Zero Emissions Plan. — URL: <https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/climate-plan/net-zero-emissions-2050.html> (дата обращения: 03.05.2025).
17. Natural Resources Canada. Canada Greener Homes Initiative: February 2024 Update. — URL: <https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/home-energy-efficiency/canada-greener-homes-initiative/canada-greener-homes-initiative-february-2024-update> (дата обращения: 04.05.2025).
18. European Court of Auditors. EU support to coal regions: Limited contribution to the transition, Special Report No 22/2022. — URL: <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/support-coal-regions-22-2022/en/> (дата обращения: 04.05.2025).
19. CNBC. Why it's so hard to build new electrical transmission lines in the US. February 21, 2023. — URL: <https://www.cnbc.com/2023/02/21/why-its-so-hard-to-build-new-electrical-transmission-lines-in-the-us.html> (дата обращения: 04.05.2025).
20. The White House. Protecting American Energy from State Overreach. April 25, 2024. — URL: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/04/protecting-american-energy-from-state-overreach/> (дата обращения: 04.05.2025).

Дата поступления: 29.04.2025

Решение о публикации: 31.05.2025

Контактная информация:

ШАВШУКОВ Вячеслав Михайлович — д-р экон. наук, проф.; shavshukov@rambler.ru

РАХИМОВ Мухаммадали Тулкин угли — магистрант; rahimovmuhammadali75@gmail.com

Green Economy Policy: from Energy Shocks to Sustainable Development

V. M. Shavshukov¹, M. T. Rahimov²

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

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

For citation: Shavshukov V. M., Rahimov M. T. Green Economy Policy: from Energy Shocks to Sustainable Development. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 190–202. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-190-202

Summary

Monetary policy is becoming a tool for ensuring economic stability in the context of global climate change and the transition to low-carbon economy. **Purpose:** To develop theoretical solutions for the modification of monetary strategies aimed at overcoming the risks associated with rising energy prices and promoting the implementation of environmentally oriented transformation of economic systems. **Methods:** A range of statistical, comparative and forecasting techniques were employed to analyse the impact of a price shock on economic growth and energy security, and to estimate the flow of investment into the green economy. **Results:** The research findings have indicated that the transition to renewable energy sources (RES) that was not adequately prepared for technological change was a contributing factor to the energy crisis of 2020–2023, which resulted in rising energy prices and inflation. The analysis of anti-crisis measures has revealed contradictions between the growth of key interest rates and economic development slowdown, the green transition and inflation. The necessity for investments in the green economy and a soft monetary policy has been confirmed as a means of creating new jobs in the renewable energy sector, reducing energy costs, improving quality of life, facilitating access to sustainable energy, preserving ecosystems and adapting to climate change. The comparative analysis of the countries' green strategies in the context of high-energy prices has shown the necessity, firstly, for a balance between economic growth and environmental sustainability, and secondly, for the integration of green finance into monetary policy and corporate finance.

Keywords: Energy shock, inflation, economic policy, energy crisis of 2020–2023, green transition, green economy.

References

1. Roginko S. A. Energeticheskiy krizis ES i evropeyskiy energeticheskiy rynok [The EU Energy Crisis and the European Energy Market]. *Sovremennaya Evropa* [Modern Europe]. 2024, Iss. 3, pp. 95–110. Available at: <http://www.sov-europe.ru/images/pdf/2024/3-2024/Roginko-3-24.pdf> (accessed: April 12, 2025). (In Russian)
2. *TradingEconomics. Zona evro. Protsentnaya stavka, 2022–2025. Statistika* [TradingEconomics. Eurozone. Interest Rate, 2022–2025. Statistics]. Available at: <https://ru.tradingeconomics.com/euro-area/interest-rate> (accessed: April 15, 2025). (In Russian)
3. *TradingEconomics. Germaniya. Protsentnaya stavka, 2022–2025. Rezyume* [TradingEconomics. Germany. Interest Rate, 2022–2025. Summary]. Available at: <https://ru.tradingeconomics.com/germany/interest-rate> (accessed: April 15, 2025). (In Russian)

4. Kilian L., Zhou Oil X. Price Shocks and Inflation, pp. 2–3. Available at: <https://www.dallasfed.org/~media/documents/research/papers/2023/wp2312.pdf> (accessed: April 12, 2025).
5. International Monetary Fund (IMF). 2019. Fiscal Monitor: How to Mitigate Climate Change. Washington, October, p. VIII. Available at: <https://www.imf.org/en/Publications/FM/Issues/2019/09/12/fiscal-monitor-october-2019> (accessed: April 12, 2025).
6. National Development and Reform Commission (NDRC). Notice on the issuance of the “14th Five-Year Plan” for the development of renewable energy, p. 7. Available at: <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/P020220602315308557623.pdf> (accessed: May 3, 2025).
7. IEA (International Energy Agency). Special Report on Solar PV Global Supply Chains, 2022, pp. 7–8. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2ee601d-6b1a-4cd2-a0e8-db02dc64332c/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf> (accessed: May 3, 2025).
8. Energy Institute. Statistical Review of World Energy 2024, p. 7. Available at: https://www.energyinst.org/_data/assets/pdf_file/0006/1542714/684_EI_Stat_Review_V16_DIGITAL.pdf (accessed: May 3, 2025).
9. The White House. Inflation Reduction Act Guidebook. December 2022, p. 3. Available at: <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2022/12/Inflation-Reduction-Act-Guidebook.pdf> (accessed: May 3, 2025).
10. U.S. Congress. Infrastructure Investment and Jobs Act, 2021. pp. 1130–1133 (Sec. 40101). pp. 1137–1140 (Sec. 40103). pp. 1152–1155 (Sec. 40106). pp. 1245–1250 (Sec. 40301). Available at: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/BILLS-117hr3684enr/pdf/BILLS-117hr3684enr.pdf> (accessed: May 3, 2025).
11. Statista. Share of Renewables in U.S. Energy Supply by Source, p. 1. Available at: <https://www.statista.com/statistics/201199/share-of-renewables-in-us-energy-supply-by-source/> (accessed: May 3, 2025).
12. Fraunhofer ISE. Energy-Charts: Electricity Production in Germany, 2023. Available at: <https://energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?l=en&c=DE&year=2023> (accessed: May 3, 2025).
13. Government document, India. Uploaded August 2, 2023. Available at: <https://cdnbbsr.s3waas.gov.in/s3716e1b8c6cd17b771da77391355749f3/uploads/2023/08/2023080283.pdf> (accessed: May 3, 2025).
14. Government document, India. Uploaded August 31, 2023. Available at: <https://cdnbbsr.s3waas.gov.in/s3716e1b8c6cd17b771da77391355749f3/uploads/2023/08/202308311964406929.pdf> (accessed: May 3, 2025).
15. Government document, India. Uploaded October 1, 2024. Available at: <https://cdnbbsr.s3waas.gov.in/s3716e1b8c6cd17b771da77391355749f3/uploads/2024/10/20241014958242917.pdf> (accessed: May 3, 2025).
16. Government of Canada. Canada’s 2050 Net-Zero Emissions Plan. Available at: <https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/climate-plan/net-zero-emissions-2050.html> (accessed: May 3, 2025).
17. Natural Resources Canada. Canada Greener Homes Initiative: February 2024 Update. Available at: <https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/home-energy-efficiency/canada->

greener-homes-initiative/canada-greener-homes-initiative-february-2024-update (accessed: May 4, 2025).

18. European Court of Auditors. EU support to coal regions: Limited contribution to the transition, Special Report No 22/2022. Available at: <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/support-coal-regions-22-2022/en/> (accessed: May 4, 2025).

19. CNBC. Why it's so hard to build new electrical transmission lines in the US. February 21, 2023. Available at: <https://www.cnbc.com/2023/02/21/why-its-so-hard-to-build-new-electrical-transmission-lines-in-the-us.html> (accessed: May 4, 2025).

20. The White House. Protecting American Energy from State Overreach. April 25, 2024. Available at: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/04/protecting-american-energy-from-state-overreach/> (accessed: May 4, 2025).

Received: April 29, 2025

Accepted: May 31, 2025

Author's information:

Viacheslav M. SHAVSHUKOV — Dr. Sci. in Economics, Professor; shavshukov@rambler.ru

Muhammadali RAHIMOV — Postgraduate Student; rahimovmuhammadali75@gmail.com