

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. К. Канаев, докт. техн. наук, профессор
Deputy chief editor A. Kanayev, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Научный редактор Т. С. Титова, докт. техн. наук, профессор
Scientific Editor T. Titova, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Перевод на английский язык А. А. Лобанова
English translation Anastasia A. Lobanova
Литературное редактирование и корректура Ю. И. Носырева
Editing and proofreading Yuliya I. Nosyрева
Верстка М. В. Цыбульская
Layout Margarita V. Tsybul'skaya

Учредитель

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

Издатель

ООО «Медиа-Сервис» по договору № ЭА00271 от 19.12.2023

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Media Service LLC № ЭА00271, 19.12.2023

Контакты

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9,
тел.: (812) 457-85-36, e-mail: brni@pgups.ru;
111024, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Авиамоторная, д. 50, стр. 2, помещ. 29/2

Contacts

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
+7 (812) 457-85-36, e-mail: brni@pgups.ru;
111024, Moscow, inner ter. city municipal district Lefortovo,
Aviamotornaya st., 50, building 2, room 29/2

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 No. 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, докт. техн. наук, доцент, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан
Otabek Khamidov, Dr. 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, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China
Бельтюков Владимир Петрович, докт. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Vladimir Belyukov, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Блашко Людмила Сергеевна, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Liudmila Blazhko, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Бороненко Юрий Павлович, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Yuriy Boronenko, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Грачев Владимир Васильевич, докт. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Vladimir Grachev, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Грищенко Александр Васильевич, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Alexander Grishchenko, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Дудкин Евгений Павлович, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Evgeniy Dudkin, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Евстафьев Андрей Михайлович, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Andrey Evstafev, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Журавлева Наталья Александровна, докт. экон. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Natalya Zhuravleva, Dr. Econ. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Ким Константин Константинович, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Konstantin Kim, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Колпакчян Павел Григорьевич, докт. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Pavel Kolpakchyan, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Лапидус Лариса Владимировна, докт. экон. наук, профессор, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
Larisa Lapidus, Dr. Econ. Sci., Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Никитин Александр Борисович, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Alexander Nikitin, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Никитин Виктор Валерьевич, докт. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Victor Nikitin, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Покровская Оксана Дмитриевна, докт. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Oksana Pokrovskaya, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Пудовиков Олег Евгеньевич, докт. техн. наук, доцент, РУТ, Москва, Россия
Oleg Pudovikov, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia
Рачек Светлана Витальевна, докт. экон. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
Svetlana Rachev, Dr. Econ. Sci., Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia
Титова Таммила Семеновна, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Tamila Titova, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Штыков Валерий Иванович, член-корр. РАН, докт. 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 РЕЗУЛЬТАТОВ 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:

- Ф. И. О. 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, кегль 14, интервал одинарный. 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 подрисовочной 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. С. Валинский, Н. П. Калинин	Оценка энергоэффективности скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта	7
Л. В. Цыганская, Э. Р. Хамраева, Е. А. Наркизова	Апробация методики обоснования срока службы грузовых вагонов на основании результатов испытаний вагонов-аналогов	15
Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн, Н. А. Атаманчук	О причинах деформации обечайки котлов вагонов-цистерн для вязких нефтепродуктов	24
Е. И. Шехтман, В. А. Черняева, И. С. Игошев, А. А. Чупрынин	Стабильность геометрии рельсовой колеи на переходных участках	40
Д. В. Серебряков, Ж. Бахыт	К вопросу модернизации Улан-Баторской железной дороги	53
А. А. Плешаков, А. М. Евстафьев, И. А. Ролле	Исследование работы инверторной системы запуска дизельного двигателя при эксплуатации тепловоза ЗТЭ28	61
Д. П. Кононов, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко	Оценка возможности модернизации пассажирских вагонов для грузовых перевозок на высокоскоростных магистралях	78
Е. В. Казакевич, А. В. Богданов	Подходы к формализации организационно-технологических задач интеграции искусственного интеллекта в систему управления ОАО «РЖД»	87
Л. В. Мартыненко, Д. П. Кононов	Влияние параметров железнодорожного подвижного состава и пути на динамику движения	96
Э. Ю. Чистяков, А. Ю. Павлов, А. Г. Нуриев, В. В. Афанасьев, Я. А. Гренадер	Дистанционная калибровка динамических вагонных весов	103
А. В. Агунов, Д. Д. Иванов	Совершенствование метода расчета цепных контактных подвесок электрифицированных железных дорог	112

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Е. П. Дудкин, Я. С. Хомяков, Д. А. Каковко	Волнообразный износ рельсов на трамвайном транспорте	123
М. Ю. Изварин, И. А. Ролле, Е. В. Денисенко	Использование энергии рекуперации для обогрева стрелочных переводов от контактной сети постоянного тока с напряжением 3 кВ	134

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Н. А. Журавлева, Т. А. Крюкова	Эффект синергии транспортной сопряженности цепей поставок по маршрутам международного транспортного коридора «Север — Юг»: сценарный анализ	142
Р. Г. Романова, Т. П. Сацук	Методы оценки экономической безопасности в организациях электроэнергетики при реализации инвестиционных проектов	155
Сюзэз Нью	Создание критериев экономической безопасности предприятия на основе методики учета рисков Value at Risk	163

Contents

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

O. S. Valinsky, N. P. Kalinin	Energy efficiency assessment of high-speed and high-speed rail transport	7
L. V. Tsyganskaya, E. R. Hamraeva, E. A. Narkizova	Testing the methodology for justifying the service life of freight cars based on the results of analog car testing	15
L. V. Tsyganskaya, D. G. Bein, N. A. Atamanchuk	On the causes of shell deformation in tank car boilers for viscous petroleum products	24
E. I. Shehtman, V. A. Chernyaeva, I. S. Igoshev, A. A. Chuprinin	Stability of rail track geometry in transition sections	40
D. V. Serebryakov, J. Bakhyt	To the issue of modernization of Ulaanbaatar railroad	53
A. A. Pleshakov, A. M. Evstafiev, I. A. Rolle	Study of the inverter system operation of the diesel engine start system during diesel locomotive 3TE28 operation	61
D. P. Kononov, A. M. Budyukin, V. G. Kondratenko	Assessment of the possibility of modernization of passenger cars for freight transportation on high-speed lines	78
E. V. Kazakevich, A. V. Bogdanov	Approaches to formalization of organizational and technological tasks of integration of artificial intelligence into the management system of JSC "Russian Railways"	87
L. V. Martynenko, D. P. Kononov	Influence of railway rolling stock and track parameters on traffic dynamics	96
E. Y. Chistyakov, A. Y. Pavlov, A. G. Nuriev, V. V. Afanasyev, Ya. A. Grenadier	Remote calibration of dynamic wagon scales	103
A. V. Agunov, D. D. Ivanov	Improving the calculation method for catenary contact suspensions of electrified railways	112

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

E. P. Dudkin, J. S. Khomyakov, D. A. Kakovko	Wave-shaped depreciation of rails on tram transport	123
M. Yu. Izvarin, I. A. Rolle, E. V. Denisenko	The use of recuperation energy for heating railroad switches from a DC contact network with a voltage of 3 kV	134

ECONOMICS AND MANAGEMENT

N. A. Zhuravleva, T. A. Kryukova	The synergy effect of transport connectivity of supply chains along the routes of the international transport corridor “North — South”: scenario analysis	142
R. G. Romanova, T. P. Satsuk	Methods for assessing the economic security of an electric power organization during the investment process	155
Xueke Niu	Creation of criteria for economic security of an enterprise based on the risk accounting methodology Value at Risk	163

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.4.016.3

Оценка энергоэффективности скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта

О. С. Валинский, Н. П. Калинин

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

Для цитирования: Валинский О. С., Калинин Н. П. Оценка энергоэффективности скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 7–14. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-7-14

Аннотация

Цель: анализ и определение критериев энергоэффективности скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта. **Методы:** разработка комплексной системы показателей для оценки эффективности производства на железнодорожном транспорте с учетом специфики различных видов перевозок и технологических процессов, в частности энергетической эффективности высокоскоростного и скоростного подвижного состава, ориентированной на практическую значимость и экономическую обоснованность результатов. **Результаты:** обозначена эффективность высокоскоростного подвижного состава, дана оценка энергоэффективности высокоскоростного подвижного состава, рассмотрены индикаторы энергоэффективности железнодорожных перевозок, произведен анализ отличий высокоскоростного поезда от обычного, рассмотрена система оценки энергоэффективности высокоскоростных железнодорожных перевозок, рассмотрена энергетическая эффективность высокоскоростных перевозок относительно повышения скоростей движения. **Практическая значимость:** использование абсолютных показателей энергопотребления для более точной оценки эффективности железнодорожных перевозок не позволяет адекватно оценить масштабы производственной деятельности. Удельные показатели, такие как энергоемкость на тонно-километр нетто, хотя и являются более информативными, не учитывают разнообразия технологических процессов и подвижного состава в железнодорожной отрасли. Данная статья позволит пересмотреть существующую оценку энергопотребления высокоскоростных поездов, рассмотреть использование данного показателя в оценивании эффективности энергопотребления высокоскоростных поездов в России.

Ключевые слова: расход энергии, энергоэффективность, оценка энергоэффективности, расход энергии на тягу поезда, скоростной поезд, высокоскоростной поезд, приведенный т·км, кВт·ч/место·км.

Введение

Высокоскоростные железные дороги (ВСМ) являются наиболее предпочтительным видом транспорта благодаря своей высокой эффективности и энергоэффективности, что является важной причиной того, что в мире придается

большое значение развитию ВСМ. Дефицит энергии, загрязнение окружающей среды и завышенные цены на энергоносители стали основными проблемами экономического развития и повышения уровня жизни людей. Спрос на энергоносители очень высок, в то время как пропускная способность окружающей среды низкая. Хотя увеличение скорости железных дорог и широкомасштабная эксплуатация электропоездов повысили эффективность транспортировки, существует острая необходимость в точном измерении, анализе и оптимизации энергопотребления ВСМ, что также требуется для организации ВСМ, учета затрат, ценообразования на транспортировку, расчета доходов и т. д. Поэтому энергопотребление высокоскоростного транспорта стало центром внимания. Однако на энергопотребление при высоких скоростях движения электропоездов влияет большое количество факторов. Поэтому исследование энергопотребления высокоскоростных электропоездов имеет практическое значение. В статье рассмотрены показатели, которые используются для определения энергоэффективности высокоскоростных и скоростных железнодорожных перевозок в мире. Рассматриваются вопросы определения показателей энергоэффективности данных видов движения [1, 2].

Оценка энергоэффективности

В условиях современных рыночных отношений оценка энергоэффективности транспортного средства играет особую роль. Для определения эффективности перевозочного процесса существует ряд показателей, основным из них считается удельный расход топливно-энергетических ресурсов на единицу продукции. Данный показатель показывает расход топливно-энергетических ресурсов, приходящийся на единицу выполненной работы.

Для высокоскоростных и скоростных пассажирских перевозок показателем служит расход топливно-энергетических ресурсов, приведенный к перевезенному пассажиропотоку. Во всех регионах мира, независимо от развития высокоскоростного движения, пассажирские перевозки имеют меньший удельный расход энергии относительно пассажирских перевозок на автомобильном или авиационном транспорте. Оценку энергоэффективности железнодорожного транспорта в целом производят, используя показатель расхода энергии, приведенный к 1 км пути.

Учитывая то, что мы сравниваем энергопотребление высокоскоростной железной дороги с показателями обычной железной дороги, такое сравнение будет основываться на эмпирической проверке и результатах анализа при условии, что производится дифференциация по другим переменным (кроме скорости), напрямую связанным с типом используемого подвижного состава. Фактически высокоскоростные поезда и линии, по которым они курсируют, отличаются от обычных, а различия, кроме скорости, могут касаться составности поезда, компоновки салона, системы энергоснабжения, типа тягового привода, количества остановок и т. д.

Оценка энергоэффективности на железнодорожном транспорте производится путем сопоставления потребляемой энергии с объемом выполненных перевозок. В грузовых перевозках основным показателем является тонно-километр (т·км), отражающий массу груза и расстояние перевозки. Для пассажирских перевозок используется пассажиро-километр (пасс. км).

В России и за рубежом (где их называют «единица измерения перевозочной деятельности» или «транспортная единица») применяется приведенный тонно-километр, представляющий собой сумму тонно-километров и пассажиро-километров.

Однако этот показатель не учитывает множество факторов, влияющих на энергопотребление, таких как тип подвижного состава, загрузка вагонов и средняя масса пассажира. Более точную оценку обеспечивает показатель «тонно-километры брутто», который учитывает вес всего состава поезда (включая вагоны и локомотив) и позволяет сравнивать энергоэффективность различных типов подвижного состава [3–8].

Для измерения энергопотребления железнодорожного транспорта используются различные единицы: условное топливо (кг у. т.), дизельное топливо (кг д. т., л), электрическая энергия (кВт·ч). В современной практике все чаще применяется международная система единиц СИ, где единицами измерения энергопотребления являются джоуль (Дж) и его производные (кДж, МДж, ГДж, ТДж).

Сравнение энергоэффективности высокоскоростных и обычных железнодорожных перевозок — сложная задача, требующая комплексного анализа множества факторов. Для получения достоверных результатов необходимо использовать дифференцированный подход и учитывать специфику каждого типа перевозок. При выборе показателей эффективности следует учитывать как объемы выполненной транспортной работы, так и энергопотребление различных типов подвижного состава.

В табл. 1 показаны индикаторы энергетической эффективности.

ТАБЛИЦА 1. Индикаторы энергетической эффективности

Индикатор эффективности	Содержание
выручка от пассажирских перевозок	показывает долю покрытия общих операционных расходов железной дороги за счет тарифных доходов, в том числе при помощи государственного финансирования
поездо-километр	показывает расходы на пробег поездов
тонно-километр нетто	показывает расходы на перевоз груза в зависимости от веса и расстояния
пассажирооборот (пассажиро-километр)	показывает расходы на количество перевезенных пассажиров на определенное расстояние
кВт·ч/место·км	показывает расход энергии при перевозке одного пассажира на определенное расстояние

При анализе причин различий в расходе высокоскоростного поезда и пассажирского поезда целесообразно иметь в виду, что принципиальные различия между двумя типами систем проявляются в трех областях:

- 1) тип подвижного состава;
- 2) иная планировка и новая инфраструктура (в отличие от улучшения существующей инфраструктуры);
- 3) другая форма работы (меньше остановок).

Высокоскоростной поезд — это основной элемент системы перевозок. Поэтому нецелесообразно сравнивать только некоторые его характеристики, иначе можно прийти к выводу, что минимальное потребление достигается у очень легких, современных и дорогих поездов на линиях с удобной инфраструктурой и при движении их на средних скоростях для высокоскоростного движения и без коммерческих остановок, но тогда пришлось бы задаться вопросом о том, почему были построены линия и поезд с такими характеристиками [8].

Для оценки энергопотребления принято использовать единицу веса условного топлива или кВт·ч расходуемой электрической энергии, однако в международной концепции следует приводить данные единицы измерения к джоулям потраченной энергии.

В высокоскоростных и скоростных перевозках наибольшая часть энергопотребления подвижного состава приходится на расход энергии на тягу. В силу того что более 95 % высокоскоростных перевозок в мире производится электрической тягой (как локомотивной, так и моторвагонной), парк подвижного состава оснащен системами электрического торможения, которые позволяют существенно экономить топливно-энергетические ресурсы [9].

Ранее было отмечено, что высокоскоростное движение требует определенной составности подвижного состава, легких и аэродинамических поездов, потому что при увеличении скоростей движения выше 200 км/ч аэродинамическая составляющая основного сопротивления движения негативно влияет на расход энергии, а также системы электроснабжения, которая может обеспечить его высокую производительность. Без этих составляющих реализация высокой скорости перевозок была бы невозможна, поэтому сравнение должно включать все перечисленные факторы.

Высокоскоростной и скоростной железнодорожный транспорт существенно отличается от традиционного по своим эксплуатационным характеристикам. Движение поездов на максимально допустимых скоростях требует оптимизации режимов работы тягового привода для достижения высоких значений коэффициента полезного действия (КПД). Это позволяет значительно сократить потери электроэнергии на тягу. Кроме того, сокращение времени в пути ведет к уменьшению расходов энергии на вспомогательные системы, такие как кондиционирование, освещение и другие, обеспечивающие комфорт пассажиров. Таким образом, основная часть потребляемой энергии приходится непосредственно на тягу поезда.

Для объективной оценки энергоэффективности различных моделей высокоскоростных поездов, которые имеют существенные конструктивные и эксплуатационные отличия в разных регионах мира, применяется специальный показатель — удельный расход электроэнергии на одного пассажира на единицу пройденного пути. Этот показатель учитывает как энергетические затраты на движение поезда, так и его пассажироместимость, позволяя сравнивать различные типы подвижного состава, независимо от фактической заполняемости поездов [10].

На диаграмме (рис. 1) видно, что энергопотребление, выраженное в кВт·ч/место·км, возрастает практически пропорционально скорости движения. Пропорциональность зависимости можно объяснить тем, что с повышением максимальной скорости движения новых высокоскоростных электропоездов совершенствуется обтекаемость кузова. Из графика времени хода следует, что повышение максимальной скорости движения в диапазоне от 300 до 350 км/ч несущественно понижает время поезда в пути, поэтому оптимальной следует считать скорость движения в пределах 320 км/ч, так как соотношение затраченной энергии согласуется с минимизацией времени поезда в пути.

Метод сравнения затрат на электроэнергию по отношению к доходу от произведенной перевозки имеет недостатки, поскольку удельный доход, генерируемый

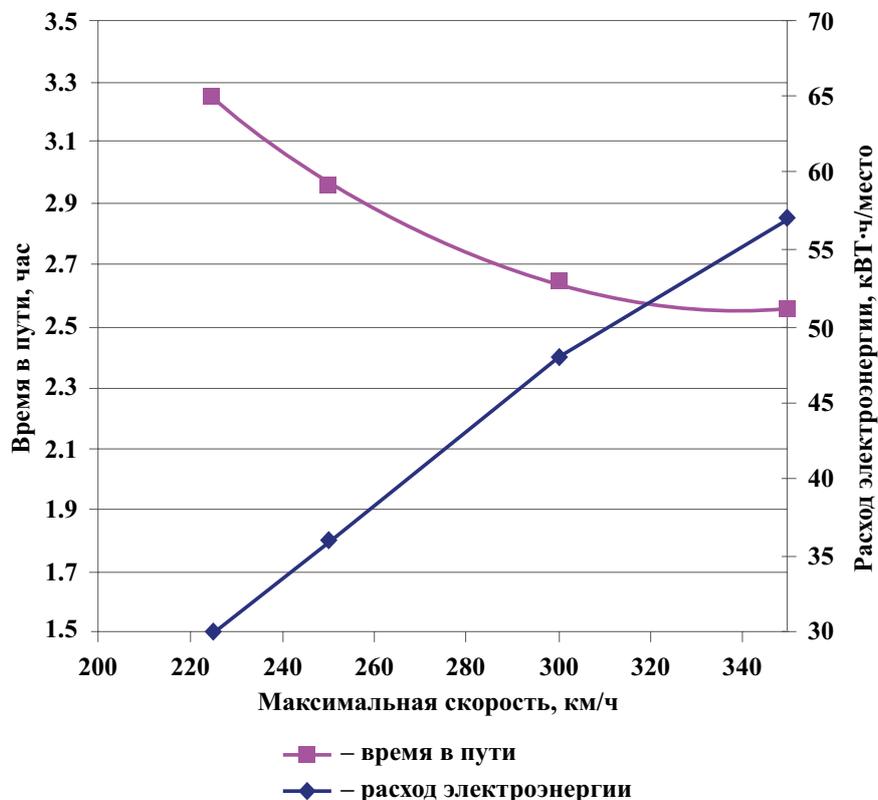


Рис. 1. Зависимость расхода электроэнергии и времени в пути от скорости движения

каждой единицей перевозок (пассажиры-километр), значительно варьируется в зависимости от конкретного типа перевозок.

Несмотря на то что этот фактор (доход на пассажиры-километр) представляет собой пример готовности пассажиров платить за увеличение средней скорости поездов (даже если им пришлось платить больше за увеличение энергопотребления), с технической точки зрения количество потребляемой энергии на пассажиры-километр является более важным показателем, чем возросшие затраты на энергию относительно общего дохода [11].

Заключение

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что, если все остальные переменные — как переменные инфраструктуры (профиль, скорость, напряжение питания), так и переменные поезда (масса, размер, форма, эффективность) — остаются идентичными, потребление энергии увеличивается по мере увеличения максимальной и средней скорости движения.

С точки зрения возрастающего энергопотребления на движение при условии сокращения времени хода оптимальной следует считать скорость движения высокоскоростных электропоездов в пределах 320 км/ч.

Библиографический список

1. Сравнение воздействия на окружающую среду традиционного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: отчет компании Network Rail (Великобритания). 2010. 60 с.
2. Косарев А. Б. Научное обеспечение роста энергоэффективности и экологической безопасности железнодорожного транспорта. Подходы и потенциал // Бюл. объедин. учен. совета ОАО «РЖД». 2015. № 5. С. 1–15.
3. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: справ.-метод. изд. / В. А. Гапанович [и др.]; под ред. В. А. Гапановича. М.: Интехэнергоиздат; Теплоэнергетик, 2014. 304 с.
4. Гапанович В. А. Энергоэффективность — путь к снижению затрат и к экологической безопасности // Железнодорожный транспорт. 2014. № 8. С. 22–25.
5. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник / А. А. Бакланов [и др.]. М.: МИСиС, 2012. 619 с.
6. Проект OSIRIS: оценка энергопотребления подвижного состава // Железные дороги мира. 2015. № 12. С. 45–48.
7. Перспективы грузовых железнодорожных перевозок в Европе // Железные дороги мира. 2015. № 3. С. 30–34.
8. Системный подход к эффективности энергопотребления // Железные дороги мира. 2015. № 9. С. 33–36.
9. Игин В. Н. Энергоэффективность локомотивов: планирование и прогнозирование // Локомотив. 2016. № 4. С. 10–13.

10. Оценки энергоэффективности работы железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения / Т. С. Титова [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2017. Т. 17. Вып. 1. С. 119–126.

11. The future of rail. Opportunities for energy and the environment: отчет компании IEA (Франция). 2019. 175 с.

Дата поступления: 09.10.2024

Решение о публикации: 06.11.2024

Контактная информация:

ВАЛИНСКИЙ Олег Сергеевич — канд. техн. наук, профессор; rector@pgups.ru

КАЛИНИН Николай Павлович — аспирант, инженер; nikolaykalinin1997@gmail.com

Energy efficiency assessment of high-speed and high-speed rail transport

O. S. Valinsky, N. P. Kalinin

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

For citation: Valinsky O. S., Kalinin N. P. Energy efficiency assessment of high-speed and high-speed rail transport // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 7–14. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-7-14

Abstract

Purpose: analysis and definition of energy efficiency criteria for high-speed and high-speed rail transport. **Methods:** development of a comprehensive system of indicators for assessing the efficiency of production in rail transport, taking into account the specifics of various types of transportation and technological processes, in particular the energy efficiency of high-speed and high-speed rolling stock, focused on the practical significance and economic feasibility of the results. **Results:** the efficiency of high-speed rolling stock is indicated, the energy efficiency of high-speed rolling stock is assessed, the indicators of energy efficiency of rail transportation are considered, the differences between a high-speed train and a conventional train are analyzed, the system for assessing the energy efficiency of high-speed rail transportation is considered, the energy efficiency of high-speed transportation is considered in relation to increasing travel speeds. **Practical significance:** the use of absolute energy consumption indicators for a more accurate assessment of the efficiency of rail transportation does not allow for an adequate assessment of the scale of production activities. Specific indicators, such as energy intensity per net ton-kilometer, although more informative, do not take into account the diversity of technological processes and rolling stock in the railway industry. This article will allow us to revise the existing assessment of the energy consumption of high-speed trains, and will allow us to consider the use of this indicator in assessing the efficiency of energy consumption of high-speed trains in Russia.

Keywords: energy consumption, energy efficiency, energy efficiency assessment, energy consumption for train traction, high-speed train, high-speed train, reduced tkm, kW·h/seat·km.

References

1. Sravnenie vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu tradicionnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta: otchet kompanii Network Rail (Velikobritaniya). 2010. 60 s. (In Russian)
2. Kosarev A.B. Nauchnoe obespechenie rosta energoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti zheleznodorozhnogo transporta. Podhody i potencial // Byul. ob'ed. uchen. soveta OAO "RZhD". 2015. No. 5. S. 1–15. (In Russian)
3. Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte: sprav.-metod. izd. / V.A. Gapanovich [i dr.]; pod red. V.A. Gapanovicha. M.: Intekhenergoizdat; Teploenergetik, 2014. 304 s. (In Russian)
4. Gapanovich V.A. Energoeffektivnost' — put' k snizheniyu zatrat i k ekologicheskoy bezopasnosti // Zheleznodorozhnyj transport. 2014. No. 8. S. 22–25. (In Russian)
5. Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik / A.A. Baklanov [i dr.]. M.: MISiS, 2012. 619 s. (In Russian)
6. Proekt OSIRIS: oценка energopotrebleniya podvizhnogo sostava // Zheleznye dorogi mira. 2015. No. 12. S. 45–48. (In Russian)
7. Perspektivy gruzovyh zheleznodorozhnyh perevozok v Evrope // Zheleznye dorogi mira. 2015. No. 3. S. 30–34. (In Russian)
8. Sistemnyj podhod k effektivnosti energopotrebleniya // Zheleznye dorogi mira. 2015. No. 9. S. 33–36. (In Russian)
9. Igin V.N. Energoeffektivnost' lokomotivov: planirovanie i prognozirovanie // Lokomotiv. 2016. No. 4. S. 10–13. (In Russian)
10. Ocenki energoeffektivnosti raboty zheleznodorozhnogo transporta primeneniem specializirovannyh udel'nyh edinic izmereniya / T.S. Titova [i dr.] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2017. T. 17. Vyp. 1. S. 119–126. (In Russian)
11. The future of rail. Opportunities for energy and the environment: otchet kompanii IEA (Franciya). 2019. 175 s.

Received: 09.10.2024

Accepted: 06.11.2024

Author's information:

Oleg S. VALINSKY — PhD in Engineering, Professor; rector@pgups.ru

Nikolay P. KALININ — Postgraduate Student, Engineer; nikolaykalinin1997@gmail.com

УДК 629.463.66

Апробация методики обоснования срока службы грузовых вагонов на основании результатов испытаний вагонов-аналогов

Л. В. Цыганская¹, Э. Р. Хамраева¹, Е. А. Наркизова²

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

² АО «НВЦ «Вагоны», Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 22м, 1-й этаж, пом. 5н

Для цитирования: Цыганская Л. В., Хамраева Э. Р., Наркизова Е. А. Апробация методики обоснования срока службы грузовых вагонов на основании результатов испытаний вагонов-аналогов // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 15–23. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-15-23

Аннотация

Цель: разработка и внедрение усовершенствованных несущих металлоконструкций кузовов и рам, унификация элементов и узлов с использованием наиболее оправдавших себя в эксплуатации конструкций, технологической отработке отдельных элементов, систем и подсистем вагонов; повышение надежности, ремонтпригодности и совершенствование систем технического обслуживания подвижного состава поднимают вопрос о назначении срока службы грузовых вагонов с учетом экономической составляющей производства и эксплуатации. **Метод:** для подтверждения срока службы грузовых вагонов выполняются оценка и сравнение результатов ресурсных и ходовых динамико-прочностных испытаний вагонов-аналогов, а также цифровое моделирование в программном комплексе «Универсальный механизм». **Результаты:** в результате апробации данной методики был подтвержден срок службы вагона-хоппера модели 19-1272-01, который составляет 32 года. **Практическая значимость:** апробация методики обоснования срока службы была проведена на вагонах-хопперах моделей 19-1272-01 и 19-1298 производства АО «Рузхиммаш».

Ключевые слова: срок службы вагона, увеличение срока службы вагона, методика обоснования срока службы.

Рассматривается вопрос, связанный с требованием подтверждения увеличенного срока службы новых грузовых вагонов на основании результатов испытаний вагонов-аналогов.

Традиционно при разработке и постановке на производство новых грузовых вагонов их срок службы устанавливается разработчиком и подтверждается на основании комплекса расчетов и испытаний, в том числе ходовых прочностных и ресурсных.

Актуальность работы связана с необходимостью соблюдения новых требований [1], предусматривающих подтверждение величины назначенного срока службы грузовых вагонов на основании сравнительных испытаний с вагонами-аналогами. Под вагонами-аналогами согласно [1] подразумеваются вагоны, имеющие подобное назначение, схожую конструкцию кузова, рамы и узлов, лимитирующие срок службы.

Для выполнения требований [1] и возможности ввода в эксплуатацию вагонов с увеличенным сроком службы была разработана и предложена методика обоснования срока службы грузовых вагонов на основании результатов испытаний вагонов-аналогов [2]. Предложенная методика предусматривает подтверждение срока службы грузового вагона в несколько этапов:

I этап — сопоставление результатов ресурсных испытаний вагонов-аналогов, на основании которого устанавливаются элементы и узлы возможного возникновения трещин. Элементы конструкции вагона, в которых в ходе ресурсных испытаний выявлены трещины, определяются как узлы, лимитирующие срок службы вагона (ресурс) [3].

II этап — проведение сравнительного анализа результатов ходовых динамико-прочностных испытаний вагона и вагонов-аналогов с целью оценки динамических показателей вагонов и показателей прочности для зон, лимитирующих срок службы (ресурс) [4].

III этап — оценка динамико-прочностных показателей вагонов на основании моделирования на цифровых моделях и прочностного анализа с пошаговой оценкой изменения динамических показателей вагонов и динамических амплитуд напряжений в конструкции вагонов с максимально допустимыми в эксплуатации износами, а также с учетом допустимых коррозионных, контактных, абразивных износов и возможного изменения характера взаимодействия между элементами вследствие смятия или износа сопрягаемых поверхностей или других возможных деградационных процессов, связанных с эксплуатацией подвижного состава [5]. Характер процессов и необходимость их учета выбираются в зависимости от условий эксплуатации конкретного вида подвижного состава. Основной задачей цифрового моделирования является получение зависимостей изменения уровня динамических напряжений в конструкциях рассматриваемых вагонов в процессе жизненного цикла.

IV этап — сравнительная расчетная оценка срока службы вагона с учетом результатов ходовых динамико-прочностных испытаний новых вагонов и результатов моделирования вагонов с допустимыми износами [6].

После проведения сравнительных испытаний на основании анализа конструкторской и технологической документации подтверждается целесообразность технических и технологических решений, влияющих на срок службы.

Апробация предложенной методики проводилась на вагонах-хопперах моделей 19-1272-01 и 19-1298 производства АО «Рухиммаш». В качестве вагонов-аналогов для вагона-хоппера модели 19-1272-01 были выбраны вагоны-хопперы моделей 19-1272 и 19-1273-02, основные параметры и технические характеристики вагонов приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Основные параметры и технические характеристики вагонов-хопперов моделей 19-1272-01, 19-1272 и 19-1273-02

Наименование параметра и единица измерения	Значение показателя вагона		
	19-1272-01	19-1272	19-1273-02
1. Грузоподъемность, т	79,5	74,0	77
2. Масса тары, т: – минимальная – максимальная	19,7 20,5	19,2 20,0	22,0 23,0
3. Минимально допустимое значение массы тары для вагона, находящегося в эксплуатации, т	18,4	17,9	20,7
4. Объем кузова, м ³	72	72	107
5. Максимальная расчетная статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, кН (тс)	245,25 (25,0)	230,5 (23,5)	245,5 (25,0)
6. Длина вагона, мм: – по осям сцепления автосцепок – по концевым балкам рамы	12020 ± 20 10800 ± 20	12020 ± 20 10800 ± 20	14220 13000
7. База вагона, мм	7800 ± 8	7800 ± 8	10000
8. Высота от уровня головок рельсов, мм: – максимальная – до оси зацепления автосцепки	4420 ± 20 1060 ± 20	4420 ± 20 1060 ± 20	4940 1060 ± 20
9. Ширина максимальная, мм	3275 ± 15	3270 ± 15	3250
10. Количество люков, шт.: – загрузочных – разгрузочных	4 4	4 4	4 6
11. Модель двухосной тележки, тип 3 по ГОСТ 9246	18-9891	18-9801	18-9891
12. Срок службы не более, лет	32	32	32

В ходе проведения ударных ресурсных испытаний по ГОСТ 337882016 симулировано нагружение, соответствующее 43 годам эксплуатации для вагона-хоппера модели 19-1272, 54,36 года для модели 191272-01 и 46,3 года для модели 19-1273-02. Плотность распределения усилий в испытаниях на ресурс при соударениях приведена на рис. 1. Подтвержденный срок службы для всех испытуемых и моделей вагонов-хопперов составил не менее 32 лет.

По результатам проведенных ресурсных испытаний вагонов-хопперов модели 191273, 19-1272-01 и 191273-02 на циклическую долговечность (соударения) выявлены зоны трещинообразования: зона сварных швов стоек торцевой стены вагона, зона крепления торцевой стены и крыши, зона сварных швов раскосов торцевой стены.

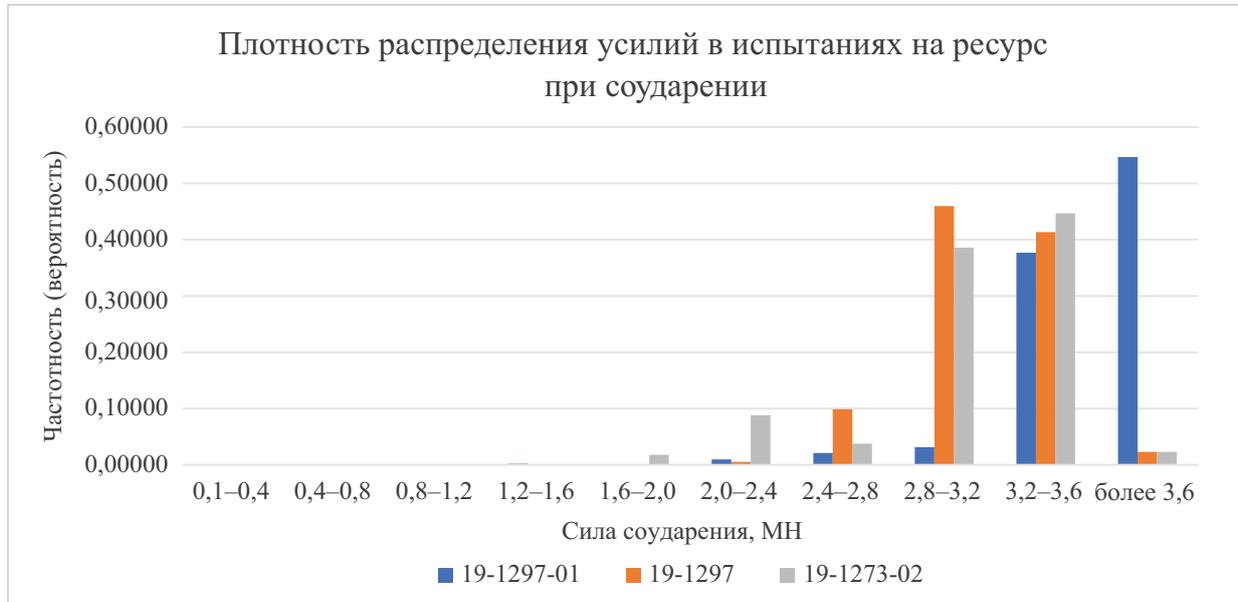


Рис. 1. Частотность возникновения сил при проведении ресурсных испытаний

Сравнительная оценка эквивалентных амплитуд динамических напряжений $\sigma_{a,3}$ и коэффициентов запаса сопротивления усталости n , полученных при проведении ходовых динамико-прочностных испытаний вагонов-хопперов моделей 191273, 19-1272-01 и 191273-02, представлена в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнительная оценка результатов моделирования динамики и результатов динамико-прочностных испытаний вагонов-хопперов

Зона	19-1272-01		19-1272		19-1273-02		Норматив [n]
	$\sigma_{a,3}$	n	$\sigma_{a,3}$	n	$\sigma_{a,3}$	n	
по «Нормам...»							
Стойки торцевой стены	20,86	2,07	10,77	4,02	1,49	29,03	1,5
	5,70	7,59	2,21	19,59	0,50	86,45	
Крепление крыши к торцевой стене	4,30	10,06	1,40	30,96	0,74	58,72	1,5
	0,62	70,33	1,47	29,40	1,91	22,65	
Раскосы торцевой стены	11,96	3,62	5,57	12,12	9,78	4,42	1,5
	15,12	2,86	1,42	30,47	9,15	4,73	
по ГОСТ 33211-2014							
Стойки торцевой стены	6,71	1,57	7,57	1,40	5,18	2,83	1,15
	1,63	6,48	0,86	54,83	5,88	2,49	
Крепление крыши к торцевой стене	0,30	35,56	8,07	1,31	7,38	2,82	1,15
	0,39	26,99	9,10	1,16	1,76	11,81	
Раскосы торцевой стены	2,58	4,07	9,14	1,16	4,53	12,79	1,5
	4,96	2,12	3,45	3,07	13,83	4,19	

Оценка динамико-прочностных показателей вагонов выполнялась на основании моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм». Расчет динамических качеств выполнялся в том числе и с максимальными износами при эксплуатации.

Графики зависимости вертикальных динамических сил, действующих на пружины рессорного комплекта, от времени движения груженого вагона модели 19-1272-01 на прямом участке пути и на кривой радиусом 650 м приведены на рис. 2.

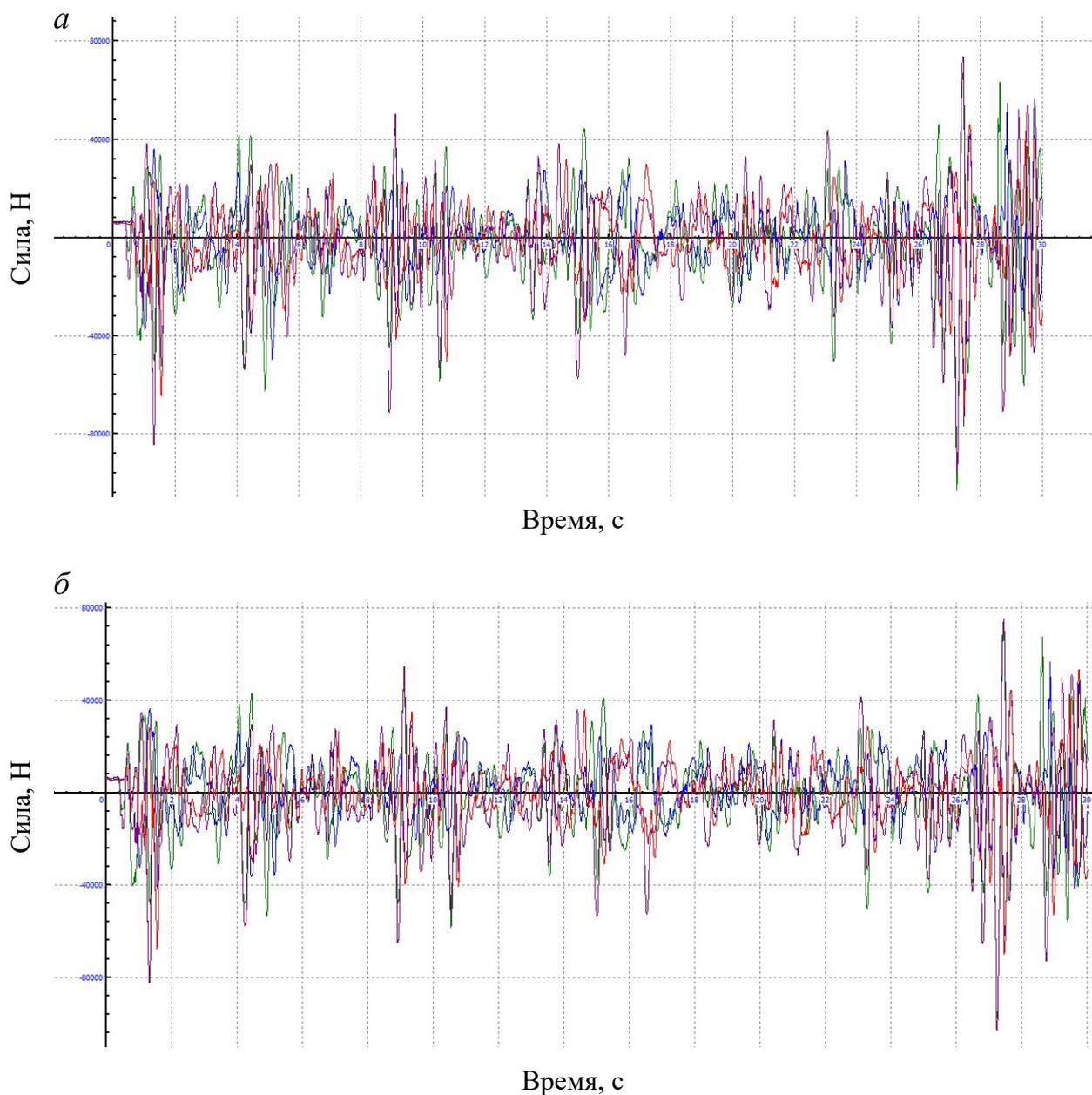


Рис. 2. График зависимости поперечных горизонтальных сил, действующих на колесную пару со стороны боковых рам, от времени движения груженого вагона по прямому участку пути: *а* — нового; *б* — с износами

Расчет срока службы (ресурса) проводится для каждого вагона с максимальными износами по следующей формуле:

$$T_{\kappa} = \frac{\left(\frac{\sigma_{a, N}}{[n]} \right)^m \cdot N_0}{B \cdot \mu f_{\sigma} \sum_{j=1}^n K_{yzj} \sum P_{Vi} \sum \sigma_{ai}^m P_{\sigma i}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{a, N}$ — предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов $N_0 = 10^7$;

$[n]$ — допускаемый коэффициент запаса усталости;

N_0 — базовое число циклов;

m — показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах;

μ — коэффициент, полученный по результатам моделирования динамики вагонов, учитывающий влияние деградации в процессе эксплуатации конструкции вагонов (фрикционного и коррозионного износа);

B — коэффициент перевода календарного расчетного срока службы балки в годах во время непрерывного движения в секундах, с/год;

f_{σ} — частота изменения коэффициента динамической добавки;

K_{yzj} — средняя доля протяженности участков пути;

$P_{\sigma i}$ — вероятность появления амплитуды с уровнем σ_{ai} в i -м интервале скоростей движения вагона;

P_{Vi} — доля времени, приходящаяся на эксплуатацию в i -м интервале скоростей;

σ_{ai} — уровень амплитуд напряжений от действия вертикальных динамических сил в интервале i , приведенных к эквивалентному симметричному циклу.

Сравнительные испытания вагонов-хопперов моделей 19-1272, 19-1272-01 и 19-1273-02 и результаты расчетно-экспериментальной оценки подтвердили назначенный срок службы вагона-хоппера модели 19-1272-01, который составляет 32 года.

Библиографический список

1. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении (СТОИР): утв. Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества, протокол от 16–17 октября 2012 г. № 57.

2. Цыганская Л. В., Наркизова Е. А. Методика обоснования срока службы грузовых вагонов на основании результатов испытаний вагонов аналогов // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XVII Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 09–12 июля 2024 г.). СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024.

3. Галов В. В., Башмаков В. А., Григорьев А. В. Оценка ресурса при соударении вагонов-цистерн современных конструкций производства АО «Рухимаш» // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18, № 2. С. 153–168. DOI 10.20295/1815–588X-2021-2-159-168. EDN HOJRAI

4. Коновалов Е. Н., Путято А. В. Прогнозирование ресурса несущих конструкций вагонов с различным техническим состоянием на основе результатов испытаний типового представителя // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3(51). С. 208–214. EDN WMELGT

5. Рудакова Е. А., Орлова А. М. Исследование динамических качеств сочлененного вагона-платформы на математических моделях // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2008. № 23. С. 85–88. EDN TUFFFZ

6. Воропай В. С. Прогнозирование срока службы вагонов-цистерн // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. № 21. С. 121–126. EDN TVTLZJ

Дата поступления: 07.09.2024

Решение о публикации: 15.10.2024

Контактная информация:

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

ХАМРАЕВА Эльмира Рустамовна — аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; hamrayewaelmira@gmail.com

НАРКИЗОВА Екатерина Александровна — канд. техн. наук, заместитель генерального директора по связям с общественностью АО «НВЦ «Вагоны»; ekaterina_jarova@mail.ru

Testing the methodology for justifying the service life of freight cars based on the results of analog car testing

L. V. Tsyganskaya¹, E. R. Hamraeva², E. A. Narkizova²

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

² JSC “R&D Center Wagons”, room 5n, floor 1, 22m, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190013, Russia

For citation: *Tsyganskaya L. V., Khamraeva E. R., Narkizova E. A. Testing the methodology for justifying the service life of freight cars based on the results of analog car testing // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 15–23. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-15-23*

Abstract

Purpose: the development and implementation of advanced load-bearing metal structures for bodies and frames, the unification of elements and assemblies using the most proven designs in operation, the technological refinement of individual elements, systems, and subsystems of cars; improving reliability, maintainability, and enhancing maintenance systems for rolling stock raises the issue of determining the service life of freight cars, considering the economic aspects of production and operation. **Method:** to confirm the service life of freight cars, an assessment and comparison of the results of durability and operational dynamic-strength tests of analog cars are carried out, as well as digital modeling in the “Universal Mechanism” software package. **Results:** as a result of testing this methodology, the service life of the 19-1272-01 model hopper car, which is 32 years, was confirmed. **Practical Significance:** the testing of the service life justification methodology was carried out on hopper cars of models 19-1272-01 and 19-1298 produced by JSC “Ruzhimmash”.

Keywords: freight car service life, extending freight car service life, service life justification methodology.

References

1. Polozhenie o sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gruzovyh vagonov, dopushchennyh v obrashchenie na zheleznodorozhnye puti obshchego pol'zovaniya v mezhdunarodnom soobshchenii (STOIR): utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva, protokol ot 16–17 oktyabrya 2012 g. No. 57. (In Russian)
2. Tsyganskaya L. V., Narkizova E. A. Metodika obosnovaniya sroka sluzhby gruzovyh vagonov na osnovanii rezul'tatov ispytaniy vagonov analogov // Podvizhnoj sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy HVII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii (Sankt-Peterburg, 09–12 iyulya 2024 g.). SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2024. (In Russian)
3. Galov V. V., Bashmakov V. A., Grigor'ev A. V. Ocenka resursa pri soudarenii vagonov-cistern sovremennykh konstrukcij proizvodstva AO «Ruzhimmash» // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2021. T. 18, No. 2. S. 153–168. DOI 10.20295/1815-588X-2021-2-159-168. EDN HOJRAI (In Russian)
4. Konovalov E. N., Putyato A. V. Prognozirovanie resursa nesushchih konstrukcij vagonov s razlichnym tekhnicheskim sostoyaniem na osnove rezul'tatov ispytaniy tipovogo predstavatelya // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2016. No. 3(51). S. 208–214. EDN WMELGT (In Russian)
5. Rudakova E. A., Orlova A. M. Issledovanie dinamicheskikh kachestv sochlenennogo vagona-platformy na matematicheskikh modelyah // Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu im. akademika V. Lazaryana. 2008. No. 23. S. 85–88. EDN TUFFFZ (In Russian)
6. Voropaj V. S. Prognozirovanie sroka sluzhby vagonov-cistern // Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2010. No. 21. S. 121–126. EDN TVTLZJ (In Russian)

Received: 07.09.2024

Accepted: 15.10.2024

Author's information:

Ludmila V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of “Wagons and Wagon Economy”; tcyganskaya@gmail.com

Elmira R. HAMRAEVA — Postgraduate Student of the Department of “Wagons and Carriage Facilities”; hamrayewaelmira@gmail.com

Ekaterina A. NARKIZOVA — PhD in Engineering, Deputy General Director for Public Relations of JSC NEC “Vagony”; ekaterina_jarova@mail.ru

УДК 629.463.32: 539.372

О причинах деформации обечайки котлов вагонов-цистерн для вязких нефтепродуктов

Л. В. Цыганская¹, Д. Г. Бейн², Н. А. Атаманчук²

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

² АО «НВЦ «Вагоны», Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 22 литера М, 1-й этаж, помещ. 5н

Для цитирования: Цыганская Л. В., Бейн Д. Г., Атаманчук Н. А. О причинах деформации обечайки котлов вагонов-цистерн для вязких нефтепродуктов // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 24–39. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-24-39

Аннотация

Цель: существующая проблема выявляемых в эксплуатации повреждений котлов вагонов-цистерн в следствие потери устойчивости требует новых подходов к теоретической и практической оценке возможных причин таких повреждений. Особую актуальность приобретает оценка сочетания различных факторов (в том числе влияния отклонения формы котла при его изготовлении) на возможность потери устойчивости в эксплуатации. **Метод:** для установления причин деформации котлов были проведены расчеты котла на устойчивость. Все расчеты проводились для фактических толщин, определенных по результатам измерений и толщинометрии. Для моделирования была выбрана модель вагона-цистерны с минимальными из измеренных толщинами. Расчеты проводились при действии нормативного значения внешнего давления и при сверхнормативных значениях внешнего давления. **Результаты:** проведенные расчеты устойчивости котла с фактически измеренными толщинами при действии внешнего избыточного давления показали, что потеря устойчивости котла: без отклонения формы от действия нормативного значения внешнего избыточного давления 40 кПа — не установлена; с локальными дефектами от сварки при действии нормативного значения внешнего избыточного давления 40 кПа — не установлена; без локальных дефектов от сварки с глобальным отклонением формы котла при действии избыточного внешнего давления 40 кПа — возможна при значении относительной овальности порядка 2,7 %; без глобального отклонения формы котла — возможна от действия сверхнормативного значения внешнего избыточного давления 79 кПа и выше. **Практическая значимость:** установлены возможные причины потери устойчивости котлов в эксплуатации. Причинами потери устойчивости котла могут быть глобальное отклонение формы котла при наличии относительной овальности порядка 2,7 %; действие сверхнормативного значения внешнего избыточного давления 79 кПа и выше, что возможно при нарушении технологии процесса разгрузки вагона-цистерны; сочетание наличия глобального отклонения формы котла и действия сверхнормативного значения внешнего избыточного давления вследствие нарушения технологии процесса разгрузки вагонов-цистерн.

Ключевые слова: вагон-цистерна, котел вагона-цистерны, потеря устойчивости, коэффициент запаса устойчивости, избыточное давление, коррозия котла, отклонение формы.

Введение

Актуальность работы связана с периодически возникающими в эксплуатации повреждениями котлов вагонов-цистерн, вызванными потерей устойчивости обечайки котла. Периодичность возникновения такого рода повреждений котлов вагонов-цистерн и их опасность для работоспособности котлов отмечены в статье «Оценка устойчивости котла цистерны на основе вариационного принципа Лагранжа» [1].

Повреждения вагонов-цистерн, вызванные потерей устойчивости котла, встречаются в том числе у котлов вагонов-цистерн для перевозки вязких нефтепродуктов. Пример вмятины обечайки котла в зоне паровой рубашки вследствие потери устойчивости показан на рис. 1.



Рис. 1. Вмятина обечайки котла в зоне паровой рубашки вследствие потери устойчивости: *а* — вид вмятины снаружи (паровая рубашка демонтирована);
б — вид вмятины изнутри котла

В работе «Потеря устойчивости котла вагона-цистерны при сливе вязких нефтепродуктов» [2] рассмотрен случай потери формы устойчивости котла вагона-цистерны модели 15-156-01, возможными причинами которого, по результатам работы, являются:

- нижний слив груза самотеком при неисправном или отсутствующем предохранительно-впускном клапане и при наличии коррозии среднего листа глубиной 1,3 мм со стороны паровой рубашки;
- нижний слив груза при закрытой крышке люка при исправном предохранительно-впускном клапане и при наличии коррозии среднего листа глубиной 2,5 мм со стороны паровой рубашки;

– нижний слив груза с помощью насоса при закрытой крышке люка при исправном предохранительно-впускном клапане, даже при отсутствии коррозии котла.

В работе «Анализ причин потери устойчивости котла цистерны при перевозке газоконденсата в зимнее время года» [3] установлено, что потеря устойчивости котла вагона-цистерны возможна при давлении свыше 25 кПа и глубине коррозии 3 мм при снижении температуры атмосферного воздуха до -40 °С.

Целью настоящей работы являлось установление других (помимо коррозии и нарушения технологии разгрузки) возможных причин необратимых деформаций котлов порожних вагонов-цистерн для перевозки вязких нефтепродуктов, связанных с отклонениями формы котла и сочетанием различных факторов.

Для достижения указанной цели было необходимо:

- 1) провести анализ величины коррозии на соответствие «Нормам...» [4] и ее влияния на устойчивость котла;
- 2) оценить влияние локальных дефектов от сварки на потерю устойчивости котла;
- 3) оценить влияние отклонения формы котла на устойчивость;
- 4) оценить влияние внешнего избыточного давления на потерю устойчивости котла.

Под устойчивостью котла вагона-цистерны понимается способность оболочки котла сохранять форму при действии внешнего избыточного давления и отсутствии притока воздуха внутрь котла (внешнее избыточное давление возникает при условии падения давления внутри котла ниже атмосферного, такое падение возможно при резком изменении наружной температуры и закрытой крышке люка, а также неисправном или временно неработающем предохранительно-впускном клапане).

Задачами исследования являлись:

- 1) выполнение сравнительной оценки для рассматриваемых моделей вагонов-цистерн величин фактической толщины стенок котла цистерны со значениями толщины стенок, определенными в технических условиях и/или в действующем стандарте и требованиях к вагону-цистерне на момент его постройки;

- 2) установление причин потери устойчивости котла вагонов-цистерн путем проведения необходимых исследований вагонов:

– при проведении толщинометрии котла определить влияние изменений локальной толщины стенки обечайки (за счет местных утончений листов обечайки котла в зонах потери устойчивости, визуально видимых пористостей и раковин или других дефектов металла) на деформации цилиндрической части котла, в том числе в месте монтажа паровой рубашки и без нее, показать толщину стенок в зонах, примыкающих к месту деформации;

– методом математического моделирования выполнить расчет устойчивости исследуемых котлов вагонов-цистерн;

– подробно прописать физику процесса возникновения потери устойчивости котла (под действием каких сил это происходит) без потери устойчивости паровой рубашки;

– установить факторы, оказывающие влияние на возникновение деформаций котла, в том числе односторонних деформаций (влияние расположения патрубков в паровой рубашке, характеристики пара, технологии выгрузки — с использованием разогрева груза (с использованием гидромониторов) и/или сверху и т. д.); было ли это вызвано воздействием агрессивной среды изнутри котла или снаружи, под паровой рубашкой.

Исследование вагонов-цистерн для вязких нефтепродуктов из эксплуатационного парка

Согласно результатам технического осмотра и толщинометрии отдельных моделей вагонов-цистерн, были выявлены неисправности:

- деформация обечайки котлов, заплата на среднем листе обечайки котла;
- деформация паровой рубашки;
- коррозия листов котла, которая составляет не более 8,3 % за весь срок эксплуатации вагона или в среднем 0,043 мм/год, что выше рекомендуемого «Нормами...» [4] значения для вагонов-цистерн для нефти и нефтепродуктов (0,04 мм/год).

Проведенные исследования показали, что при данной коррозии без дополнительных факторов при действии нормативного значения внешнего избыточного давления 40 кПа потеря устойчивости котла не происходит.

Для установления причин деформации котлов были проведены расчеты на устойчивость котла. Все расчеты проводились для фактических толщин, определенных по результатам измерений и толщинометрии вагонов-цистерн. Для моделирования была выбрана модель вагона-цистерны с минимальными из измеренных толщинами. Расчеты проводились при действии нормативного значения внешнего давления и при сверхнормативных значениях внешнего давления.

Расчеты проводились в несколько этапов:

- Этап 1: расчет котла без отклонения формы. Цель — определить значение внешнего избыточного давления, при котором возможна потеря устойчивости котла с фактически измеренными толщинами.

- Этап 2: расчет котла с имитацией локальной деформации от сварки (сварочный дефект). Цель — определить влияние локальных сварочных дефектов на потерю устойчивости котла с фактически измеренными толщинами.

- Этап 3: расчет котла с глобальным отклонением формы. Цель — определить влияние глобального отклонения формы (относительной овальности) котла на потерю устойчивости котла с фактически измеренными толщинами.

На рис. 2 представлена первая форма потери устойчивости котла при действии нормативного значения внешнего давления 40 кПа и с фактически измеренными толщинами без сварочных дефектов и без глобального отклонения формы котла.

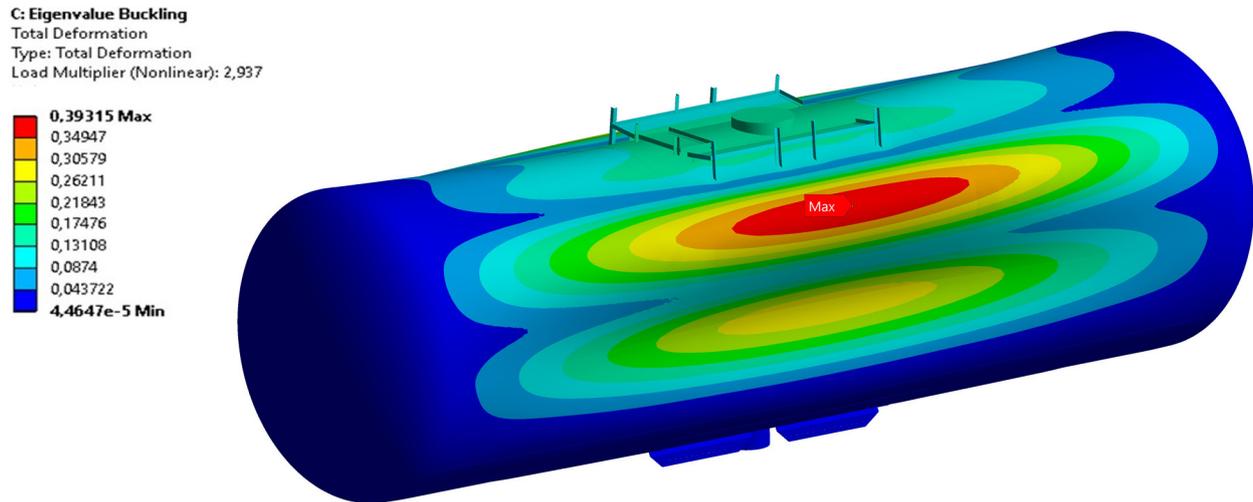


Рис. 2. Первая форма потери устойчивости котла с фактически измеренными толщинами, без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла при внешнем давлении 40 кПа, при коэффициенте запаса устойчивости $k_{yc} = 2,937$

Коэффициент запаса устойчивости k_{yc} составил 2,937, что выше минимально допускаемых коэффициентов запаса устойчивости, равных 1,5 в соответствии с ГОСТ 33211 [5] и 1,1 в соответствии с «Нормами...» [4]. Следовательно, котел с фактически измеренными толщинами при действии нормативного значения внешнего давления 40 кПа удовлетворяет требованиям ГОСТ 33211 [5] и «Норм...» [4] в части устойчивости.

Далее для оценки влияния повышения внешнего давления на устойчивость котла были проведены расчеты котла с фактически измеренными толщинами без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла на устойчивость при действии сверхнормативного внешнего давления.

Влияние гидростатического давления жидкого груза, находящегося внутри котла и повышающего критическое значение внешнего давления (как это показано в работе [6]), при моделировании не учитывалось.

В табл. 1 представлены расчетные значения коэффициента запаса устойчивости k_{yc} для первой формы потери устойчивости котла с фактически измеренными толщинами без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла при действии сверхнормативного значения внешнего давления от 45 до 79 кПа.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчета коэффициентов запаса устойчивости котла k_{yc} с фактически измеренными толщинами без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла при действии сверхнормативного значения внешнего давления от 45 до 79 кПа

Значение вакуума, кПа	Расчетное значение коэффициента запаса устойчивости k_{yc}
45	2,502
50	2,267
55	1,867
60	1,629
65	1,427
70	1,255
79	1,105

На рис. 3 представлен график изменения коэффициента устойчивости котла k_{yc} с фактически измеренными толщинами, без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла, в зависимости от величины внешнего давления.

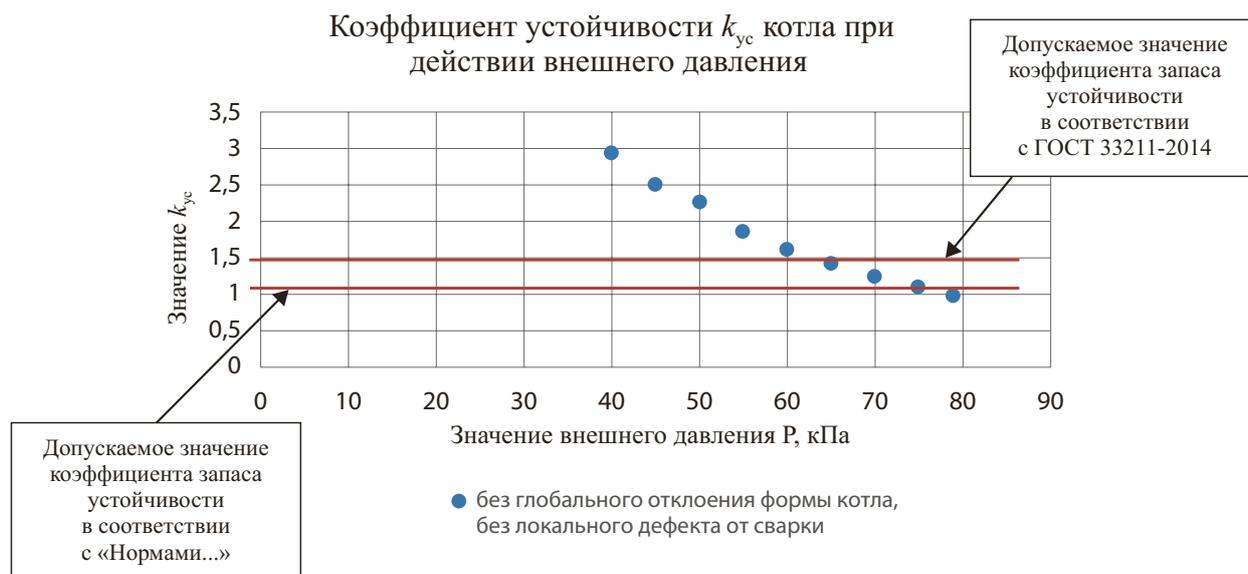


Рис. 3. График изменения коэффициента устойчивости котла k_{yc} с фактически измеренными толщинами, без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла, в зависимости от величины внешнего давления

Из графика видно, что при фактических толщинах котла, без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла, при действии внешнего давления 65 кПа и выше котел не обладает достаточным коэффициентом запаса устойчивости в соответствии с ГОСТ 33211 [5], а при действии внешнего давления выше 75 кПа не обладает достаточным коэффициентом запаса устойчивости в соответствии с «Нормами...» [5].

При повышении внешнего давления до сверхнормативного значения (до 79 кПа и выше) при фактически измеренных толщинах без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла может произойти потеря устойчивости. Это возможно при резком перепаде температуры, как показано в работах [3] и [7].

При этом форма потери устойчивости котла при фактических толщинах котла, без сварочных дефектов и без глобального отклонения котла, при расчетах соответствует фактической форме обмеренных котлов вагонов-цистерн.

Вывод: без наличия сварочных дефектов и без глобального отклонения формы котла с фактически измеренными толщинами потеря устойчивости может произойти от внешнего избыточного давления, равного 79 кПа и выше.

Поэтому далее для выявления причин деформации котла рассматривалось влияние дефектов котла и отклонения формы котла на потерю устойчивости.

В расчете по 2-му этапу для определения влияния локальных сварочных дефектов котла на устойчивость были рассмотрены возможные сварочные дефекты по всей длине обечайки, для чего в расчетной модели была смоделирована вмятина, которая показана на рис. 4.

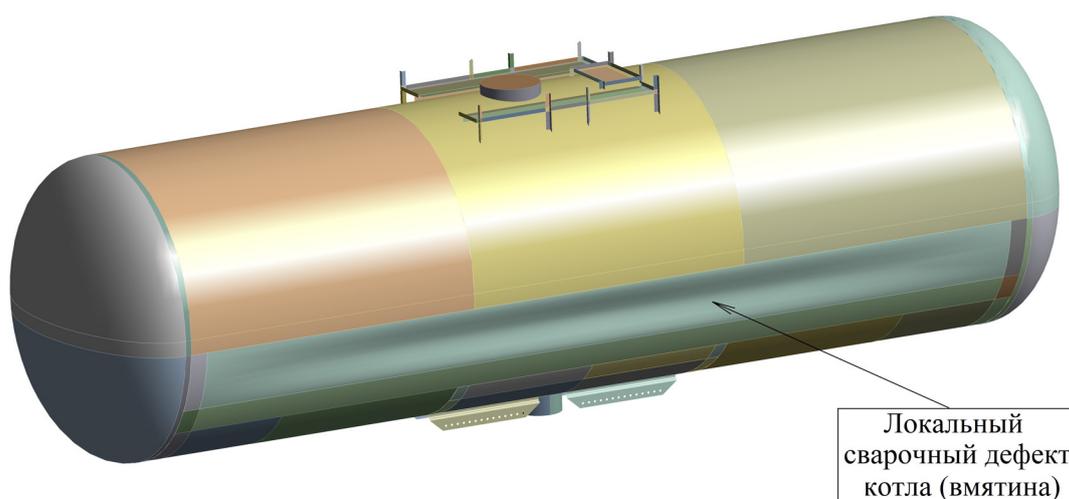


Рис. 4. Расчетная модель котла с возможным локальным сварочным дефектом

Максимальный размер глубины вмятины расположен между паровой рубашкой и средним листом обечайки котла в его центральной части. Форма вмятины выбрана по результатам предварительной оценки различных форм вмятин, при которых происходит изменение коэффициента устойчивости котла k_{yc} от внешнего избыточного давления. Рассматривалось несколько вариантов размера глубины вмятины h : 10 мм, 50 мм, 100 мм, 150 мм. Форма локального сварочного дефекта (вмятины) показана на рис. 5.

Расчеты показали, что наименьшими коэффициентами потери устойчивости обладает модель котла с вмятиной глубиной 100 мм.

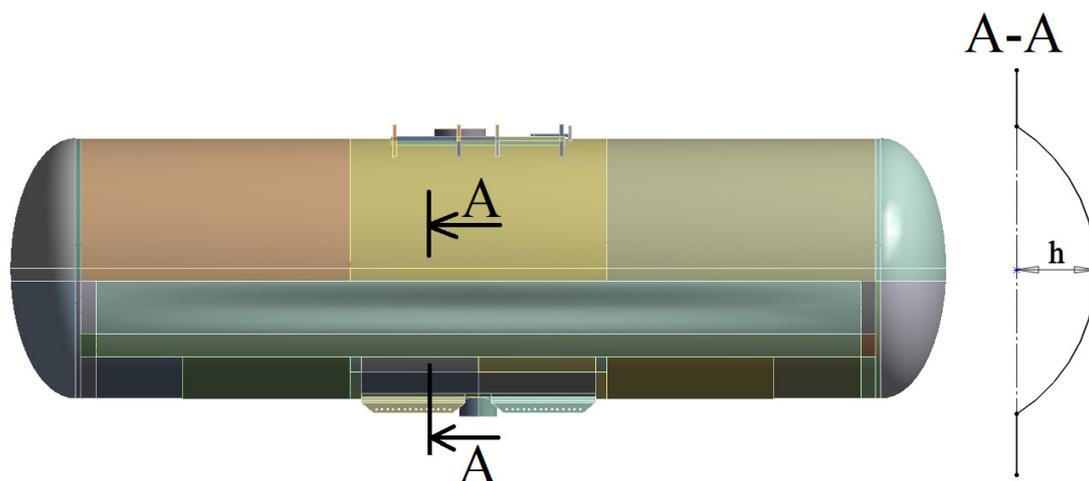


Рис. 5. Форма локального сварочного дефекта (вмятины)

В табл. 2 представлены расчетные значения коэффициента запаса устойчивости k_{yc} для первой формы потери устойчивости котла с локальным сварочным дефектом при действии вакуума от нормативного значения 40 кПа до сверхнормативного 74 кПа.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета коэффициентов запаса устойчивости котла k_{yc} с локальным сварочным дефектом при действии вакуума от нормативного значения 40 кПа до сверхнормативного 74 кПа

Значение вакуума, кПа	Расчетное значение коэффициента запаса устойчивости k_{yc}
40	2,660
45	2,258
50	1,936
55	1,672
60	1,452
65	1,265
70	1,107
74	0,993

На рис. 6 показан график изменения коэффициента устойчивости k_{yc} в зависимости от величины внешнего давления для котла без локального дефекта от сварки и котла с локальным дефектом от сварки.

Из графика на рис. 5 можно сделать вывод, что с локальным дефектом котла от сварки коэффициент устойчивости котла k_{yc} от внешнего избыточного давления снижается незначительно. При этом деформация при первой форме потери устойчивости появляется также и в зоне локального дефекта от сварки. Потеря устойчивости при нормативном значении давления невозможна.

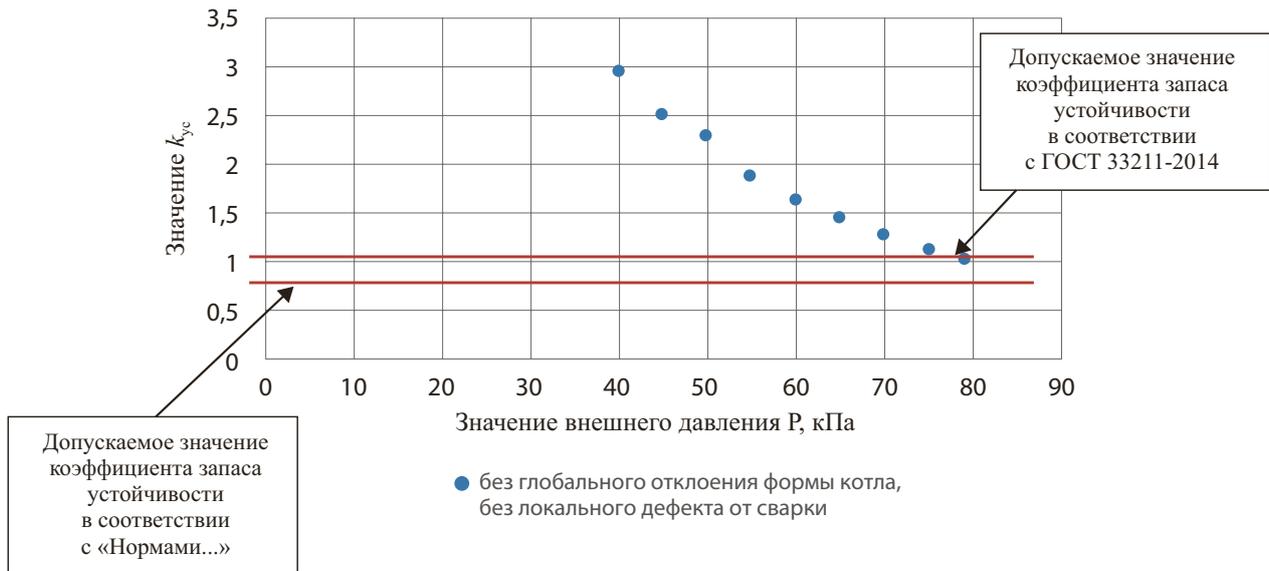


Рис. 6. График изменения коэффициента устойчивости k_{yc} в зависимости от величины внешнего давления для котла без локального дефекта от сварки и котла с локальным дефектом от сварки

Для исследования влияния глобального отклонения формы котла на потерю устойчивости в расчетную схему закладывалось возможное глобальное отклонение формы котла (относительная овальность), показанное на рис. 7.

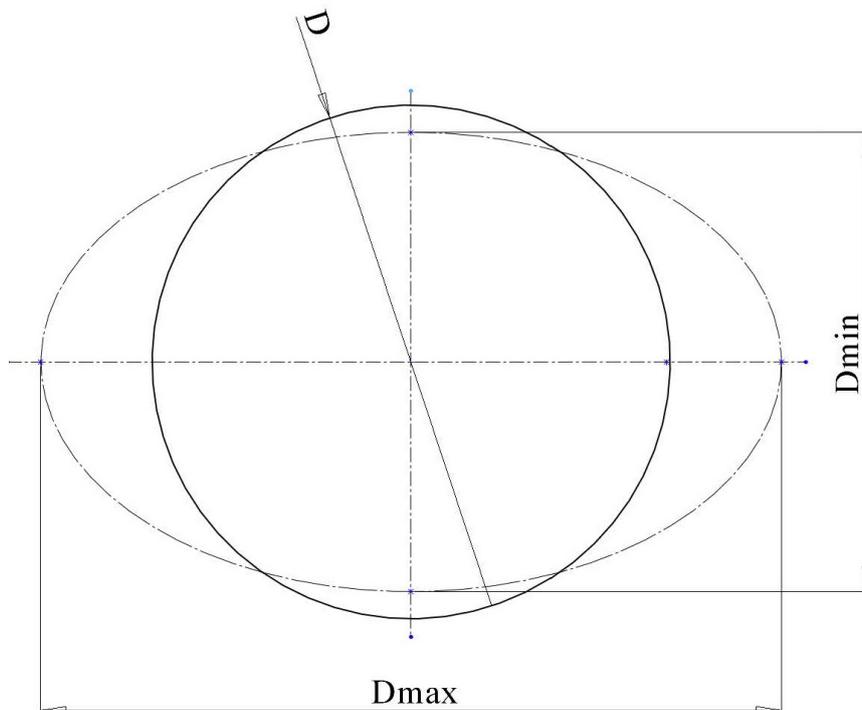


Рис. 7. Глобальное отклонение формы котла

Согласно ГОСТ 34347 [8] относительная овальность корпуса сосудов вычисляется по формуле:

$$a = \frac{2(D_{max} - D_{min})}{D_{max} + D_{min}} 100, \quad (1)$$

где D_{max} , D_{min} — соответственно наибольший и наименьший внутренние диаметры корпуса (мм), измеренные в одном поперечном сечении, как показано на рис. 6.

В табл. 3 приведено несколько случаев возможных относительных овальностей котла, с учетом которых были произведены расчеты.

ТАБЛИЦА 3. Случаи возможных относительных овальностей котла, с учетом которых были произведены расчеты

№ случая	D номинальный внутренний, мм	D_{max}	D_{min}	a , %
1	3000	3020,2	2990,6	0,985
2		3030,6	2985,9	1,486
3		3039,8	2981,6	1,933
4		3055,6	2974,3	2,697

Далее для оценки влияния относительной овальности на устойчивость котла были произведены расчеты котла с фактически измеренными толщинами, без локального сварочного дефекта, с учетом приведенных выше случаев возможных относительных овальностей котла.

Поскольку расчеты устойчивости котла от внешнего избыточного давления производятся для фактических измеренных толщин и с возможными отклонениями формы котла, а в «Нормах...» [4] и ГОСТ 33211 [5] приведены минимально допускаемые коэффициенты запаса устойчивости и не устанавливаются требования к учету отклонения формы потери устойчивости, то в качестве критерия рассматривался случай, когда коэффициент запаса устойчивости менее 1.

В табл. 4 представлены расчетные значения коэффициента запаса устойчивости для первой формы потери устойчивости котла с отклонением формы при действии нормативного значения внешнего давления и максимального сверхнормативного, при котором возможна потеря устойчивости.

В табл. 5 сведены минимальные значения внешнего давления, при которых возможна потеря устойчивости в зависимости от величины отклонения формы котла.

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета коэффициентов запаса устойчивости k_{yc} для первой формы потери устойчивости котла с отклонением формы при действии нормативного значения внешнего давления и максимального сверхнормативного

Значение вакуума, кПа	№ случая	Относительная овальность, %	Расчетное значение коэффициента запаса устойчивости k_{yc}
40	1	0,985	2,142
	2	1,486	1,753
	3	1,933	1,451
	4	2,697	0,992
70	2	0,985	0,997
64	2	1,486	0,987
57	3	1,933	0,996

ТАБЛИЦА 5. Минимальные значения внешнего давления, при котором возможна потеря устойчивости при отклонении формы котла

Отклонение формы котла вдоль поперечной оси, мм, для случая №	Минимальное значение внешнего давления, при котором возможна потеря устойчивости, кПа (значение коэффициента устойчивости ниже 1)
1	70
2	64
3	57
4	40

На рис. 8 представлен график сравнения полученных значений коэффициентов устойчивости k_{yc} для котла без глобального отклонения формы и без локального сварочного дефекта; котла без глобального отклонения формы с локальным сварочным дефектом; котла с глобальным отклонением формы (относительной овальностью).

Из графика, показанного на рис. 7, можно сделать вывод, что при наличии глобального отклонения формы котла (относительной овальности) при действии нормативного внешнего давления 40 кПа коэффициент устойчивости k_{yc} значительно снижается. При этом чем больше величина относительной овальности котла, тем ниже коэффициент устойчивости k_{yc} .

Расчеты устойчивости котла с фактически измеренными толщинами без локального дефекта от сварки с глобальным отклонением формы котла при действии внешнего избыточного давления показали, что потеря устойчивости (коэффициент запаса устойчивости ниже 1) возможна при:

– относительной овальности 0,985 и менее, при этом внешнее давление, при котором возможна потеря устойчивости, должно быть 70 кПа и более;

- относительной овальности 1,486 и менее, при этом внешнее давление, при котором возможна потеря устойчивости, должно быть 64 кПа и более;
- относительной овальности 1,933 и менее, при этом внешнее давление, при котором возможна потеря устойчивости, должно быть 57 кПа и более;
- относительной овальности 2,697 и менее, при этом внешнее давление, при котором возможна потеря устойчивости, составляет 40 кПа и более.

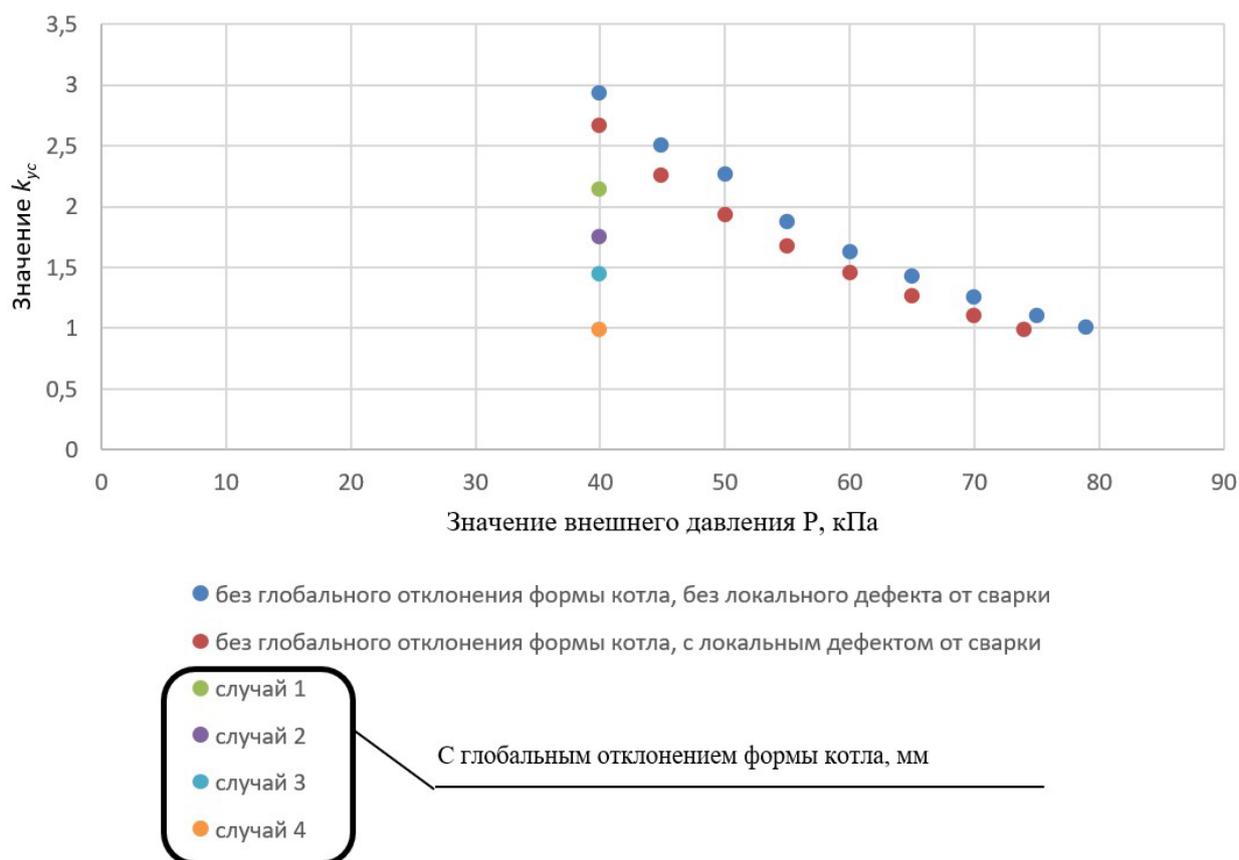


Рис. 8. График сравнения полученных значений коэффициентов устойчивости k_{yc} для котла без глобального отклонения формы и без локального сварочного дефекта и котла с локальным сварочным дефектом и для котла с глобальным отклонением формы (относительной овальностью)

Анализ результатов

Проведенные расчеты устойчивости котла с фактически измеренными толщинами при действии внешнего избыточного давления показали:

- потеря устойчивости котла без отклонения формы от действия нормативного значения внешнего избыточного давления 40 кПа не установлена;
- потеря устойчивости котла с локальными дефектами от сварки при действии нормативного значения внешнего избыточного давления 40 кПа не установлена;

– потеря устойчивости котла без локальных дефектов от сварки с глобальным отклонением формы котла при действии избыточного внешнего давления 40 кПа возможна при значении относительной овальности порядка 2,7%;

– потеря устойчивости котла без глобального отклонения формы котла возможна от действия сверхнормативного значения внешнего избыточного давления 79 кПа и выше.

Следовательно, потеря устойчивости котла может происходить либо при глобальном отклонении формы котла при наличии относительной овальности порядка 2,7%, либо при действии сверхнормативного значения внешнего избыточного давления 79 кПа и выше, либо при сочетании этих факторов.

Заключение

Выявленные в эксплуатации деформации котлов вагонов-цистерн с паровой рубашкой (для перевозки вязких нефтепродуктов) происходят вследствие потери устойчивости.

Причинами потери устойчивости котла могут быть:

1) глобальное отклонение формы котла при наличии относительной овальности порядка 2,7%;

2) действие сверхнормативного значения внешнего избыточного давления 79 кПа и выше, что возможно при нарушении технологии процесса разгрузки вагона-цистерны;

3) сочетание наличия глобального отклонения формы котла и действия сверхнормативного значения внешнего избыточного давления вследствие нарушения технологии процесса разгрузки вагонов-цистерн.

Библиографический список

1. Григорьев П. С., Беспалько С. В., Коржин С. Н. Оценка устойчивости котла цистерны на основе вариационного принципа Лагранжа // Наука и техника транспорта. 2022. № 2. С. 39–46. EDN ANRELI

2. Балалаев А. Н., Жебанов А. В., Коркина С. В. Потеря устойчивости котла вагона-цистерны при сливе вязких нефтепродуктов // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 1(97). С. 7–11. EDN DJKVTN

3. Балалаев А. Н., Жебанов А. В., Коркина С. В. Анализ причин потери устойчивости котла цистерны при перевозке газоконденсата в зимнее время года // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 2(92). С. 7–13. EDN NDKXQZ

4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996.

5. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам.

6. Оценка устойчивости цилиндрической оболочки котла цистерны с учетом заполнения ее жидким грузом / П. С. Григорьев [и др.] // Транспорт Урала. 2021. № 4(71). С. 40–45. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-40-45. EDN HQKDQD

7. Григорьев П. С., Беспалько С. В., Гончаров В. В. Определение критических температур потери устойчивости пологих цилиндрических оболочек // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13, № 7. С. 324–328. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-7-324-328. EDN FHJJCX

8. ГОСТ 34347. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия (ISO 16528-1:2007, NEQ, ISO 16528-2:2007, NEQ).

Дата поступления: 22.08.2024

Решение о публикации: 10.10.2024

Контактная информация:

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

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

АТАМАНЧУК Наталия Александровна — канд. техн. наук, начальник отдела прочностных расчетов НИБ; nataliya.atamantchouk@nvc-vagon.ru

On the causes of shell deformation in tank car boilers for viscous petroleum products

L. V. Tsyganskaya¹, D. G. Bein², N. A. Atamanchuk²

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

² JSC “Research and Development Center “Vagony”, Office 5N, 1st Floor, 22 Litera M, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190013, Russia

For citation: *Tsyganskaya L. V., Bein D. G., Atamanchuk N. A. On the causes of shell deformation in tank car boilers for viscous petroleum products // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 24–39. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-24-39*

Abstract

Purpose: the existing problem of detected damages to tank car boilers during operation due to loss of stability requires new approaches to both theoretical and practical assessment of possible causes of such damages. The evaluation of the combination of various factors, including the impact of shape deviation of the boiler during its manufacture, on the possibility of loss of stability during operation is of particular relevance.

Method: to determine the causes of boiler deformation, stability calculations were performed on the boiler. All calculations were conducted for actual thicknesses determined by measurement and thickness gauging.

A tank car model with the minimum measured thicknesses was selected for modeling. Calculations were carried out under the action of the standard external pressure value and under excessive external pressure values. **Results:** stability calculations of the boiler with the actually measured thicknesses under the influence of external excess pressure showed that loss of stability in the boiler: without shape deviation under the action of the standard external excess pressure of 40 kPa was not detected; with local defects from welding under the action of the standard external excess pressure of 40 kPa was not detected; without local welding defects but with a global shape deviation of the boiler under the action of external excess pressure of 40 kPa is possible with a relative ovality of about 2.7 %; without global shape deviation of the boiler, it is possible under the influence of excessive external pressure of 79 kPa and above. **Practical significance:** possible causes of boiler instability during operation were identified. The cause of boiler instability may be a global shape deviation of the boiler with a relative ovality of about 2.7 %; the effect of excessive external pressure of 79 kPa and above, which is possible due to a violation of the tank car unloading process; a combination of global shape deviation of the boiler and the effect of excessive external pressure due to a violation of the tank car unloading process.

Keywords: tank car, tank car boiler, loss of stability, stability margin coefficient, excess pressure, boiler corrosion, shape deviation.

References

1. Grigor'ev P. S., Bepal'ko S. V., Korzhin S. N. Ocenka ustojchivosti kotla cisterny na osnove variacionnogo principa Lagranzha // Nauka i tekhnika transporta. 2022. No. 2. S. 39–46. EDN AN-RELI (In Russian)
2. Balalaev A. N., Zhebanov A. V., Korkina S. V. Poterya ustojchivosti kotla vagona-cisterny pri slive vyazkih nefteproduktov // Vestnik transporta Povolzh'ya. 2023. No. 1(97). S. 7–11. EDN DJKVTN (In Russian)
3. Balalaev A. N., Zhebanov A. V., Korkina S. V. Analiz prichin poteri ustojchivosti kotla cisterny pri perevozke gazokondensata v zimnee vremya goda // Vestnik transporta Povolzh'ya. 2022. No. 2(92). S. 7–13. EDN NDKXQZ (In Russian)
4. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznyh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh). M.: GosNIIV-VNIIZhT, 1996. (In Russian)
5. GOST 33211-2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam. (In Russian)
6. Ocenka ustojchivosti cilindricheskoj obolochki kotla cisterny s uchetom zapolneniya ee zhidkim gruzom / P. S. Grigor'ev [i dr.] // Transport Urala. 2021. No. 4(71). S. 40–45. DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-40-45. EDN HQKDQD (In Russian)
7. Grigor'ev P. S., Bepal'ko S. V., Goncharov V. V. Opredelenie kriticheskikh temperatur poteri ustojchivosti pologih cilindricheskikh obolochek // Teplovye processy v tekhnike. 2021. T. 13, No. 7. S. 324–328. DOI 10.34759/tpt-2021-13-7-324-328. EDN FHJJCX (In Russian)
8. GOST 34347. Sosudy i apparaty stal'nye svarnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya (ISO 16528-1:2007, NEQ, ISO 16528-2:2007, NEQ). (In Russian)

Received: 22.08.2024

Accepted: 10.10.2024

Author's information:

Ludmila V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of “Wagons and Wagon Economy”; tcyganskaya@gmail.com

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

Natalia A. ATAMANCHUK — PhD in Engineering, Head of Strength Calculations Department NIB; nataliya.atamantchouk@nvc-vagon.ru

УДК 625.041.2

Стабильность геометрии рельсовой колеи на переходных участках

Е. И. Шехтман, В. А. Черняева, И. С. Игошев, А. А. Чупрынин

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

Для цитирования: Шехтман Е. И., Черняева В. А., Игошев И. С., Чупрынин А. А. Стабильность геометрии рельсовой колеи на переходных участках // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 40–52. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-40-52

Аннотация

Цель: рассмотрение конструктивно-технологических решений для переходных участков в зоне уравнивательных стыков, сопряжения конструкций с различной жесткостью, стрелочных переводов, переездов, малых искусственных сооружений, направленных на повышение стабильности рельсовой колеи. **Методы:** штамповые испытания материала балластного слоя, статистический анализ данных. **Результаты:** приведены результаты измерения модуля деформации балластного слоя, исследования неравноупругости, оценки качества и однородности уплотнения балластного слоя для различных конструкций железнодорожного пути; рассмотрены конструктивно-технологические решения для переходных участков, в частности применение щебеночного балласта специально подобранного зернового и минералогического состава, оптимизация жесткости посредством устройства слоя переменной толщины, стабилизация балластной призмы геосинтетическими материалами. **Практическая значимость:** приведены конструктивно-технологические решения для переходных участков, направленные на сокращение периода стабилизации балластного слоя переходных участков, увеличение срока нормальной эксплуатации с учетом действующих динамических нагрузок, возникающих вследствие наличия стыков, динамических неровностей, неравноупругости железнодорожного пути и неоднородности уплотнения балластной призмы переходных участков, обеспечение равноупругости балластного слоя переходных участков.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельсовая колея, геометрия рельсовой колеи, стабильность геометрии рельсовой колеи, стрелочный перевод, переходные участки, динамическая неровность, балласт, щебень.

Введение

На участках железнодорожного пути по длине имеются зоны с различной интенсивностью накопления остаточных деформаций, в частности это переходные участки в зоне уравнивательных стыков, сопряжения конструкций с различной жесткостью, стрелочных переводов, переездов, малых искусственных сооружений и т. п. Особенностью этих участков является их нестабильное состояние сразу после укладки пути на всем протяжении жизненного цикла.

К основным причинам, влияющим на снижение стабильности геометрии рельсовой колеи и увеличение интенсивности накопления остаточных деформаций на переходных участках, можно отнести:

1. Возникновение динамической неровности как следствие неравноупругости подрельсового основания в продольном направлении. В ранее опубликованных работах авторами статьи проведен анализ накопления остаточных деформаций, который показывает систематическое образование геометрических неровностей на примыкающих участках в зоне стрелочных переводов, увеличенный темп интенсивности образования отступлений 2, 3 и 4-й степеней по сравнению с обычными прилегающими участками.

2. В условиях залегания прочных грунтов в основании земляного полотна снижение или недостаточность прочностных и деформативных характеристик грунтов балластного слоя с учетом динамических (ударно-динамических) воздействий, характерных для переходных участков.

3. Качество и неоднородность уплотнения балласта в продольном и поперечном (вдоль шпалы) направлениях (имеет место в том числе и на обычных участках). Оценка состояния железнодорожного пути [2–4] после проведения выправочно-подбивочных работ показывает, что балласт недостаточно уплотнен в шпальных ящиках и под концами шпал, особенно железобетонных. Неравномерность уплотнения балластной призмы приводит к расстройству пути вследствие воздействия поездных динамических нагрузок. Сокращаются межремонтные сроки проведения ремонта пути, что приводит к увеличению затрат на техническое обслуживание железнодорожного пути.

Указанные выше особенности вызывают дополнительные динамические воздействия на элементы железнодорожного пути, вертикальные и горизонтальные ускорения, ограничивают скорости движения поездов и таким образом создают более тяжелые условия работы, чем для обычного пути на перегоне.

Конструктивно-технологические решения для повышения стабильности геометрии рельсовой колеи, снижения величины и неравномерности накопления остаточных деформаций балластного слоя переходных участков должны быть направлены:

- на сокращение периода стабилизации балластного слоя (рис. 1);
- на увеличение срока нормальной эксплуатации с учетом действующих динамических нагрузок, возникающих вследствие наличия стыков, динамических неровностей, неравноупругости железнодорожного пути, неоднородности уплотнения балластной призмы (рис. 1);
- на обеспечение равноупругости балластного слоя.

Исследование неравноупругости, оценка качества и однородности уплотнения балластного слоя для различных конструкций железнодорожного пути

Для косвенной оценки неравноупругости, качества и однородности уплотнения балласта или грунта земляного полотна предлагается использовать модуль деформации при динамическом нагружении (E_{vd} , МПа) и его коэффициент вариации (C_v).

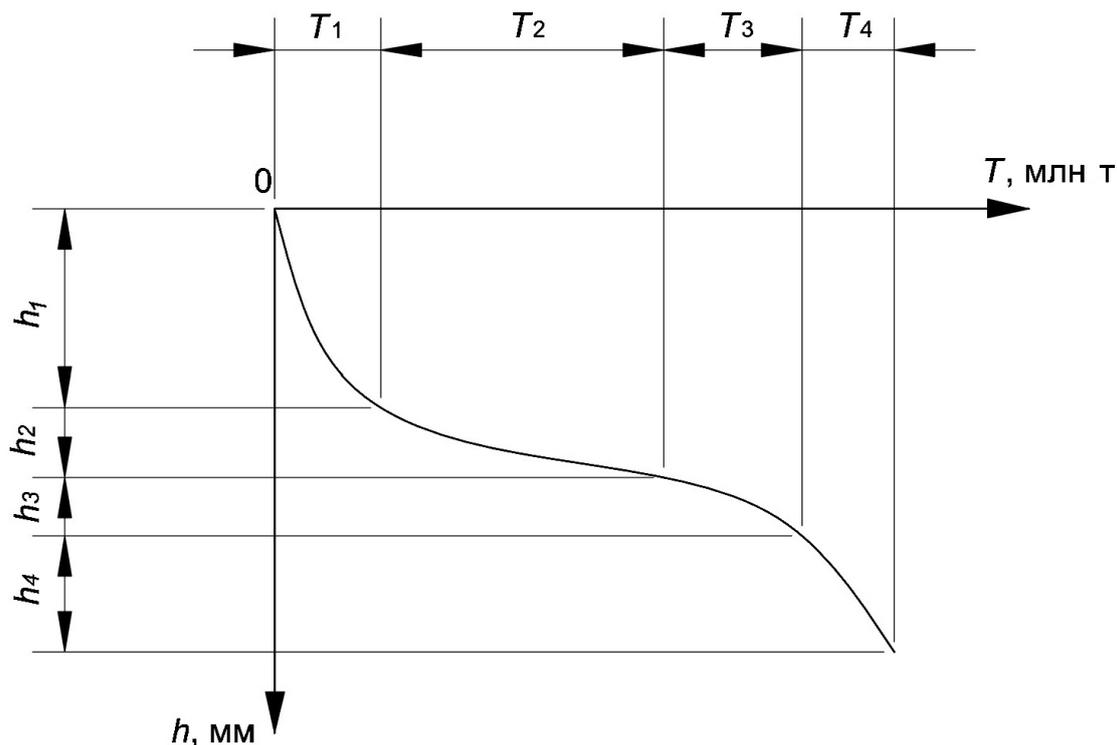


Рис. 1. Накопление остаточных деформаций в балластном слое:

T_1 — период стабилизации с интенсивным и постепенно затухающим накоплением остаточных деформаций (h_1) в балластном слое;

T_2 — нормальная эксплуатация, когда остаточные деформации (h_2) накапливаются медленно;

T_3 — эксплуатация с постепенным увеличением остаточных деформаций (h_3);

T_4 — период с интенсификацией накопления остаточных деформаций (h_4)

Сущность метода заключается в проведении динамического нагружения на поверхности балласта или грунта земляного полотна (рис. 2) с определением осадки нагрузочной плиты от прилагаемой нагрузки и последующим расчетом показателей деформируемости [5].

Область применения прибора — контроль качества уплотнения конструктивных слоев земляного полотна, его основания и балластного слоя.

В каждом из указанных мест измерений (рис. 3) контроль модуля деформации объемного уплотнения балластной призмы проводился в шпальных ящиках в семи измерениях:

- 1) на плече балластной призмы по торцам шпал — два измерения;
- 2) в шпальном ящике снаружи и внутри колеи правого и левого рельса — четыре измерения;
- 3) в шпальном ящике по оси пути — одно измерение.

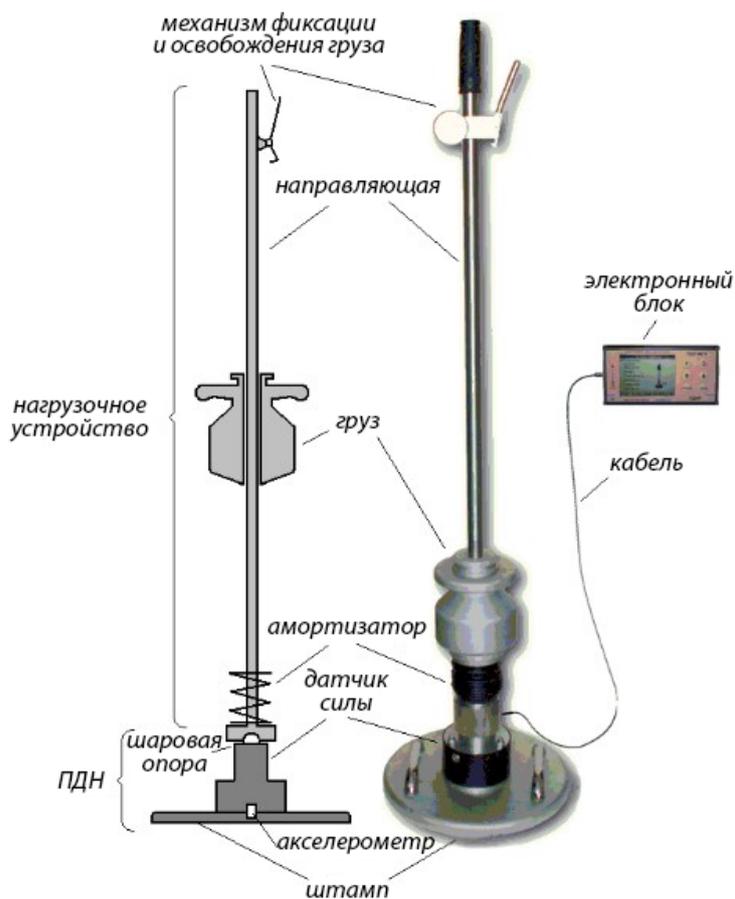


Рис. 2. Прибор измерения модуля деформации грунтов [5]

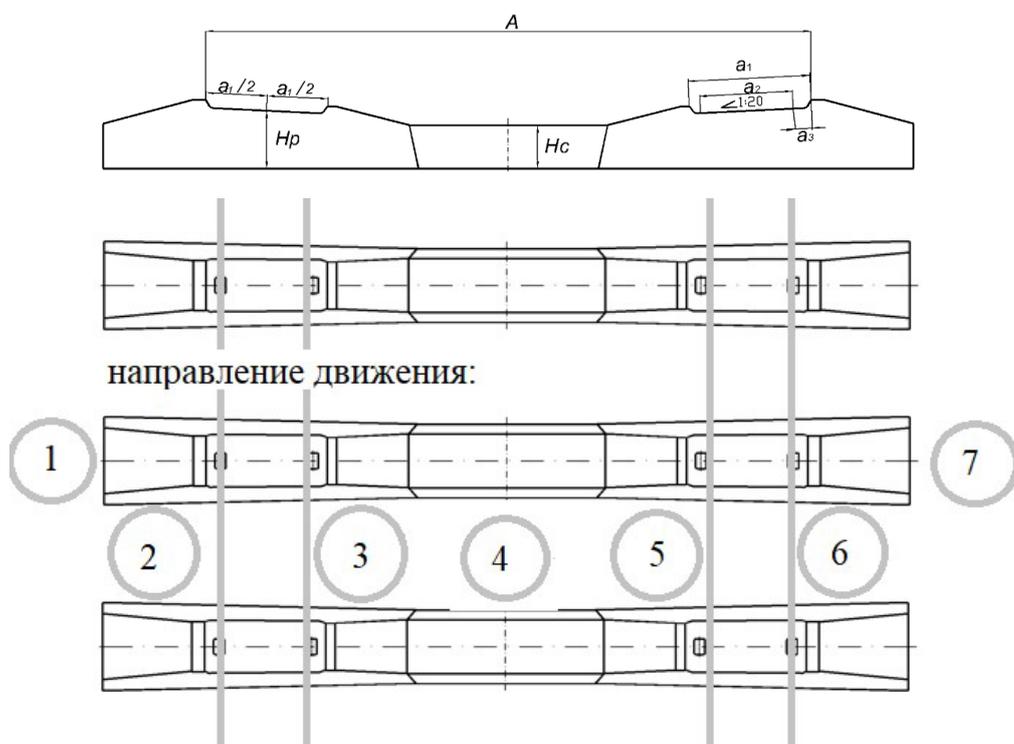


Рис. 3. Схема измерения модуля деформации



Рис. 4. Измерение модуля деформации (фото авторов):

а — переходный участок сопряжения со стрелочным переводом; *б* — прибор измерения модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4.01 «УДАР»

Для исследования неравноупругости балластного слоя были проведены измерения модуля деформации на стрелочном переводе на двух участках: участке сопряжения со стрелочным переводом со стороны стрелки и в зоне переднего вылета рамного рельса. Результаты измерений (табл. 1, рис. 5) свидетельствуют о неравноупругости балластного слоя, коэффициент вариации по семи точкам двух сечений составил 17% и 14% соответственно.

ТАБЛИЦА 1. Средние значения модуля деформации

Характеристика балластного материала участка измерения	Среднее значение модуля деформации по семи измерениям, МПа	Коэффициент вариации
Гранит согласно ГОСТ 7392 (участок сопряжения со стрелочным переводом со стороны стрелки, деревянные шпалы) (рис. 5а)	125	17 %
Гранит согласно ГОСТ 7392 (передний вылет рамного рельса, деревянные брусья) (рис. 5б)	137	14 %

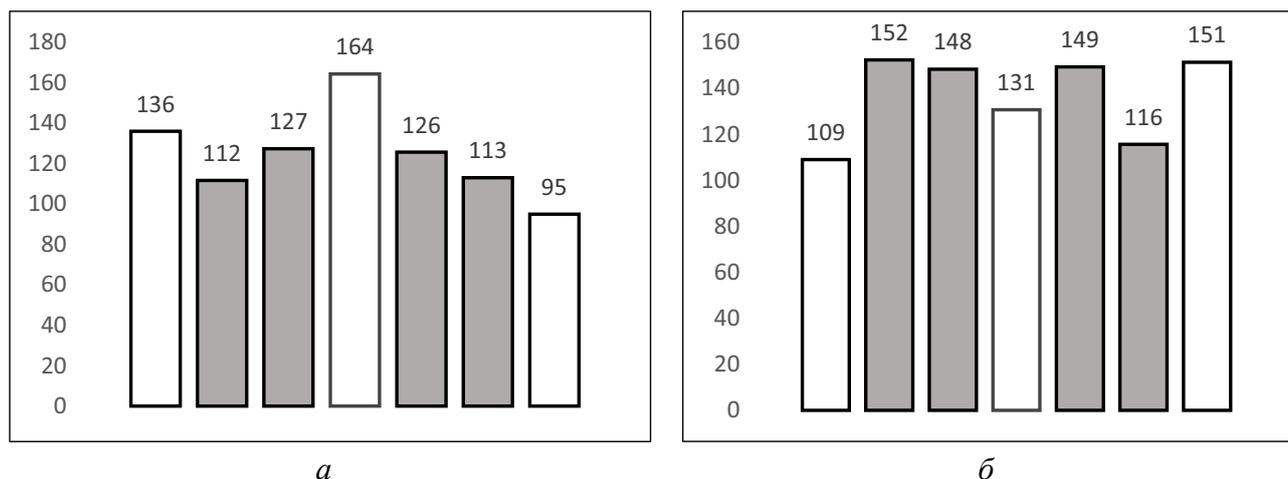


Рис. 5. Результаты измерения модуля деформации (по вертикальной оси приведены значения модуля деформации, МПа; по горизонтальной оси — точки измерений 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7): а — участок сопряжения со стрелочным переводом со стороны стрелки; б — участок в зоне переднего вылета рамного рельса

Зависимость между модулем упругости грунта и коэффициентом уплотнения

Полученные выше результаты модуля деформации также позволяют косвенно оценить качество уплотнения балластного слоя.

На основе данных экспериментов, проведенных санкт-петербургским филиалом РосдорНИИ, согласно руководству по эксплуатации [5], для определения коэффициента уплотнения построена номограмма для крупнообломочных грунтов фракции 20–70 мм.

Переход от модуля деформации к коэффициенту уплотнения приведен в табл. 2 и выполнен в соответствии с номограммой (рис. 6).

Согласно рекомендациям ГОСТ 8267 [6], для гранитного щебня принята марка дробимости М1000, а для базальтового щебня — М1200. Марка прочности отражает предел прочности щебня при сжатии, при котором происходит разрушение горной породы, то есть чем выше марка прочности щебня, тем он прочнее.

Оперативный контроль модуля деформации и косвенная оценка качества уплотнения балластного слоя позволяют выявить зоны недостаточного уплотнения, нарушающие нормальную работу шпал. Например, на участке сопряжения со стрелочным переводом со стороны стрелки (точка 4, ось пути) коэффициент уплотнения выше, чем в зонах у подошвы рельса (в табл. 2 значения коэффициента уплотнения выделены серым цветом), что является недопустимым с позиции обеспечения прочности и долговечности шпал.

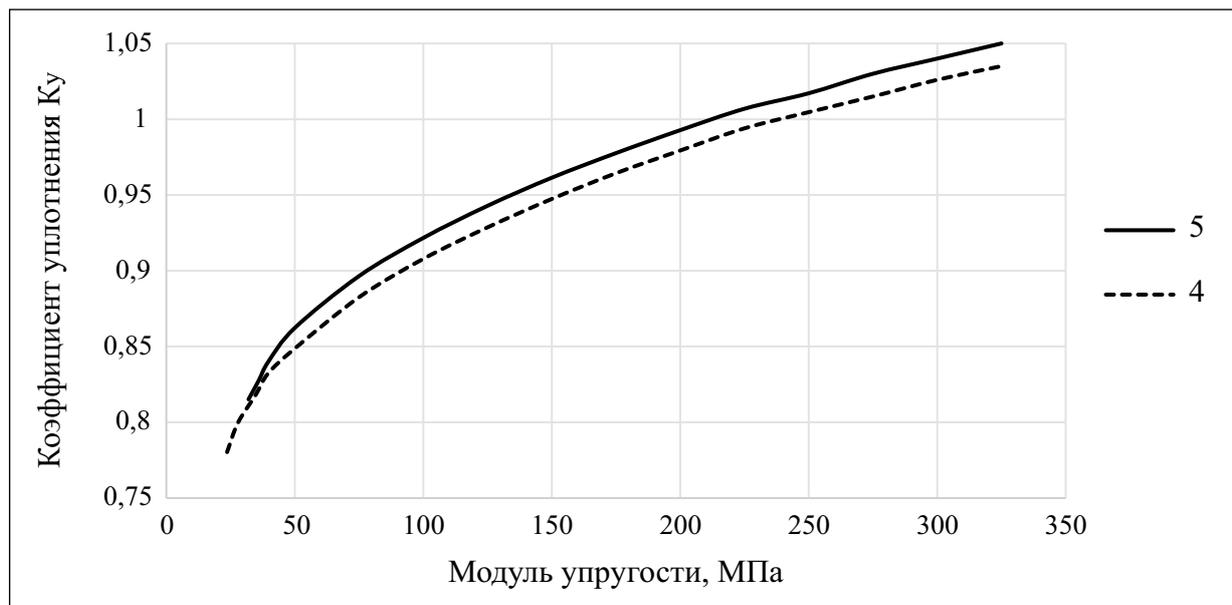


Рис. 6. Номограмма для определения коэффициента уплотнения щебеночного основания (фракция щебня 20–70 мм) при различных марках дробимости щебня: 4 — марка дробимости щебня М1000; 5 — марка дробимости щебня М1200

ТАБЛИЦА 2. Косвенная оценка качества уплотнения балластного слоя

№ точки	Модуль деформации, МПа	Коэффициент уплотнения
Гранит согласно ГОСТ 7392 (участок сопряжения со стрелочным переводом со стороны стрелки)		
1	136	0,94
2	112	0,92
3	127	0,93
4	164	0,96
5	126	0,93
6	113	0,92
7	95	0,90
Гранит согласно ГОСТ 7392 (стрелка, передний вылет рамного рельса)		
1	109	0,92
2	152	0,95
3	148	0,95
4	131	0,93
5	149	0,95
6	116	0,92
7	151	0,95

Сокращение периода стабилизации балластного слоя переходных участков

Достижение указанной цели возможно за счет оптимизации зернового состава щебеночного балласта и обеспечения его равноупругости.

Наиболее распространенный способ стабилизации — повышение плотности балластного материала балластного слоя за счет увеличения концентрации частиц в единице объема, соответствующей более упорядоченному по расположению и форме их пространственному построению (текстуре) за счет уплотнения материала или оптимизации его зернового состава.

Основным критерием качества уплотнения является модуль деформации, при увеличении которого снижается темп осадки балластного слоя.

Вопросы изменения прочностных и деформационных свойств щебеночного балласта и в настоящее время являются актуальными. Проводятся исследования по определению предпочтительного минералогического и зернового состава щебеночного балласта для конструкции железнодорожного пути, обеспечивающей наработку 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа [7]. Исследования прочностных и деформативных свойств базальтового щебеночного балласта в зависимости от его зернового состава приведены в работе [8].

Авторами статьи проведены измерения модуля деформации базальтового щебеночного балласта оптимизированного зернового состава и гранитного щебня, согласно ГОСТ 7392 [9]. Результаты измерений приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Средние значения модуля деформации

Характеристика балластного материала участка измерения	Среднее значение модуля деформации, МПа
Гранит согласно ГОСТ 7392	154
	143
	166
Среднее значение модуля деформации	154
Базальт с оптимизированным зерновым составом	180
	212
	216
	193
	189
Среднее значение модуля деформации	198

Согласно полученным результатам, модуль деформации базальтового щебеночного балласта в 1,3 раза превышает значения для гранитного щебеночного балласта. Представляется возможным решение задачи сокращения периода стабилизации балластного слоя переходных участков с применением специально подобранного зернового и минералогического состава щебня с повышенными прочностными и деформативными характеристиками.

Оптимизация жесткости посредством устройства слоя переменной толщины

В настоящее время также имеется опыт устройства переходных участков с двух сторон от участка с подбалластным асфальтобетонным слоем с укладкой слоя щебеночно-песчаной смеси (далее — ЩПС) переменной толщины под балластной призмой по всей ширине земляного полотна (рис. 7). Отметка верха слоя ЩПС на переходных участках принята равной отметке верха поверхности асфальтобетонного покрытия. Толщина слоя ЩПС в месте сопряжения с опытным участком принята равной суммарной толщине слоя асфальтобетона и подстилающего слоя из ЩПС с устройством плавного вертикального отвода на уменьшение толщины слоя. Длина каждого переходного участка принята равной не менее 15 м [10]. Данная конструкция уложена в августе 2024 года и в будущем позволит оценить эффективность данного решения с точки зрения обеспечения стабильности геометрии рельсовой колеи на переходных участках между опытным и контрольным участком.



Рис. 7. Схема устройства участка сопряжения между экспериментальным участком (с устройством асфальтобетонного слоя) и контрольным участком (без устройства асфальтобетонного слоя)

Стабилизация балластной призмы переходных участков геосинтетическими материалами

На участках железнодорожного пути, где по длине имеются зоны с различной интенсивностью накопления остаточных деформаций в вертикальной и горизонтальной плоскостях, в частности на переходных участках, укладка жестких геосеток или георешеток, стабилизация балластной призмы геосинтетическими материалами может дать положительный эффект, в том числе в условиях тяжело-весного движения поездов.

Имеющиеся материалы исследований позволяют говорить о неоднозначности технического эффекта при применении таких типов геоматериалов, как геотекстиль, геосетки, георешетки, геоячейки, геокомпозиты, стекловолокно, пленки и т. д. Проведенные отечественными учеными натурные эксперименты

по укладке геоматериалов в путь (в балластный слой, на основную площадку земляного полотна) неоспоримо подтверждают, что при получении армирующего эффекта изменения физико-механических характеристик грунта как материала не происходит, а изменение упругих характеристик подрельсового основания может иметь место [11].

Заключение

Нестабильное состояние переходных участков сразу после укладки железнодорожного пути требует особых подходов к проектированию и разработке мероприятий, направленных на повышение стабильности геометрии рельсовой колеи и недопущение интенсификации роста количества расстройств железнодорожного пути.

Конструктивно-технологические решения переходных участков должны учитывать такие характерные особенности, как возникновение динамической неровности вследствие неравноупругости подрельсового основания, снижение или недостаточность прочностных и деформативных характеристик грунтов балластного слоя с учетом динамических (ударно-динамических) воздействий, качество и неоднородность уплотнения балласта. И должны быть направлены на сокращение периода стабилизации балластного слоя переходных участков; увеличение срока нормальной эксплуатации с учетом действующих динамических нагрузок, возникающих вследствие наличия стыков, динамических неровностей, неравноупругости железнодорожного пути, неоднородности уплотнения балластной призмы переходных участков; обеспечение равноупругости балластного слоя переходных участков.

Библиографический список

1. Абросимов В. И. Исследования горизонтальных и вертикальных сил взаимодействия пути и подвижного состава в пределах крестовинного узла стрелочных переводов: дисс. ... канд. техн. наук. Ленинград: ЛИИЖТ, 1967. 142 с.
2. Комплексные технологии уплотнения балластного слоя / Ю. В. Гапеенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2006. № 12. С. 17–21.
3. Богданов В. М. Приоритетные задачи повышения качества в хозяйстве пути // Евразия вести. 2005. № 9. С. 23.
4. Попович М. В., Волковойнов Б. Г., Атаманюк А. В. О совершенствовании методики расчета и выбора параметров уплотнительных рабочих органов; машин непрерывного действия // Труды научно-технической конференции с международным участием в связи с 75-летием ГТКБ ЦП ОАО «РЖД» «Перспективы технического развития путевого комплекса ОАО «РЖД» в условиях его реформирования». М., 2007. С. 176–180.
5. Руководство по эксплуатации 7360-028-2010 РЭ. Измерители модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4.
6. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ.

7. Технические требования к конструкции железнодорожного пути и системе его технического обслуживания, обеспечивающей наработку пропущенного тоннажа 2,5 млрд тонн брутто, утв. и. о. заместителя генерального директора — главного инженера ОАО «РЖД» от 21.09.2021 № 1508 (с изм. от 13.04.2023 № 931/р).

8. Механические свойства базальтового щебеночного балласта / А. Ф. Колос [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. Вып. 3. С. 53–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-53-72

9. ГОСТ 7392-2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия.

10. Технические условия на выполнение работ по объекту «Проведение полевого эксперимента по применению подбалластного слоя из асфальтобетона на двухпутном участке железнодорожного пути протяженностью 1 км», утв. заместителем главного инженера Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД» В. Н. Зверь от 17.05.2024 № ЦДИ-2976.

11. Блажко Л. С. Технико-технологическая оценка усиления конструкции пути на участках обращения подвижного состава с осевыми нагрузками до 300 кН: дисс. ... докт. техн. наук. СПб.: ПГУПС, 2003. 331 с.

Дата поступления: 09.10.2024

Решение о публикации: 12.11.2024

Контактная информация:

ШЕХТМАН Евгений Иосифович — докт. воен. наук, профессор; director@sptgt.ru

ЧЕРНЯЕВА Виктория Андреевна — канд. техн. наук, доцент; chernyaeva@pgups.ru

ИГОШЕВ Иван Сергеевич — аспирант; ighoshiev2000@mail.ru

ЧУПРЫНИН Александр Андреевич — аспирант; alechup93@inbox.ru

Stability of rail track geometry in transition sections

E. I. Shehtman, V. A. Chernyaeva, I. S. Igoshev, A. A. Chuprinin

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

For citation: *Shehtman E. I., Chernyaeva V. A., Igoshev I. S., Chuprinin A. A. Stability of rail track geometry in transition sections // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 40–52. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-40-52*

Abstract

A study of the quality and heterogeneity of ballast compaction in the transverse (along the sleeper) direction as a reason for the decrease in the stability of the track gauge geometry, and consideration of design and technological solutions for transition sections in order to increase the stability of the track gauge geometry

and prevent an intensification of the growth in the number of track disorders. **Purpose:** transition sections. **Methods:** stamp testing of ballast layer material, statistical data analysis. **Results:** the results of measuring the deformation modulus of the sleeper base, studying the non-uniform elasticity, assessing the quality and homogeneity of the compaction of the sleeper base for various designs of railway tracks are presented, and design and technological solutions for transition sections are considered. **Practical importance:** the article presents design and technological solutions for transition sections aimed at reducing the period of stabilization of the ballast layer of transition sections; increasing the period of normal operation, taking into account the current dynamic loads arising due to the presence of joints, dynamic irregularities, non-uniform elasticity of the railway track, non-uniform compaction of the ballast prism of transition sections; ensuring the uniform elasticity of the ballast layer of transition sections.

Keywords: railway track, rail track, rail track geometry, stability of rail track geometry, turnouts, transition sections, dynamic unevenness, ballast, crushed stone.

References

1. Abrosimov V.I. Issledovaniya gorizontal'nyh i vertikal'nyh sil vzaimodejstviya puti i podvizhnogo sostava v predelakh krestovinnogo uzla strelochnyh perevodov: diss. ... kand. tekhn. nauk. Leningrad: LIIZhT, 1967. 142 s. (In Russian)
2. Kompleksnyye tekhnologii uplotneniya ballastnogo sloya / Yu. V. Gapeenko // Put' i putevoe hozyajstvo. 2006. No. 12. S. 17–21. (In Russian)
3. Bogdanov V.M. Prioritetnye zadachi povysheniya kachestva v hozyajstve puti // Evraziya vesti. 2005. No. 9. S. 23. (In Russian)
4. Popovich M. V., Volkovojnov B. G., Atamanyuk A. V. O sovershenstvovanii metodiki rascheta i vybora parametrov uplotnitel'nyh rabochih organov; mashin nepreryvnogo dejstviya // Trudy nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem v svyazi s 75-letiem GGGKB CP OAO "RZhD" "Perspektivy tekhnicheskogo razvitiya putevogo kompleksa OAO "RZhD" v usloviyah ego reformirovaniya". M., 2007. S. 176–180. (In Russian)
5. Rukovodstvo po ekspluatatsii 7360-028-2010 RE. Izmeriteli modulya uprugosti gruntov i osnovanij dorog PDU-MG4. (In Russian)
6. GOST 8267-93. Shcheben' i gravij iz plotnyh gornyh porod dlya stroitel'nyh rabot. (In Russian)
7. Tekhnicheskii trebovaniya k konstrukcii zheleznodorozhnogo puti i sisteme ego tekhnicheskogo obsluzhivaniya, obespechivayushchej narabotku propushchennogo tonnazha 2,5 mlrd tonn brutto, utv. i. o. zamestitelya general'nogo direktora — glavnogo inzhenera OAO "RZhD" ot 21.09.2021 No. 1508 (s izm. ot 13.04.2023 No. 931/r). (In Russian)
8. Mekhanicheskie svoystva bazal'tovogo shchebenochnogo ballasta / A. F. Kolos [i dr.] // Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. 2022. Vyp. 3. S. 53–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-53-72 (In Russian)
9. GOST 7392-2014. Shcheben' iz plotnyh gornyh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya. (In Russian)
10. Tekhnicheskie usloviya na vypolnenie rabot po ob'ektu: "Provedenie polevogo eksperimenta po primeneniyu podballastnogo sloya iz asfal'tobetona na dvuhputnom uchastke zheleznodorozhnogo puti protyazhennost'yu 1 km", utv. zamestitелем glavnogo inzhenera Central'noj direkcii infrastruktury — filiala OAO "RZhD" V.N. Zver' ot 17.05.2024 No. CDI-2976. (In Russian)

11. Blazhko L. S. Tekhniko-tehnologicheskaya ocenka usileniya konstrukcii puti na uchastkah obrashcheniya podvizhnogo sostava s osevymi nagruzkami do 300 kN: diss. ... dokt. tekhn. nauk. SPb.: PGUPS, 2003. 331 s. (In Russian)

Received: 09.10.2024

Accepted: 12.11.2024

Author's information:

Evgenii I. SHEHTMAN — Doctor of Military Sciences, Professor; director@sptgt.ru

Victoria A. CHERNYAEVA — PhD of Engineering, Associate Professor; chernyaeva@pgups.ru

Ivan S. IGOSHEV — Postgraduate Student; ighoshiev2000@mail.ru

Aleksandr A. CHUPRININ — Postgraduate Student; alechup93@inbox.ru

УДК 625.111

К вопросу модернизации Улан-Баторской железной дороги

Д. В. Серебряков, Ж. Бахыт

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

Для цитирования: *Серебряков Д. В., Бахыт Ж.* К вопросу модернизации Улан-Баторской железной дороги // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 53–60. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-53-60

Аннотация

Цель: анализ проблемы развития транспортных отношений между Россией, Монголией и Китаем. Развитие приграничных областей Российской Федерации. Развитие экономического сотрудничества и усиление региональной взаимосвязи между Россией, Монголией и Китаем. Увеличение пропускной способности и модернизация инфраструктуры Улан-Баторской железной дороги. Реконструкция малых искусственных сооружений. **Методы:** произведен обзор информации из различных источников по строительству Улан-Баторской железной дороги, современному состоянию магистрали, перспективам развития и необходимости модернизации инфраструктуры. Выполнен анализ исходных материалов, полученных у владельцев инфраструктуры Улан-Баторской железной дороги. **Результаты:** в статье показываются преимущества для развития дружественных отношений между Россией, Монголией и Китаем в случае модернизации Улан-Баторской железной дороги. Предложены современные варианты конструкции малых искусственных сооружений. **Практическая значимость:** полученный авторами материал позволяет продолжить практическую работу по дальнейшему развитию и модернизации Улан-Баторской железной дороги, включая потенциальное обновление инфраструктуры, совершенствование условий для пассажироперевозок и грузоперевозок. Практическая реализация решений по существенному развитию Трансмонгольской железной дороги приведет к безусловному улучшению транспортной ситуации одного из важнейших международных коридоров. В результате привлечения инвестиций на развитие транспортной системы между Российской Федерацией, Монголией и Китайской Народной Республикой ожидается дальнейшее развитие торговли, туризма и совершенствование этого важного железнодорожного узла, который также обеспечивает доступ к другим странам Центральной Азии, предоставляя возможности для расширения экономического сотрудничества и социального развития в регионе.

Ключевые слова: транспортная система, транспортная инфраструктура, Улан-Баторская железная дорога, модернизация железнодорожной инфраструктуры, искусственные сооружения.

Развитие приграничных регионов Российской Федерации во многом зависит от налаживания отношений между соседними государствами.

Транспортная система является основой для взаимовыгодного сотрудничества. Увеличение объемов перевозок, рост товарооборота дают импульс развитию регионов.

Президент Российской Федерации Владимир Владимирович Путин заявлял о том, что продолжение работы по увеличению пропускной способности железной дороги, которая непосредственно связывает между собой два крупнейших

государства в Европе и Азии — Россию и Китай, является очень важным проектом, реализация которого планируется в самое ближайшее время.

«Среди важнейших совместных проектов упомяну модернизацию Улан-Баторской железной дороги, которая является важной артерией контейнерных перевозок между Россией, Монголией и Китаем. Полагаем необходимым продолжить работу по расширению пропускной способности этого транспортного коридора, обновлению путей, подвижного состава и локомотивного парка.

В частности, на российско-монгольской границе планируем реконструировать пункт пропуска Наушки в целях увеличения возможностей транзита до 15 млн т грузов к 2025 году. Рассчитываем, что синхронно с этим будут развиваться существующие и создаваться новые погранпереходы на китайско-монгольской границе», — сказал В. В. Путин на встрече с лидером Китая Си Цзиньпином и президентом Монголии Ухнаагийн Хурэлсухом [1].

Строительство железной дороги между Советским Союзом и Монгольской Народной Республикой проходило в очень тяжелое время (недавно закончилась Вторая мировая война) и в очень сложных условиях — отсутствовала производственная база, были огромные проблемы с обеспечением строительства жильем, водой, горюче-смазочными материалами и многие другие трудности.

Все эти неблагоприятные обстоятельства были преодолены за счет самоотверженности строителей-железнодорожников и того опыта в восстановлении железных дорог, который был приобретен во время Великой Отечественной войны.

Строительство этой железной дороги заняло немногим более трех лет, и 20 декабря 1950 года магистраль, начинавшаяся от приграничной станции Наушки в Бурятии и протянувшаяся до столицы Монголии Улан-Батора, была сдана в постоянную эксплуатацию.

Реальные преимущества железнодорожного сообщения между двумя государствами заставили задуматься о подключении к данной транспортной системе третьего государства — Китайской Народной Республики.

В 1953 году было принято решение продолжить железную дорогу до приграничной с Китаем станции Замын-Ууд.

Строительство этого участка, завершившего создание Трансмонгольской железной дороги, продолжалось около двух лет.

Открытие пассажирского железнодорожного сообщения между Советским Союзом, Монголией и Китаем состоялось 1 января 1956 года.

Ввод в эксплуатацию Трансмонгольской железной дороги позволил более чем на 1000 км сократить расстояние между Москвой и Пекином [2].

В настоящее время общая протяженность Монгольской железной дороги составляет 1815 км, из которых 1110 км приходится на Трансмонгольскую магистраль.

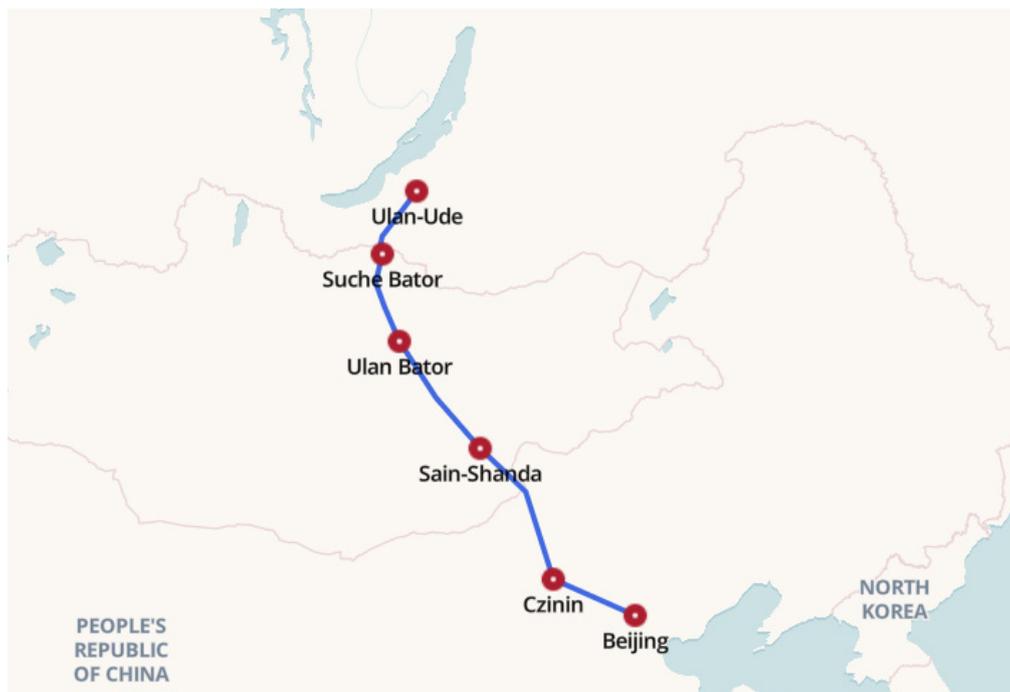


Рис. 1. Карта Трансмонгольской железной дороги [3]

Этот международный маршрут остается очень важным для Монголии. Ежегодно по железной дороге в Монголии перевозится более 23 млн т грузов и 2,5 млн пассажиров, большая часть которых приходится на Трансмонгольскую линию. Транспортировка транзитных грузов между Россией и Китаем является важным источником дохода для железнодорожной системы Монголии [4].

Инфраструктура Улан-Баторской железной дороги, построенной более полувека назад, находится в различном состоянии.

Несмотря на принятые меры по обновлению инфраструктуры, пропускная способность дороги в настоящее время недостаточна для удовлетворения растущих потребностей в грузовых и пассажирских перевозках.

По мере роста торговой и инвестиционной активности в регионе представляется логичным шагом дальнейшее усовершенствование Улан-Баторской железной дороги.

В частности, особое внимание следует уделить вопросам реконструкции малых искусственных сооружений, которые необходимы для предотвращения наводнений, эрозии и поддержания структурной целостности железнодорожных путей.

В настоящее время малые искусственные сооружения на Улан-Баторской железной дороге представлены в основном одночковыми (рис. 2) и двухчковыми (рис. 3) водопропускными трубами.

При расширении пропускной способности железной дороги нагрузка на верхнее и нижнее строение пути будет возрастать, в результате чего возможно увеличение деформаций в местах расположения искусственных сооружений [5, 6].



Рис. 2. Круглая сборная железобетонная труба с отверстием 1,5 м на участке Нартын Хошуу — Шаргын Овоо Улан-Баторской железной дороги (фото Б. Жумагали)



Рис. 3. Круглая сборная железобетонная труба с отверстием $2 \times 1,25$ м на участке Нартын Хошуу — Шаргын Овоо Улан-Баторской железной дороги (фото Б. Жумагали)

Для того чтобы решить эту вероятную проблему, разработано множество практических решений, к которым относятся прежде всего отсыпка переменной толщины грунтов улучшенных свойств в теле земляного полотна и использование современных конструкций и материалов, которые хорошо себя зарекомендовали на аналогичных участках транспортных магистралей различных стран мира [7, 8, 9, 10].

Заключение

В последние годы наблюдается значительное развитие связей между Россией и Китаем.

Монголия благодаря своему стратегическому расположению и многолетним дружественным отношениям с нашей страной является важнейшим элементом этих связей.

Железные дороги Монголии могут принять на себя существенную часть возрастающего грузового транзита между Российской Федерацией и Китайской Народной Республикой [11].

Трансмонгольская магистраль, проходящая через всю страну с севера на юг, также становится популярным местом для туристов, предлагая живописные и культурные впечатления [12].

Дальнейшее развитие Улан-Баторской железной дороги будет играть важнейшую роль в соединении России, Монголии и Китая через жизненно важный транспортный коридор, способствующий развитию торговли, экономических отношений и усилению региональной взаимосвязи.

Библиографический список

1. Встреча с Председателем КНР Си Цзиньпином и Президентом Монголии Ухнаагийн Хурэлсухом 15 сентября 2022 года. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/69357>
2. Trans-Mongolian Railway. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Trans-Mongolian_Railway
3. Trans-Mongolian Railway. URL: www.transsiberianexpress.net/trans-mongolian-railway-route
4. Экономический коридор Китай — Монголия — Россия: инфраструктурный фокус. URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/ekonomicheskij-koridor-kitay-mongoliya-rossiya-infrastrukturnyy-fokus>
5. Серебряков Д. В. Исследование колебательного процесса грунтов земляного полотна на участках сопряжения железнодорожного пути с мостами // Проблемы инфраструктуры транспортного комплекса: материалы международной научно-технической конференции. 2015. С. 52–55.
6. Серебряков Д. В., Конон А. А., Ганчиц В. В. Исследование колебательных процессов в земляном полотне на участках сопряжения с мостами // Путь и путевое хозяйство. 2017. № 9. С. 9–11.
7. Серебряков Д. В. Исследование влияния конструкций переменной жесткости на несущую способность земляного полотна в зоне сопряжения с мостами // Актуальные проблемы развития транспортной инфраструктуры: сборник научных трудов. 2018. С. 27–33.
8. Петряев А. В., Ганчиц В. В. Опыт применения передовых конструктивно-технологических решений при возведении земляного полотна мостового перехода через р. Волхов в Ленинградской области // Транспортное строительство. 2018. № 2. С. 4–7.

9. Петряев А. В. Несущая способность железнодорожного земляного полотна, армированного геосинтетическими материалами // Транспорт Урала. 2019. № 1(60). С. 71–75.

10. Сомов Д. Н., Святогорова А. В., Петряев А. В. Использование армогрунтовых систем в составе искусственных сооружений // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т. СПб., 2023. С. 395–401.

11. Nergui M., Ulzii-Ochir N. Transportation of Freight along the Trans-Mongolian Railway and Planning for the Rolling Stock Park. URL: https://www.researchgate.net/publication/378735497_Transportation_of_Freight_along_the_Trans-Mongolian_Railway_and_Planning_for_the_Rolling_Stock_Park

12. The Trans-Mongolian Railway. URL: <https://www.lauratheexplorer.co.nz/the-trans-mongolian-railway>

Дата поступления: 17.09.2024

Решение о публикации: 08.11.2024

Контактная информация:

СЕРЕБРЯКОВ Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, доцент; master-cat@bk.ru

БАХЫТ Жумагали — студент 5-го курса; jumagali0728@gmail.com

To the issue of modernization of Ulaanbaatar railroad

D. V. Serebryakov, J. Bakhyt

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

For citation: *Serebryakov D. V., Bakhyt J.* To the issue of modernization of Ulaanbaatar railroad // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 53–60. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-53-60

Abstract

Purpose: analysis of the problem of the development of transport relations between Russia, Mongolia and China. Development of the border regions of the Russian Federation. Development of economic cooperation and strengthening of regional interconnection between Russia, Mongolia and China. Increasing the capacity and modernization of the Ulaanbaatar railroad infrastructure. Reconstruction of small artificial structures.

Methods: a review of information from various sources on the construction of the Ulaanbaatar railroad, the current state of the main line, the prospects of development and the need to modernize the infrastructure was carried out. The source materials obtained from the owners of the infrastructure of the Ulan-Bator railroad were analyzed. **Results:** the article shows the advantages for the development of friendly relations between Russia, Mongolia and China in the case of modernization of the Ulaanbaatar railway. Modern design options of small artificial structures are proposed. **Practical importance:** the material obtained by the authors allows us to continue practical work on the further development and modernization of the Ulaanbaatar Railway, including potential infrastructure upgrades, improving conditions for passenger and

cargo transportation. The practical implementation of solutions for the significant development of the Trans-Mongolian Railway will lead to an unconditional improvement in the transport situation of one of the most important international corridors. As a result of attracting investments for the development of the transport system between the Russian Federation, Mongolia and the People's Republic of China, further development of trade, tourism and improvement of this important railway hub is expected, which also provides access to other Central Asian countries, providing opportunities for expanding economic cooperation and social development in the region.

Keywords: transport system, transport infrastructure, Ulaanbaatar railroad, modernization of railway infrastructure, artificial structures.

References

1. Vstrecha s Predsedatelem KNR Si Czin'pinom i Prezidentom Mongolii Uhnaagijn Hurelsuhom 15 sentyabrya 2022 goda. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/69357> (In Russian)
2. Trans-Mongolian Railway. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Trans-Mongolian_Railway
3. Trans-Mongolian Railway. URL: www.transsiberianexpress.net/trans-mongolian-railway-route
4. Ekonomicheskij koridor Kitaj — Mongoliya — Rossiya: infrastrukturnyj fokus. URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/ekonomicheskij-koridor-kitaj-mongoliya-rossiya-infrastrukturnyy-fokus> (In Russian)
5. Serebryakov D.V. Issledovanie kolebatel'nogo processa gruntov zemlyanogo polotna na uchastkah sopryazheniya zheleznodorozhnogo puti s mostami // Problemy infrastruktury transportnogo kompleksa: materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. 2015. S. 52–55. (In Russian)
6. Serebryakov D.V., Konon A.A., Ganchic V.V. Issledovanie kolebatel'nyh processov v zemlyanom polotne na uchastkah sopryazheniya s mostami // Put' i putevoe hozyajstvo. 2017. No. 9. S. 9–11. (In Russian)
7. Serebryakov D.V. Issledovanie vliyaniya konstrukcij peremennoj zhyostkosti na nesushchuyu sposobnost' zemlyanogo polotna v zone sopryazheniya s mostami // Aktual'nye problemy razvitiya transportnoj infrastruktury: sbornik nauchnyh trudov. 2018. S. 27–33. (In Russian)
8. Petryaev A.V., Ganchic V.V. Opyt primeneniya peredovyh konstruktivno-tekhnologicheskikh reshenij pri vozvedenii zemlyanogo polotna mostovogo perekhoda cherez r. Volhov v Leningradskoj oblasti // Transportnoe stroitel'stvo. 2018. No. 2. S. 4–7. (In Russian)
9. Petryaev A.V. Nesushchaya sposobnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna, armirovannogo geosinteticheskimi materialami // Transport Urala. 2019. No. 1(60). S. 71–75. (In Russian)
10. Somov D.N., Svyatogorova A.V., Petryaev A.V. Ispol'zovanie armogruntovyh sistem v sostave iskusstvennyh sooruzhenij // Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXXIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh: v 2 t. SPb., 2023. S. 395–401. (In Russian)
11. Nerguil M., Ulzii-Ochir N. Transportation of Freight along the Trans-Mongolian Railway and Planning for the Rolling Stock Park. URL: https://www.researchgate.net/publication/378735497_

Transportation_of_Freight_along_the_Trans-Mongolian_Railway_and_Planning_for_the_Rolling_Stock_Park

12. The Trans-Mongolian Railway. URL: <https://www.lauratheexplorer.co.nz/the-trans-mongolian-railway>

Received: 17.09.2024

Accepted: 08.11.2024

Author's information:

Dmitrii V. SEREBRIAKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; master-cat@bk.ru

Jumagali BAKHYT — 5th year student; jumagali0728@gmail.com

УДК 629.4.069

Исследование работы инверторной системы запуска дизельного двигателя при эксплуатации тепловоза ЗТЭ28

А. А. Плешаков¹, А. М. Евстафьев², И. А. Ролле²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Россия, 140402, Московская обл., г. Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

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

Для цитирования: Плешаков А. А., Евстафьев А. М., Ролле И. А. Исследование работы инверторной системы запуска дизельного двигателя при эксплуатации тепловоза ЗТЭ28 // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 61–77. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-61-77

Аннотация

Цель: анализ результатов эксплуатационных испытаний пускового преобразователя в качестве устройства предварительной раскрутки дизельного двигателя тепловоза ЗТЭ28 и анализ полученных результатов. **Методы:** проводилось исследование функционирования системы инверторного запуска в рамках ее эксплуатации в составе тепловоза при различных условиях пуска дизельного двигателя (остаточное напряжение аккумуляторной батареи, температура масла) с применением измерительного комплекса и комплекта дополнительных датчиков, а также накопление и анализ полученных результатов измерений. **Результаты:** проведены эксплуатационные испытания инверторной системы запуска силовой установки на тепловозе ЗТЭ28 в локомотивном депо «Тында-Северная». Верифицированы схмотехнические решения и алгоритмы автоматической системы управления преобразователя. Выполнен сравнительный анализ энергетической эффективности инверторной и стартер-генераторной систем запуска двигателей. **Практическая значимость:** по результатам эксплуатационных испытаний подтверждена возможность применения пусковых преобразователей для надежного запуска дизельных двигателей тепловозов, оборудованных синхронными тяговыми агрегатами, вместо широко распространенных на сегодняшний день стартер-генераторных систем запуска. Разработанное техническое решение может быть тиражировано на другие серии локомотивов, как вновь разрабатываемые, так и эксплуатирующиеся в рамках их модернизации или ремонта. Накопленные в эксплуатации данные могут быть использованы для дальнейшего совершенствования алгоритмов системы управления пускового преобразователя.

Ключевые слова: тепловоз, дизель-генератор, инверторная система запуска, пусковой преобразователь, синхронный генератор, измерительный комплекс, эксплуатационные испытания.

Введение

Байкало-Амурская магистраль (БАМ) — это одна из наиболее важных транспортных артерий в России, по которой перевозится значительная доля грузов и пассажиров от общего потока в стране. Основная часть магистрали при ее постройке имела однопутную структуру с отдельными двухпутными участками и обустроенными разъездами, предназначенными для пропуска поездов по разным направлениям. Этим фактором во многом ограничивалась пропускная способность

данного участка железных дорог России. Однако шли годы, и структура пассажиро- и грузопотока значительно менялась.

На сегодняшний день вследствие глобального изменения геополитической ситуации в мире и перераспределения транспортных потоков на восток особенно важным для обеспечения транспортной безопасности страны стал Восточный полигон.

Вот уже несколько лет ведется масштабная реконструкция БАМа, которая должна ощутимо увеличить его провозную способность. Для решения поставленной задачи выделяются значительные средства и привлекаются все новые и новые трудовые ресурсы. В 2024 году успешно завершён II этап модернизации и начаты работы по III этапу [1].

В связи с масштабными инфраструктурными изменениями на Дальневосточном полигоне, направленными на увеличение его провозной способности, у ОАО «РЖД» появляется острая потребность в новом более мощном и высокотехнологичном подвижном составе, который будет способен перевозить тяжеловесные составы.

Для решения вышеуказанной задачи инжиниринговым центром «ТМХ Инжиниринг», входящим в состав АО «Трансмашхолдинг», спроектирована новая серия грузовых магистральных тепловозов 3ТЭ28. Проект был реализован в кратчайшие сроки благодаря опыту, накопленному при создании и эксплуатации локомотивов серии 2(3) ТЭ25 различных исполнений. Часть технических решений для нового поколения тепловозов заимствована из конструкции локомотивов 3ТЭ25К2М. Кроме того, были учтены недостатки предыдущих серий тепловозов, выявленные во время эксплуатации.

Тепловоз 3ТЭ28 представляет собой трехсекционный локомотив, силовой установкой которого является 16-цилиндровый дизельный двигатель с турбонаддувом, который приводит во вращение тяговый агрегат, питающий через выпрямительную установку тяговые электродвигатели. В конструкции тепловоза нашли максимально возможное применение российские технические решения и оборудование. Простота и надежность переменного-постоянной тяговой передачи мощности подтверждена многолетним опытом эксплуатации на других видах локомотивов. Использование силовой установки повышенной мощности позволяет тепловозам 3ТЭ28 водить тяжеловесные и длинносоставные грузовые поезда массой до 7100 т на различных полигонах.

Производство новых магистральных тепловозов начато в АО «УК «БМЗ». Первая машина была построена в 2022 году. В ноябре того же года на Московской железной дороге первый локомотив успешно завершил опытный пробег, суммарная протяженность которого превысила 10 тыс. км, а масса поездов составила от 5000 до 7200 т. За время опытной эксплуатации не выявлено технических

неисправностей оборудования локомотива. В начале 2023 года тепловоз 3ТЭ28 № 0001 передан в АО «ВНИКТИ» для проведения приемочных и сертификационных испытаний. И уже осенью 2023 года на основании успешных результатов испытаний конструкторской документации на локомотив присвоена литера «О1», подтверждающая готовность тепловоза к серийному производству. В ноябре 2023 года АО «Трансмашхолдинг» получен сертификат соответствия требованиям ТР ТС 001/2011, который позволяет эксплуатировать магистральные тепловозы 3ТЭ28 на дорогах стран ЕАЭС [2]. В декабре 2023 года на БАМе в локомотивном депо «Тында-Северная» началась эксплуатация первых образцов локомотивов серии 3ТЭ28.

Особенности магистральных тепловозов серии 3ТЭ28

Тепловозы 3ТЭ28 призваны стать альтернативой локомотивам 3ТЭ25К2М, которые оснащались дизельными двигателями GEVO V12 и системами запуска американского производства (General Electric).

Суммарная мощность нового тепловоза составляет 8950 кВт, что делает его одним из наиболее мощных среди эксплуатирующихся на сегодняшний день в нашей стране. Локомотив рассчитан на конструкционную скорость в 100 км/ч. Сила тяги длительного режима составляет не менее 314,8 кН при расчетной скорости 24,64 км/ч.

В состав основного электрооборудования тепловоза входят:

- тяговый агрегат АТ2С-2800/400Х;
- шестиканальный управляемый выпрямитель типа М-ТПП-3600-2-У2 или М-ТПП-1,1к-800-У2;
- электродвигатели постоянного тока ДТК-417К, или ЭДТ-133К, или ЭД133К;
- аккумуляторная батарея 72КН220Р (щелочная) или 16*6СВГП-428РК (кислотная) [3, 4].

Локомотив имеет кабину с узнаваемым экстерьером передней маски, которая применяется на новых сериях электровозов, магистральных и маневровых тепловозов. Кузов окрашен в традиционные корпоративные цвета ОАО «РЖД».

Одной из отличительных особенностей данной серии локомотивов является применение в качестве силовой установки модификации хорошо зарекомендовавшего себя в эксплуатации дизель-генератора 18-9ДГ, получившей обозначение 18-9ДГМ и выпускаемой АО «Коломенский завод».

Основные технические характеристики силовой установки типа 18-9ДГМ приведены в табл. 1 [3, 5].

Внешний вид дизельного двигателя и генераторной установки, смонтированной на одной раме с дизелем, приведен на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики дизель-генератора 18-9ДГМ

Параметр	Значение
Тип дизеля	16-цилиндровый, четырехтактный, V-образный, с газотурбинным наддувом и охлаждением наддувочного воздуха
Номинальная частота вращения, об/мин	1000 ± 6
Номинальная / максимальная мощность, кВт	2850/3100
Удельный расход топлива, г/кВт · ч	198 ^{+9,9}
Часовой расход топлива в режиме холостого хода, кг/ч, не более	12,5
Система запуска	инверторная
Система управления	электронный блок управления

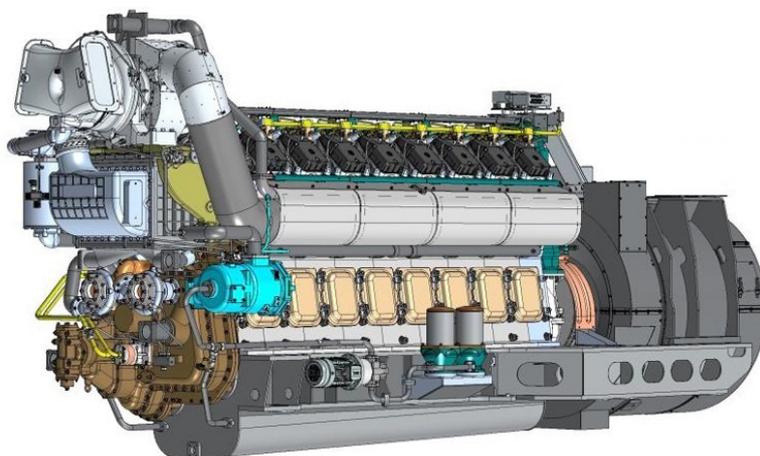


Рис. 1. Силовая установка 18-9ДГМ

Для выработки электрической энергии для питания основных и вспомогательных систем тепловоза применяется тяговый агрегат типа АТ2С-2800/400х. Данная электрическая машина разработана ООО «ТМХ-Электротех» специально для новой серии локомотивов ЗТЭ28 и имеет стандартную конструкцию — тяговый и синхронный генераторы, размещенные в едином корпусе. Каждый генератор имеет две пары трехфазных обмоток, геометрическое расположение которых сдвинуто в пространстве на 120°.

Отличительной особенностью силовой установки описываемой серии локомотивов является инверторная система запуска двигателя вместо широко распространенной на подвижном составе стартер-генераторной. Данное техническое решение предложено специалистами АО «ВНИКТИ».

Принцип работы инверторной системы запуска основан на свойстве обратимости электрических машин. Раскрытку коленчатого вала дизельного двигателя

осуществляет тяговый генератор, для которого пусковой преобразователь формирует необходимое напряжение питания и возбуждения.

Применение инверторного запуска позволило значительно упростить узел распределительного вала, исключив привод стартер-генератора. Данное техническое решение должно снизить количество отказов дизель-генераторной установки, связанной с приводами 69-группы, что положительно повлияет на показатели эксплуатационной надежности локомотива.

Электрическая схема пускового преобразователя построена на современной элементной базе. Важным элементом общей структуры устройства является система автоматического управления и диагностики. Вычислительным ядром платы управления служит мощный 32-разрядный микроконтроллер ARM-архитектуры на ядре Cortex-M4 [6, 7].

Специалистами АО «ВНИКТИ» разработаны собственные алгоритмы управления и диагностики для системы управления преобразователя. Силовая часть устройства построена с применением современных IGBT-модулей последнего поколения, управляемых интеллектуальными драйверами отечественного производства. Подсистема диагностики позволяет реализовать алгоритмы защиты от превышения:

- выходного напряжения;
- тока возбуждения и фазных токов;
- длительности процесса запуска;
- температуры полупроводниковых приборов;
- частоты переключения IGBT-модулей.

Инверторная система позволяет осуществить запуск силовой установки при входном напряжении в диапазоне от 45 до 96 В, ограничивая при этом входной ток на уровне 1700 А, чтобы не допустить глубокой разрядки аккумуляторной батареи. Система автоматического управления сохраняет свою работоспособность при снижении напряжения питания до 36 В. Максимальные выходные параметры:

- ток до 1200 А;
- напряжение до 200 В [8].

3D-модель пускового преобразователя приведена на рис. 2.

Инверторная система запуска подтвердила заявленные характеристики при приемочных и сертификационных испытаниях тепловоза, которые проводились на экспериментальной базе АО «ВНИКТИ».

Комплексное исследование особенностей функционирования системы запуска тепловоза 3ТЭ28

По завершении приемочных и сертификационных испытаний первые образцы локомотивов 3ТЭ28 поступили в эксплуатацию в локомотивное депо «Тында-Северная», где им предстояло выдержать суровые условия окружающей среды, а также сложный профиль пути, которым отличается данный участок БАМа.

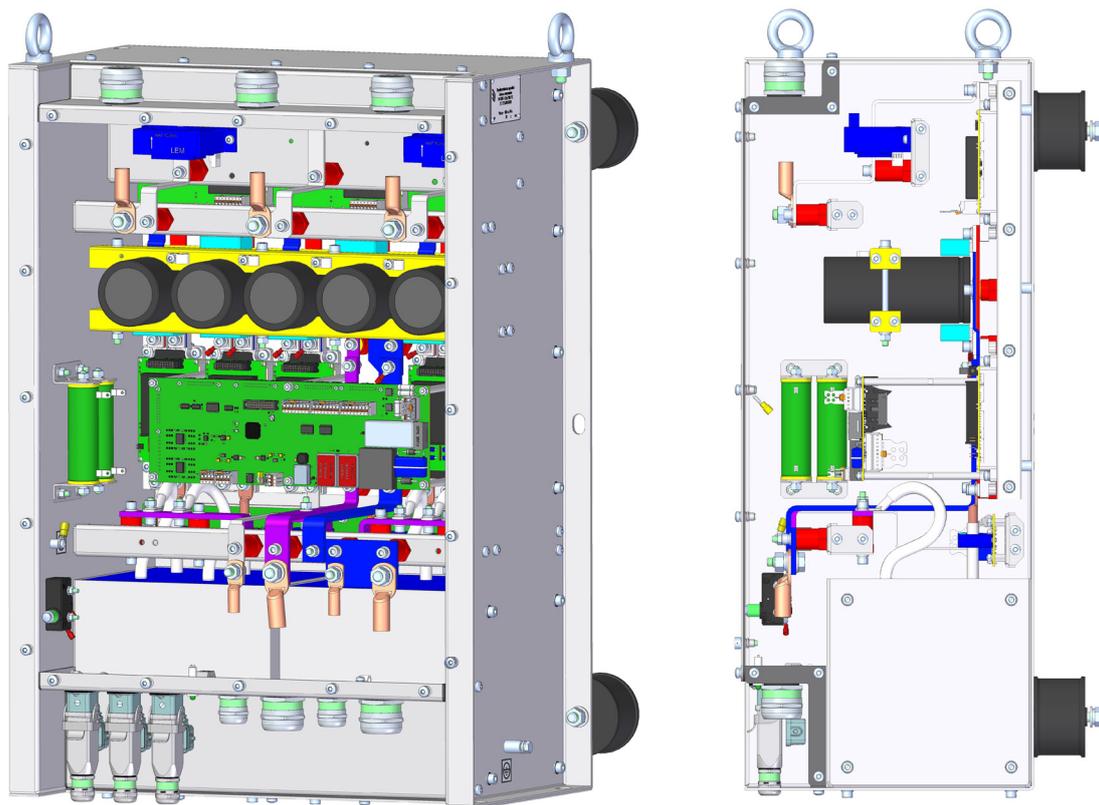


Рис. 2. 3D-модель пускового преобразователя

АО «ВНИКТИ» были продолжены исследования работы системы запуска силовой установки в целях оценки функционирования предложенной концепции в условиях эксплуатации тепловозов и обоснования дальнейшего распространения инверторов для запуска двигателей других серий локомотивов.

В рамках данных исследований летом 2024 года на тепловозе 3ТЭ28 № 0021 был установлен многоканальный измерительный комплекс с комплектом датчиков, позволяющий регистрировать параметры работы пускового преобразователя и записывать данные на SD-накопитель в автоматическом режиме.

Схема подключения испытательного оборудования приведена на рис. 3.

При проведении эксплуатационных испытаний системы инверторного запуска регистрировались следующие параметры при прокрутке коленчатого вала дизельного двигателя:

- ток $I_{аб}$, потребляемый от аккумуляторной батареи;
- напряжение аккумуляторной батареи $U_{аб}$;
- ток $I_{к1}$, потребляемый первым каналом звена повышения входного напряжения;
- напряжение на выходе звена повышения входного напряжения $U_{зпн}$;
- мгновенные значения линейных напряжений U_{uw} и U_{uv} ;

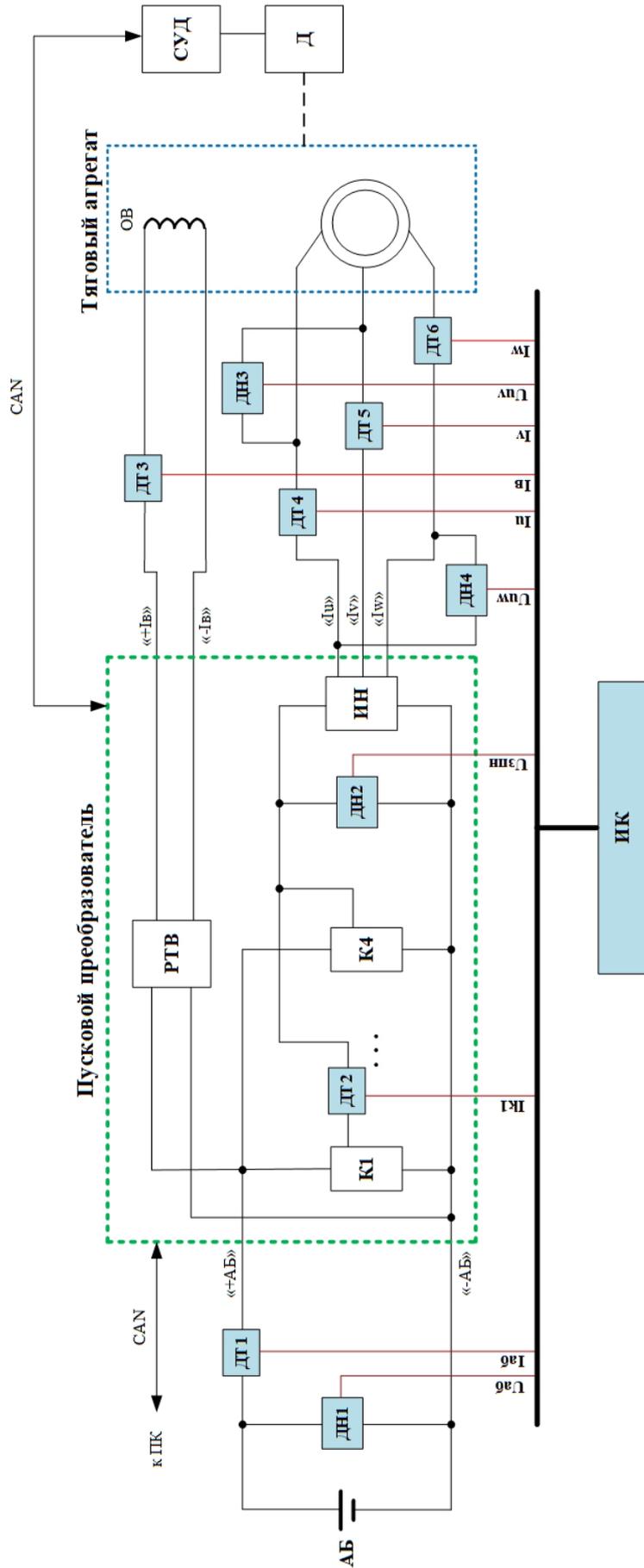


Рис. 3. Схема подключения измерительного комплекса:

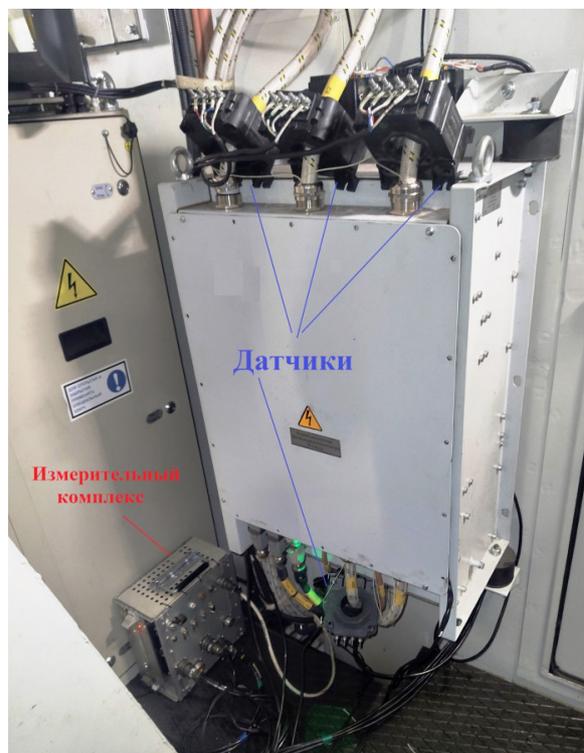
АБ — аккумуляторная батарея; ДН1–ДН4 — датчики напряжения; ДТ1–ДТ6 — датчики тока; ПК — персональный компьютер; К1–К4 — канал повышения напряжения; РТВ — регулятор тока возбуждения; ИН — инвертор напряжения; ОВ — обмотка возбуждения; СУД — система управления дизеля; Д — дизель; ИК — измерительный комплекс; CAN — интерфейс связи

– ток I_b , протекающий через обмотку возбуждения тягового агрегата;
– мгновенные значения фазных токов статора тягового агрегата I_u, I_v, I_w (одной «звезды»).

Место установки пускового преобразователя на тепловозе приведено на рис. 4а; подключение измерительного комплекса и датчиков — на рис. 4б.



а



б

Рис. 4. Размещение оборудования на тепловозе:

а — пускового преобразователя; б — измерительного комплекса и датчиков

Программное обеспечение измерительного комплекса начинает запись измерений с датчиков на внутренний съемный накопитель при превышении входного напряжения пускового преобразователя значения в 20 В. Напряжение поступает на вход пускового устройства от аккумуляторной батареи только после инициирования запуска дизельного двигателя нажатием соответствующей кнопки на пульте управления машиниста в кабине тепловоза и включения необходимых промежуточных реле и контакторов в схеме локомотива. Частота записи данных на съемный носитель измерительного комплекса при регистрации информации составляет 2 кГц.

Система автоматического управления пускового преобразователя получает от системы управления дизеля по каналу связи CAN задание:

- максимального времени пуска (в секундах);
- сигнала на начало прокрутки;

- максимального значения фазного тока статора (действующее значение);
- начального напряжения в звене повышения напряжения;
- максимального тока возбуждения.

Для просмотра результатов измерений АО «ВНИКТИ» разработана прикладная программа ProViewer vReg, которая преобразует данные из файлов, записанных на съемный накопитель измерительного комплекса, в графический вид.

На рис. 5 представлена осциллограмма мгновенных значений фазных токов статора I_u , I_v , I_w синхронного генератора при задании действующего значения тока от системы управления равного 854 А. Данному заданию соответствует амплитудное значение равное 1204 А.

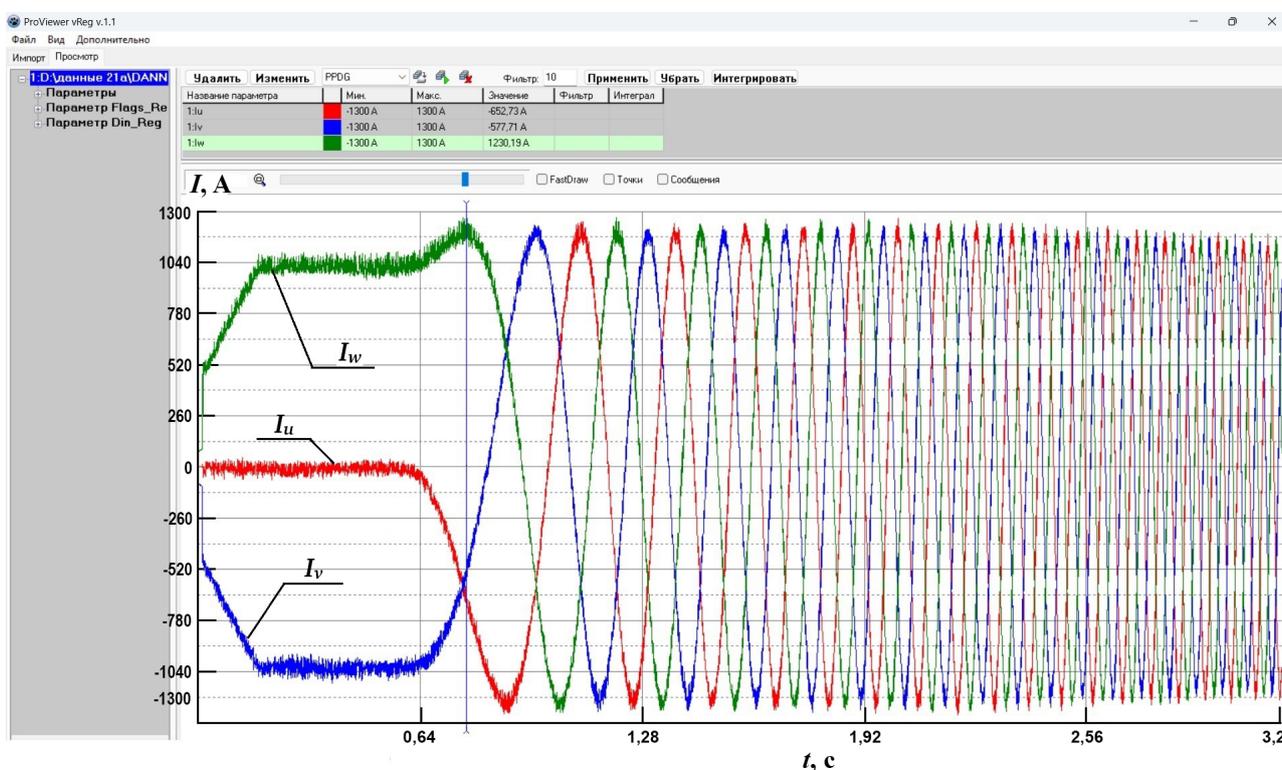


Рис. 5. Осциллограмма мгновенных значений фазных токов

В результате анализа осциллограммы выявлено, что реализованные значения токов соответствуют заданным с учетом ширины полосы гистерезиса $\delta = \pm 34$ А, которая установлена для блока инвертора пускового преобразователя. Система автоматического управления пускового преобразователя обеспечивает плавное изменение частоты и амплитуды трехфазного переменного тока для приведения во вращение ротора синхронной машины, связанного через пластинчатую муфту с коленчатым валом дизельного двигателя.

На рис. 6 представлена осциллограмма изменения напряжения $U_{аб}$ и тока аккумуляторной батареи $I_{аб}$, потребляемого пусковым преобразователем, тока

возбуждения синхронной машины I_B , тока первого канала накачки I_{K1} и напряжения в повышающем звене преобразователя $U_{зпп}$ при следующих начальных значениях заданных параметров:

- ток возбуждения — 120 А;
- напряжение в повышающем звене — 100 В;
- действующее значение фазного тока — 854 А;
- максимальная продолжительность процесса запуска — 12 с.

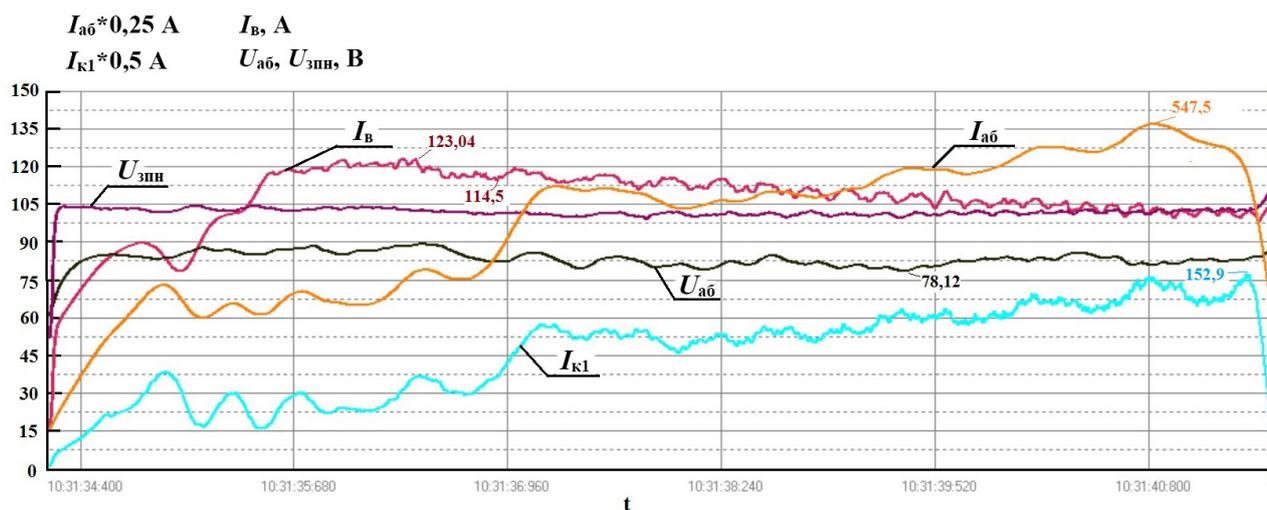


Рис. 6. Осциллограмма $U_{a6}, I_{a6}, I_B, I_{K1}, U_{зпп}$

В результате исследования осциллограмм выявлено следующее:

- длительность процесса запуска не превышает 8 с;
- блок регулятора тока возбуждения формирует ток I_B с учетом ширины полосы гистерезиса $\delta = \pm 10 \text{ A}$ (фактически от 114,5 до 123,04 А);
- напряжение $U_{зпп}$ соответствует заданному значению с допуском $\delta = \pm 10 \text{ В}$ (в диапазоне от 99 до 104,17 В);
- потребление тока от аккумуляторной батареи составляет 547,5 А;
- напряжение аккумуляторной батареи при запуске снизилось до 78,12 В.

На рис. 7 и 8 приведены осциллограммы пусков силовых установок тепловоза ТЭП70БС № 328 и 3ТЭ28 № 0021.

На тепловозе ТЭП70БС в качестве силовой установки применяется дизель-генератор 2А-9ДГ-01 (мощность 2940 кВт), состоящий из 16-цилиндрового V-образного дизеля 16ЧН2А 26/26 и тягового агрегата АСТМ 2800/600-1000 [9], параметры которых сопоставимы с дизель-генератором 18-9ДГМ.

Для построения графиков зависимостей основных параметров запуска для тепловоза ТЭП70БС использованы данные автоматизированной системы контроля параметров работы дизельного подвижного состава и учета дизельного топлива. Диагностические параметры фиксируются данной системой 2 раза в секунду.

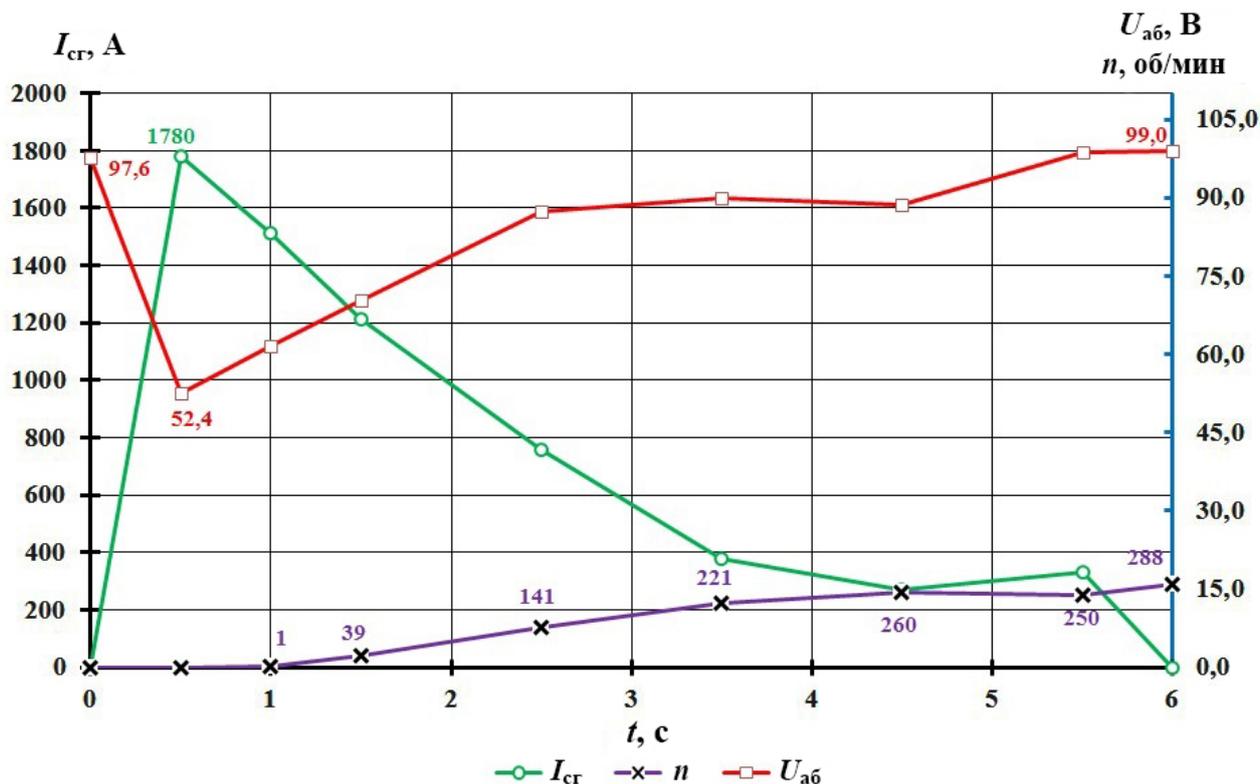


Рис. 7. Осциллограмма запуска дизеля тепловоза ТЭП70БС

Предварительную раскрутку коленчатого вала дизеля на тепловозе ТЭП70БС выполняет стартер-генератор типа 6СГ [9]. Стартер-генераторные системы запуска на сегодняшний день являются одними из наиболее распространенных на железнодорожном транспорте.

В соответствии с рис. 7:

- максимальный ток стартер-генератора при пуске $I_{ст}$ составляет 1780 А (в данном случае ток ограничивается только внутренним сопротивлением батареи и сопротивлением обмоток стартера);
- снижение напряжения аккумуляторной батареи $U_{аб}$ составило 52,4 В, общее падение напряжения — 45,2 В;
- общее время запуска — 6 с.

Данные для построения графиков зависимостей основных параметров запуска двигателя тепловоза 3ТЭ28 получены из архива дисплейного модуля машиниста локомотива. Регистрация основных параметров работы ведется с частотой 1 раз в секунду.

В соответствии с рис. 8:

- максимальный ток пускового преобразователя $I_{пн}$ составляет 509,8 А (кривая тока имеет распределенный характер с плавным нарастанием с увеличением частоты вращения вала синхронной машины);

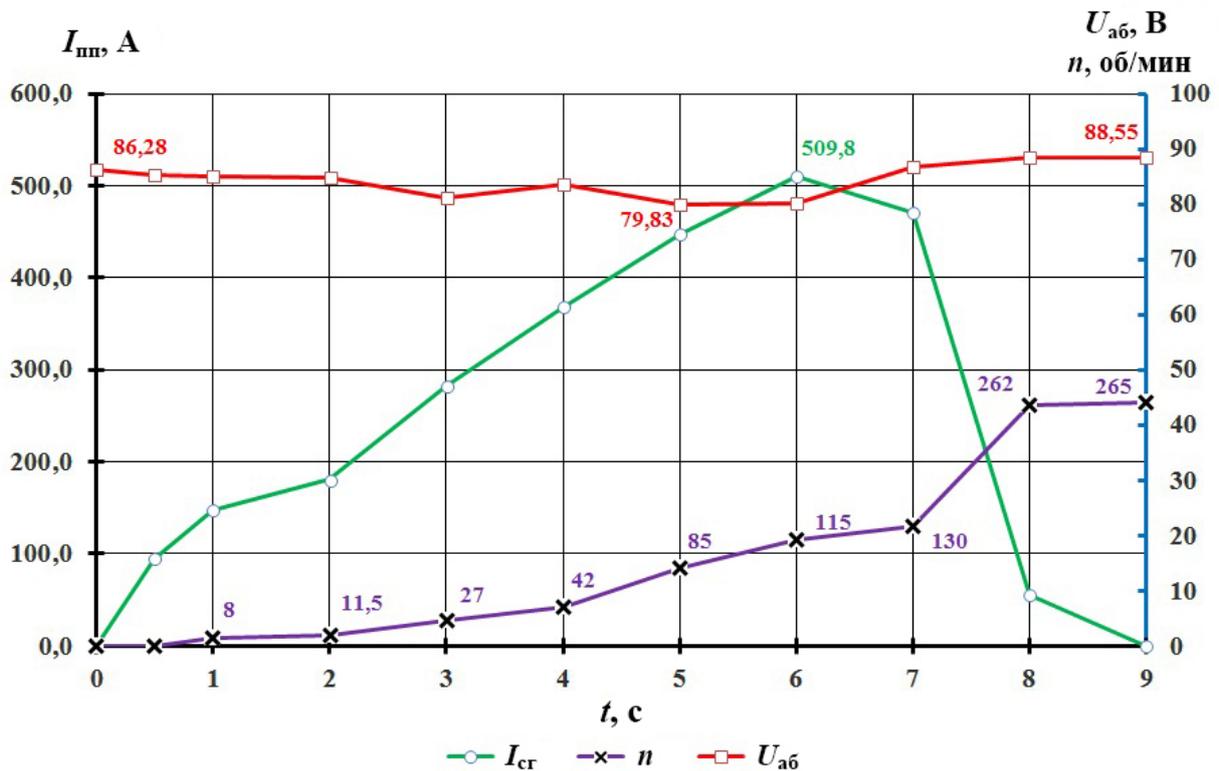


Рис. 8. Осциллограмма запуска дизеля тепловоза 3ТЭ28

– снижение напряжения аккумуляторной батареи при прокрутке дизеля составляет 6,45 В;

– общее время запуска — 9 с (с учетом времени на предварительное позиционирование ротора синхронной машины).

Изменение энергии, потребляемой от аккумуляторной батареи, рассчитано на основании измеренного напряжения источника питания и тока нагрузки и приведено на рис. 9а и 9б.

Площадь фигуры, границы которой сформированы графиком функции $P(t)$ и осью t , численно характеризует общее потребление энергии аккумуляторной батареи при запуске двигателя. Для вычисления площади фигур, приведенных на рис. 9а и 9б, используются численные методы интегрирования, а именно метод трапеций [10].

В результате вычислений получены следующие результаты:

– суммарная мощность, которую потребляет стартер-генератор при запуске, — 261 160 В·А·с;

– суммарная мощность, которую потребляет инверторная система запуска, — 235 331,6 В·А·с.

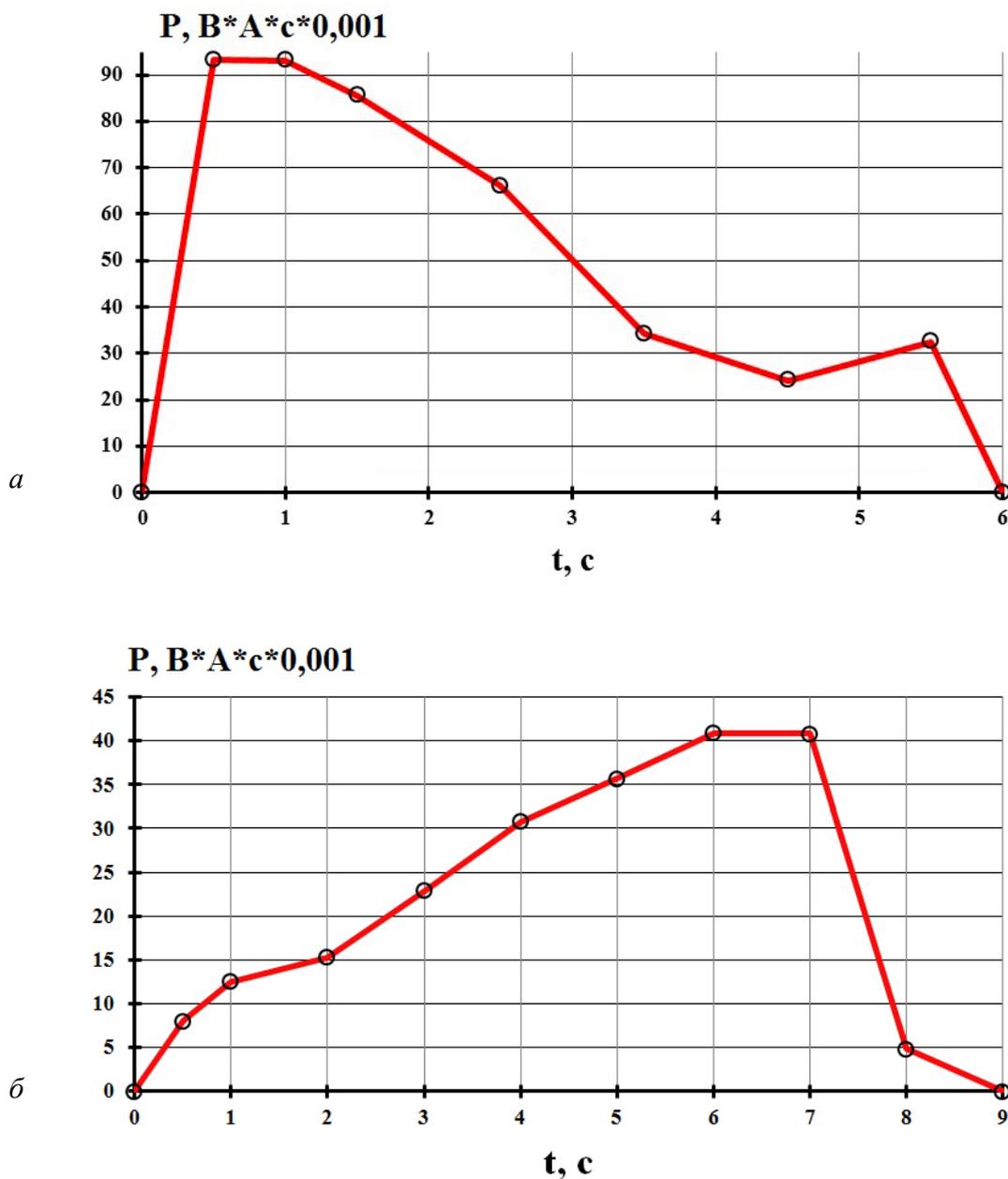


Рис. 9. Диаграммы потребления мощности:
a — стартер-генератором; *b* — инвертором

Таким образом, пренебрегая погрешностью метода численного интегрирования и большим шагом, обусловленным частотой регистрации данных, которые использовались при расчетах, снижение потребления энергии составило 9,88 % при сопоставимых начальных условиях запуска дизельных двигателей различного типа.

Заключение

Во время проведения эксплуатационных испытаний инверторной системы запуска на базе пускового преобразователя ППДГ-1200-200-У2 подтверждено обеспечение надежного запуска дизельного двигателя тепловоза 3ТЭ28. В ходе испытаний выполнялись запуски двигателя при различных начальных параметрах (напряжение батареи, температура моторного масла), при этом неудачных попыток зафиксировано не было.

По результатам анализа данных регистрации выявлено:

- при запуске двигателя в статорной обмотке синхронного генератора формируется трехфазный ток, плавно изменяющийся по амплитуде и частоте и обеспечивающий равномерную раскрутку коленчатого вала дизеля;
- снижение напряжения аккумуляторной батареи при инверторном запуске значительно ниже, чем на тепловозах, оборудованных стартер-генераторной системой запуска;
- потребляемый ток инверторной системы запуска плавно нарастает с увеличением частоты вращения ротора синхронной машины и не имеет ярко выраженных пиковых значений, как при стартерной прокрутке коленчатого вала двигателя, максимальное значение пускового тока значительно ниже при инверторном запуске;
- при раскрутке коленчатого вала двигателя с использованием синхронного агрегата и пускового преобразователя отсутствуют ударные нагрузки на аккумуляторную батарею, при этом потребляется меньше энергии по сравнению со стартер-генераторным запуском силовой установки.

Таким образом, по результатам эксплуатационных испытаний применение системы инверторного запуска может быть распространено и для других серий локомотивов.

Библиографический список

1. РЖД с опережением реализуют второй этап модернизации БАМа и Транссиба. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=207216> (дата обращения: 26.09.2024).
2. ТМХ получил сертификат соответствия на грузовой тепловоз 3ТЭ28. URL: <https://tmholding.ru/media/events/34233.html> (дата обращения: 26.09.2024).
3. Тепловоз магистральный грузовой 3ТЭ28, 2ТЭ28: руководство по эксплуатации СТНР.661112.004РЭ. Часть 1. Основные параметры и характеристики. Брянск: ООО «ТМХ Инжиниринг», 2023. 35 с.
4. Магистральный грузовой тепловоз 3ТЭ28. URL: <https://tmholding.ru/products/gruzovye/magistralnyu-teplovoz-3te28/?ysclid=m1jjqnfqtg261497000> (дата обращения: 26.09.2024).
5. Инжиниринговый центр двигателестроения. URL: <https://tmholding.ru/engineering-center/?ysclid=m1jjuoiobd368813074> (дата обращения: 26.09.2024).

6. Преобразователь пусковой дизель-генератора: руководство по эксплуатации. Коломна: АО «ВНИКТИ», 2021. 43 с.

7. Микроконтроллеры Cortex-M0/M3/M4. URL: <https://mcucpu.ru/index.php/ucontrollers/mcu/113-mikrokontrollery> (дата обращения: 01.10.2024).

8. STM32F405xx, STM32F405xx. Datasheet DS8626, rev. 9. STMicroelectronics, 2020. 203 p.

9. Осин Г.Г. Устройство и эксплуатация тепловозов серии ТЭП70БС (ТЭП70У): учебное пособие. М.: ОАО «РЖД», 2015. 266 с.

10. Коновалова Е. И., Яблокова Л. В. Численные методы математического анализа: учебное пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2022. 149 с.

Дата поступления: 10.10.2024

Решение о публикации: 28.11.2024

Контактная информация:

ПЛЕШАКОВ Андрей Александрович — заведующий лабораторией СУГЛ ОТВСП;
plechakov@vnikti.com

ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрическая тяга»; elt@pgups.ru

РОЛЛЕ Игорь Александрович — канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрическая тяга»; igor.rollet@inbox.ru

Study of the inverter system operation of the diesel engine start system during diesel locomotive 3TE28 operation

A. A. Pleshakov¹, A. M. Evstafiev², I. A. Rolle²

¹ JSC “Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock” (JSC “VNIKTI”), 410, Ocyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, Moscow region, 140402, Russia

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

For citation: Pleshakov A. A., Evstafiev A. M., Rolle I. A. Study of the inverter system operation of the diesel engine start system during diesel locomotive 3TE28 operation // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 61–77. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-61-77

Abstract

Purpose: carrying out operational tests of the start converter as a device of the preliminary diesel engine cranking of a diesel locomotive 3TE28 and the analysis of the obtained results. **Methods:** the functioning of the inverter starting system was studied within the framework of its operation as part of a diesel locomotive under different conditions of diesel engine starting (battery residual voltage, oil temperature)

using a measuring complex and a set of additional sensors, as well as accumulation and analysis of the obtained measurement results. **Results:** operational tests of the inverter system of the start power plant on the diesel locomotive 3TE28 in locomotive depot “Tynda-Severnaya” were carried out. The circuit solutions and algorithms of the automatic control system of the inverter are verified. Comparative analysis of energy efficiency of inverter and starter-generator engine start systems is performed. **Practical relevance:** according to the results of operational tests the possibility of application of start converters for reliable diesel engine starts of diesel locomotives equipped with synchronous traction units instead of widespread nowadays starter-generator starting systems is confirmed. The developed technical solution can be duplicated on other series of locomotives, both newly developed and operated as part of their modernization or repair. The data accumulated in operation can be used for further improvement of the control system algorithms of the start converter.

Keywords: diesel locomotive, diesel generator, inverter start system, start converter, synchronous generator, measuring complex, operational tests.

References

1. RZhD s operezheniem realizuyut vtoroj etap modernizacii BAMA i Transsiba. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=207216> (data obrashcheniya: 26.09.2024). (In Russian)
2. TMH poluchil sertifikat sootvetstviya na gruzovoj teplovoz 3TE28. URL: <https://tmholding.ru/media/events/34233.html> (data obrashcheniya: 26.09.2024). (In Russian)
3. Teplovoz magistral'nyj gruzovoj 3TE28, 2TE28: rukovodstvo po ekspluatatsii STNR.661112.004RE. Chast' 1. Osnovnye parametry i harakteristiki. Bryansk: OOO “TMH Inzhiniring”, 2023. 35 s. (In Russian)
4. Magistral'nyj gruzovoj teplovoz 3TE28. URL: <https://tmholding.ru/products/gruzovye/magistralnyy-teplovoz-3te28/?ysclid=m1jjqnfqtg261497000> (data obrashcheniya: 26.09.2024). (In Russian)
5. Inzhiniringovyj centr dvigatelestroeniya. URL: <https://tmholding.ru/engineering-center/?ysclid=m1jjyoiobd368813074> (data obrashcheniya: 26.09.2024). (In Russian)
6. Preobrazovatel' puskovoj dizel'-generatora: rukovodstvo po ekspluatatsii. Kolomna: AO “VNIKTI”, 2021. 43 s. (In Russian)
7. Mikrokontrollery Cortex-M0/M3/M4. URL: <https://mcucpu.ru/index.php/ucontrollers/mcu/113-mikrokontrollery> (data obrashcheniya: 01.10.2024). (In Russian)
8. STM32F405xx, STM32F405xx. Datasheet DS8626, rev. 9. STMicroelectronics, 2020. 203 p.
9. Osin G.G. Ustrojstvo i ekspluataciya teplovozov serii TEP70BS (TEP70U): uchebnoe posobie. M.: OAO “RZhD”, 2015. 266 s. (In Russian)
10. Konovalova E. I., Yablokova L. V. Chislennye metody matematicheskogo analiza: uchebnoe posobie. Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2022. 149 s. (In Russian)

Received: 10.10.2024

Accepted: 28.11.2024

Author's information:

Andrey A. PLESHAKOV — Head of the Laboratory of the SUGL OTVSP; plechakov@vnikti.com

Andrey M. EVSTAFIEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the “Electric Traction”
Department; elt@pgups.ru

Igor A. ROLLE — PhD in Engineering, Associate Professor, “Electric Traction” Department;
igor.rollet@inbox.ru

УДК 629.4.022

Оценка возможности модернизации пассажирских вагонов для грузовых перевозок на высокоскоростных магистралях

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

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

Для цитирования: Кононов Д. П., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г. Оценка возможности модернизации пассажирских вагонов для грузовых перевозок на высокоскоростных магистралях // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 78–86. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-78-86

Аннотация

Цель: установить возможность применения на ВСМ грузовых вагонов, оборудованных колесными парами с изменяемой шириной колеи. **Методы:** проведен анализ современных конструкций грузовых вагонов, созданных на базе пассажирских вагонов, проведен анализ конструкций колесных пар с изменяемой шириной колеи. **Результаты:** анализ выполненных исследований показал, ввиду практического отсутствия мировых аналогов подвижной состав предполагается создавать на базе существующих пассажирских электропоездов. Для грузовых высокоскоростных железных дорог целесообразно использовать тележки Якобса и иметь одинаковое расстояние между путями на всем протяжении проекта, но если страны-участницы не смогут достичь общего соглашения, то для подвижного состава потребуются специальные тележки с колесными парами, которые могут изменять расстояние, подстраиваясь под путь. Проектирование грузового подвижного состава на основе существующих моделей электропоездов позволит сократить издержки при проектировании и производстве ввиду унификации ряда элементов подвижного состава. **Практическая значимость:** применение на ВСМ «Евразия» современных грузовых вагонов, созданных на базе пассажирских с применением колесных пар с изменяемой шириной колеи, позволит существенно повысить скорость перевозки грузов, увеличит доход от эксплуатации магистрали и создаст новую отрасль железнодорожного транспорта — высокоскоростные грузовые поезда.

Ключевые слова: грузопассажирская ВСМ, грузовой подвижной состав для ВСМ, переоборудование пассажирских вагонов в грузовые, применение тележки Якобса, тележки с изменяемой шириной колеи, раздвижные колесные пары, высокоскоростные грузовые поезда.

В транспортных стратегиях ряда стран высокоскоростной железнодорожный транспорт является одной из опорных точек их предполагаемого будущего. Для безотказной работы высокоскоростного транспорта требуется специальная инфраструктура, в первую очередь необходимы высокоскоростные железнодорожные магистрали и специальный подвижной состав — высокоскоростной наземный транспорт.

Высокоскоростные железнодорожные магистрали (ВСМ) — это новые высокоскоростные железнодорожные линии, выделенные по всей длине или на отдельных участках, по которым пассажирские поезда движутся со скоростью 250 км/ч и более. Высокоскоростной наземный транспорт (ВСНТ) — это система наземного железнодорожного транспорта с использованием специальных путей

(высокоскоростной рельсовый транспорт) или поездов на магнитной левитации, движущихся со скоростью 250 км/ч и более [1].

В России данный вид транспорта только начинает зарождаться — два проекта переходят в стадию строительства. Наиболее важным проектом строительства для Евразийского континента является грузопассажирская ВСМ «Евразия», которая соединит системы ВСМ Европы и Азии через Россию, Белоруссию и Казахстан [2].

Согласно техническому заданию на проектирование будущей ВСМ «Евразия», планируется не только ведение пассажирских перевозок на скоростях около 400 км/ч, но и обеспечение грузовых перевозок на скоростях более 250–300 км/ч. Отсутствует подвижной состав, который удовлетворяет поставленным скоростям движения.

Так как в рамках данной статьи говорится только о высокоскоростном грузовом составе, то рассмотрим именно его, кратко раскрыв тему пассажирской составляющей.

На 2023 год Российская Федерация не обладает технологиями производства высокоскоростного наземного транспорта, который предназначен для пассажирских перевозок, однако имеет 20 электропоездов ЭВС1/ЭВС2 «Сапсан», изготовленных под руководством компании «*Siemens*», причем электропоезда ЭВС1 — предназначены для постоянного тока (16 поездов), а ЭВС2 — двухсистемного питания (4 поезда). Согласно информации, представленной компанией «*Siemens*», электропоезда «*Velaro Rus*» способны развивать скорость до 350 км/ч. Также работы по проектированию такого вида подвижного состава велись с мировыми лидерами в сфере машиностроения, такими как *Bombardier Transportation*, *Alstom*, *Siemens AG* и *Kawasaki HI*.

Теперь рассмотрим компонент грузовых перевозок более подробно. В настоящее время в мире не существует высокоскоростных наземных транспортных систем, предназначенных для грузовых перевозок. Поскольку глобального аналога нет (нигде еще не проектировались высокоскоростные грузовые вагоны), вагоны будут разрабатываться на базе существующих пассажирских электропоездов.

Предполагается, что базовый вариант поезда будет состоять из 12 вагонов для максимальной скорости движения 350 км/ч. При этом вносятся коррективы в конструкцию и ряд элементов электропоезда. Элементы интерьера, такие как сиденья, багажные полки и ряд электрооборудования, предназначенные для пользования пассажирами, будут демонтированы, что позволит снизить массу состава и перевозить большие грузы. Изменения коснутся и экстерьера электропоезда. Будет изменено расположение иллюминаторов, чтобы свести их количество к минимуму. Данные изменения позволят оптимизировать производство такого подвижного состава, что улучшит характеристики самого транспорта.

Использование легких авиационных контейнеров с жестким растягивающимся корпусом — интересная инженерная идея. Там, где необходимо координировать

грузовые поезда и воздушный транспорт, например, в места, удаленные от железных дорог (регионы Крайнего Севера и Дальнего Востока), можно ожидать, что использование авиационных контейнеров и поддонов позволит снизить стоимость строительства, уменьшить вес кузова и сократить время транспортировки. На высокоскоростном грузовом составе недопустима перевозка грузов открытым способом, так как это создает дополнительные сопротивления движению поезда, что несет за собой потери. Для улучшения эксплуатационных характеристик поезд имеет обтекаемую форму с минимальными выступами в передней части, а токоприемники оснащены специальными аэродинамическими щитами. Кроме того, ходовое оборудование закрыто специальным щитом. Использование таких конструктивных решений снижает аэродинамический шум.

Консолидация, когда грузы от разных перевозчиков объединяются на складах и отправляются, когда набирается оптимальное количество, является типичным видом перевозок отдельных грузов в проекте Евразийской высокоскоростной магистрали. В целом эти виды транспорта характеризуются низкими транспортными расходами. Одним из основных пользователей данного способа доставки следует рассматривать такие крупные торговые платформы, как *Alibaba Group*, *Joom*, *Aliexpress* и др., где растет спрос на товары с добавочной стоимостью и чувствительностью к сроку доставки.

Предполагается, что на транспортировку будут приниматься народно-хозяйственные грузы, техника, личное имущество граждан, упаковки и свойства которых позволяют безопасно их перевозить. Также одним из основных пользователей доставки ВСМ стоит рассматривать компании, производящие грузы, требующие температурного режима и прочих специальных условий (продукты питания, растения, скот) [3]. Кроме того, ставится под вопрос возможность транспортировки наливных грузов (жидкое топливо, концентрированные кислоты и др.), насыпных грузов (различные удобрения, обогащенные руды и др.) и опасных видов грузов, которые могут привести к техногенным катастрофам. Невыгодность подобной категории товаров для высокоскоростной доставки объясняется их невысокой привязкой ко времени транспортировки в отличие от грузов, требующих специальных условий.

Необходимо предусмотреть специальный отсек в кузове вагона, так называемый *Cargo door*, для погрузки пакетов и контейнеров. Для перемещения грузов должны быть предусмотрены специальные транспортеры, которые позволят занимать пространство вагона, предназначенное для груза. В свою очередь, для успешной доставки до пункта назначения, чтобы не допустить повреждения предполагаемого груза, будут сделаны средства закрепления. Изменения коснутся и ходовой части высокоскоростного электропоезда. Для грузового высокоскоростного состава рационально использовать тележку Якобса — тележка расположена между двумя вагонами. Вес каждого вагона распространяется на одну половину тележки.

Такая конструкция необходима для того, чтобы поезд не опрокинулся в случае схода с рельсов и для предотвращения телескопического эффекта (когда поезд наезжает лоб в лоб на препятствие, нанося серьезный ущерб грузу). Однако тележка есть только у головного вагона.

Сложность и географическое положение проекта требуют единой колеи на всем его протяжении, но если страны-участницы не смогут прийти к общему соглашению, то для подвижного состава потребуются специальные тележки, ширина которых может меняться в зависимости от желаемого пути [4]. Наиболее подходящей для условий, предусмотренных Евразийской высокоскоростной магистралью, является телескопическая тележка *Talgo*. В 1964 году испанская компания *Talgo* разработала технологию автоматической смены колеи. Эта технология была впервые применена в 1969 году и стала решением, предложенным *RENFE*, чтобы избежать ненужных пассажирских пересадок на испано-французской границе. Поезда между Барселоной и Женевой проходили через специальное устройство, которое позволяло колесам поезда переходить с иберийской колеи на европейскую на малых скоростях (15–20 км/ч) без вмешательства персонала. Эта же компания разработала пассажирские экспресс-поезда с телескопическими колесами. Поезда *TALGO*, которые уже несколько десятилетий курсируют между Испанией (колея 1676 мм) и Европой (колея 1435 мм), оснащены одноосными тележками (т. е. такое оборудование, как рессорная подвеска и тормоза, установлено на одной паре телескопических колес) [5].

В Китае (2020 г.) построили новый высокоскоростной поезд семейства *Fuxing*, который способен развивать скорость до 450 км/ч и который может эксплуатироваться при температурах от –50 до + 50 °С.

Главная особенность этого поезда — это способность изменять ширину колеи колесной пары с 1435 мм на 1520 мм, причем это происходит прямо на ходу и занимает не более 50 секунд. Преобразование колесных блоков для работы на железных дорогах разной ширины происходит при прохождении их через стационарные передаточные устройства, расположенные на стыках железных дорог разной ширины.

Предполагается, что эти составы будут использоваться для международных перевозок между Китаем и Россией, Казахстаном и Монголией, в частности между Пекином и Москвой. Стоит отметить, что в проектной работе «Евразия», которая будет представлена в будущем, речь пойдет о грузовых транспортных средствах, разработанных на базе пассажирских высокоскоростных электропоездов.

Проектирование подвижного состава на основе существующих моделей электропоездов позволит сократить издержки при производстве ввиду унификации ряда элементов подвижного состава. К таким элементам могут относиться элементы ходовой части, элементы управления электропоезда, элементы корпуса и обшивки и др. [6–15].

По такому же пути идет и авиационный транспорт. Так, на основе воздушных судов, которые предназначаются для пассажирских перевозок, возможна их конвертация для грузовых перевозок. Возможной платформой для проектирования грузового подвижного состава, рассчитанного на скорости более 350 км/ч, может стать электропоезд серии CR400.

В таблице показаны основные характеристики высокоскоростного электропоезда. Так, по заявлению старшего научного сотрудника Китайской академии железнодорожных наук (CARS) Чжан Бо, проект разработки под названием CR300 с конструкционной скоростью 430 км/ч нацелен на удовлетворение различных потребностей пассажиров и создание международного бренда китайских скоростных поездов.

ТАБЛИЦА. Технические характеристики электропоездов, построенных в КНР

Модификация электропоезда	Габариты вагона электропоезда, мм	Общая длина электропоезда, м	Конструкционная скорость, км/ч	Вместимость, мест	Составность	Мощность (перемен. ток напр. 25 кВ), МВт	Ввод в эксплуатацию
	Длина вагона (с учетом автосцепок): 27910 Между торцевыми стенками вагона — 25650 Ширина: 3360 Высота: 4050		Достигнутая на испытаниях: 420 Проектная макс.: 430 Эксплуатационная проектная: 400 Эксплуатационная согласно ПТЭ Китайских ж. д.: 350			10,4	
CR400AF		209		392–556	4М-4Пр		15.08.2016
CR400AF-A		414		1193	8М-8Пр		16.06.2018
CR400AF-B		439,8		1283	8М-9Пр	19,2	05.01.2019

В целом ВСМ «Евразия» — это сложный трансконтинентальный проект. Его реализация потребует полного переосмысления работы железнодорожного транспорта и подхода к транспорту в целом. Он «революционизирует» грузовые железнодорожные перевозки и создаст новое направление в железнодорожном транспорте — высокоскоростные грузовые поезда, и работа над проектом ВСМ и будущими грузовыми электропоездами имеет огромное значение для России, социально-экономического положения страны и конкурентоспособности российской сети железнодорожного транспорта. Магистраль поднимет уровень дальности и скорости перевозок на десятилетия вперед. Необходимо создать новый тип транспортного средства и новую нормативную базу, которая обеспечит его разумную эксплуатацию на территории всех стран-участниц. Проект реализуется постепенно, но отсутствие опыта в создании такого крупного проекта сделало решение описанных проблем сложным и длительным.

Библиографический список

1. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: в 2 т.: учеб. пособие / Л. С. Блажко [и др.]; под ред. И. П. Киселева. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. Т. 1.
2. Стал известен маршрут высокоскоростного ЖД коридора «Евразия». URL: <http://www.mid.gov.kz/ru/news/stal-izvesten-marshrut-vysokoskorostnogo-zhd-koridora-evraziya> (дата обращения: 14.12.2020).
3. Давлетшин Т.Г. ВСМ-2 Москва — Казань — Екатеринбург: от Чебоксар до Казани // Вестник экономики, права и социологии. 2018. № 1. Т. 2. С. 81–84.
4. Давлетшин Т.Г. Железнодорожная магистраль «Евразия»: проблемы и перспективы // Проблемы современной экономики. 2019. № 3. С. 81–85.
5. Садчиков П.И., Целищева О.Л. Технология перехода железнодорожного подвижного состава с одной колеи на другую (международный опыт). URL: http://ipem.ru/files/files/tzd_web_versions/tzd_14_web_full.pdf (дата обращения: 14.12.2020).
6. Жуков Е.Р., Будюкин А.М., Кондратенко В.Г. Современные материалы и конструкции, применяемые для отечественных железнодорожных вагонов // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ПГУПС, 2017. С. 95–98.
7. Кондратенко В.Г., Будюкин А.М., Жуков Е.Р. Совершенствование технологии сборки кузовов железнодорожных вагонов // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ПГУПС, 2017. С. 98–101.
8. Применение современных инновационных материалов в конструкции подвижного состава / А.Н. Стефанишина [и др.] // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ПГУПС, 2018. С. 111–117.
9. Огородникова Л.В., Воробьев А.А., Соболев А.А. Эффективность внедрения на подвижном составе деталей, полученных методом порошковой металлургии // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте железнодорожного подвижного состава: сборник трудов национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ПГУПС, 2020. С. 164–169.
10. Примаченко К.О., Воробьев А.А., Соболев А.А. Технология сварки алюминиевого кузова высокоскоростного транспорта // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте железнодорожного подвижного состава: сборник трудов национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ПГУПС, 2020. С. 120–128.
11. Лисовский Г.Н., Воробьев А.А. Оценка эффективности внедрения сварочных технологий с высокой степенью автоматизации, гарантирующие требуемое качество и безопасность железнодорожной техники // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте железнодорожного подвижного состава: сборник трудов национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. 2020. С. 174–180.

12. Перспективы снижения веса вагонов за счет применения прогрессивных материалов / А. А. Глебов [и др.] // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ПГУПС, 2018. С. 46–50.

13. Здрелюк Д. Ю., Кононов Д. П. Модернизация технологического процесса сварки элементов кузова подвижного состава // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ПГУПС, 2018. С. 81–83.

14. Чуфистов Д. Г., Перепеченов А. М. Анализ применения высокопрочных наноструктурированных пружин для подвижного состава // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ПГУПС, 2018. С. 117–120.

15. Будюкин А. М., Постников Б. А. Повышение износостойкости колесных пар скоростного подвижного состава // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ПГУПС, 2016. С. 22–23.

Дата поступления: 15.09.2024

Решение о публикации: 23.10.2024

Контактная информация:

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — докт. техн. наук, доцент; d_kononov@mail.ru

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

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

Assessment of the possibility of modernization of passenger cars for freight transportation on high-speed lines

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

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

For citation: Kononov D. P., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Assessment of the possibility of modernization of passenger cars for freight transportation on high-speed lines // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 78–86. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-78-86

Abstract

Purpose: establish the possibility of using freight cars equipped with variable-gauge wheel sets on high-speed railways. **Methods:** an analysis of modern designs of freight cars created on the basis of passenger cars was carried out, and an analysis of designs of wheel pairs with variable track width was carried out. **Results:**

analysis of the conducted research showed that, due to the practical absence of world analogues, the rolling stock is supposed to be created on the basis of existing passenger electric trains. For high-speed freight railways, it is advisable to use Jacobs bogies and have the same distance between the tracks throughout the entire length of the project, but if the participating countries cannot reach a common agreement, then the rolling stock will require special bogies with wheel pairs that can change the distance, adjusting to the track. Designing freight rolling stock based on existing models of electric trains will reduce costs in design and production, due to the unification of a number of elements of the rolling stock. **Practical importance:** the use of modern freight cars on the Eurasia high-speed railway, designed on the basis of passenger cars using variable-gauge wheel sets, will significantly increase the speed of freight transportation, increase revenue from the operation of the line, and create a new branch of rail transport — high-speed freight trains.

Keywords: cargo-passenger high-speed railway, freight rolling stock for high-speed railway, conversion of passenger cars into freight cars, use of Jacobs bogies, bogies with variable gauge, sliding wheel pairs, high-speed freight trains.

References

1. Vysokoskorostnoj zheleznodorozhnyj transport. Obshhij kurs: v 2 t.: ucheb. posobie / L. S. Blazhko [i dr.]; pod red. I. P. Kiseleva. M.: Ucheb.-metod. centr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte, 2014. T. 1. (In Russian)
2. Stal izvesten marshrut vysokoskorostnogo ZhD koridora «Evraziya». URL: <http://www.mid.gov.kz/ru/news/stal-izvesten-marshrut-vysokoskorostnogo-zhd-koridora-evraziya> (data obrashcheniya: 14.12.2020). (In Russian)
3. Davletshin T. G. VSM-2 Moskva — Kazan' — Ekaterinburg: ot Cheboksar do Kazani // Vestnik ekonomiki, prava i sociologii. 2018. No. 1. T. 2. S. 81–84.
4. Davletshin T. G. Zheleznodorozhnaya magistral' «Evraziya»: problemy i perspektivy // Problemy sovremennoj ekonomiki. 2019. No. 3. S. 81–85.
5. Sadchikov P. I., Celishcheva O. L. Tekhnologiya perekhoda zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava s odnoj kolei na druguyu (mezhdunarodnyj opyt). URL: http://ipem.ru/files/files/tzd_web_versions/tzd_14_web_full.pdf (data obrashcheniya: 14.12.2020). (In Russian)
6. Zhukov E. R., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Sovremennye materialy i konstrukcii, primenyaemye dlya otechestvennyh zheleznodorozhnyh vagonov // Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. SPb.: PGUPS, 2017. S. 95–98. (In Russian)
7. Kondratenko V. G., Budyukin A. M., Zhukov E. R. Sovershenstvovanie tekhnologii sborki kuzovov zheleznodorozhnyh vagonov // Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. SPb.: PGUPS, 2017. S. 98–101. (In Russian)
8. Primenenie sovremennyh innovacionnyh materialov v konstrukcii podvizhnogo sostava / A. N. Stefanishina [i dr.] // Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. SPb.: PGUPS, 2018. S. 111–117. (In Russian)
9. Ogorodnikova L. V., Vorob'ev A. A., Sobolev A. A. Effektivnost' vnedreniya na podvizhnom sostave detalej, poluchennyh metodom poroshkovej metallurgii // Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: sbornik trudov nacional'noj

nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchenyh. SPb.: PGUPS, 2020. S. 164–169. (In Russian)

10. Primachenko K. O., Vorob'ev A. A., Sobolev A. A. Tekhnologiya svarki alyuminievogo kuzova vysokoskorostnogo transporta // *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: sbornik trudov nacional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchenyh.* SPb.: PGUPS, 2020. S. 120–128. (In Russian)

11. Lisovskij G. N., Vorob'ev A. A. Ocenka effektivnosti vnedreniya svarochnyh tekhnologij s vysokoj stepen'yu avtomatizacii, garantiruyushchie trebuemoe kachestvo i bezopasnost' zheleznodorozhnoj tekhniki // *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: sbornik trudov nacional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchenyh.* SPb.: PGUPS, 2020. S. 174–180. (In Russian)

12. Perspektivy snizheniya vesa vagonov za schet primeneniya progressivnyh materialov / A. A. Glebov [i dr.] // *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh.* SPb.: PGUPS, 2018. S. 46–50. (In Russian)

13. Zdelyuk D. Yu., Kononov D. P. Modernizaciya tekhnologicheskogo processa svarki elementov kuzova podvizhnogo sostava // *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh.* SPb.: PGUPS, 2018. S. 81–83. (In Russian)

14. Chufistov D. G., Perepechenov A. M. Analiz primeneniya vysokoprochnyh nanostrukturirovannyh pruzhin dlya podvizhnogo sostava // *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh.* SPb.: PGUPS, 2018. S. 117–120. (In Russian)

15. Budyukin A. M., Postnikov B. A. Povyshenie iznosostojkosti kolesnyh par skorostnogo podvizhnogo sostava // *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh.* SPb.: PGUPS, 2016. S. 22–23. (In Russian)

Received: 15.09.2024

Accepted: 23.10.2024

Author's information:

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

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

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

УДК 004.942

Подходы к формализации организационно-технологических задач интеграции искусственного интеллекта в систему управления ОАО «РЖД»

Е. В. Казакевич¹, А. В. Богданов²

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

² Научно-исследовательский институт (ВСИ МТО ВС РФ) Военной академии материально-технического обеспечения, Россия, 191123, Санкт-Петербург, Вознесенская наб., 10а

Для цитирования: Казакевич Е. В., Богданов А. В. Подходы к формализации организационно-технологических задач интеграции искусственного интеллекта в систему управления ОАО «РЖД» // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 87–95. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-87-95

Аннотация

Актуальность: представленное в статье исследование посвящено вопросам формализации методического обеспечения и определению организационно-технологических задач внедрения системы искусственного интеллекта в систему управления ОАО «РЖД». Рассматриваются вопросы автоматизации процессов сбора, хранения, передачи, аналитической обработки информации в интересах повышения качества управленческих решений в системе управления железных дорог, а также внедрения систем искусственного интеллекта применительно к органам управления ОАО «РЖД». **Цель:** определение направлений формализации подходов нормативного регулирования внедрения систем искусственного интеллекта в систему управления ОАО «РЖД». **Методы:** гармонизация, системный анализ. **Результаты:** в процессе исследования определены подходы к регулированию нормативно-правовых мероприятий, которые позволяют проводить разработку и совершенствование НТД на единых подходах. **Практическая значимость:** определение подходов к регулированию нормативно-правовых мероприятий позволит специалистам, занимающимся вопросами системного проектирования, разработки, внедрения, эксплуатации систем ИИ, разработчикам стандартов, а также специалистам регуляторных органов совершенствовать нормативно-правовую базу на единых подходах, а разработчикам технологий ИИ позволят сформировать новые требования к разрабатываемым программно-аппаратным средствам.

Ключевые слова: искусственный интеллект, база знаний, система управления, лицо, принимающее решение, поддержка принятия решения.

Актуальность повышения уровня автоматизации процессов сбора, хранения, передачи, аналитической обработки информации в интересах роста качества управленческих решений, а также внедрения систем искусственного интеллекта (ИИ) применительно к системе управления ОАО «РЖД» (СУ РЖД) постоянно возрастает. Доверие к системам ИИ является важнейшим условием, определяющим возможность применения этих систем. Представленные в статье подходы к организации применения технологий искусственного интеллекта в СУ РЖД рассматриваются как слабо структурируемая проблема в сфере системы поддержки принятия решений для должностных лиц (ДЛ). Рассмотренные подходы позволяют

разработчикам технологий ИИ сформировать новые требования к разрабатываемым программно-аппаратным средствам.

Анализ существующей нормативной базы [1–10], принятой в РФ, показывает, что в имеющихся стандартах и нормативно-технических документах (НТД), описание технологической основы систем ИИ в настоящее время отсутствует, а существующие подходы представляют собой основные теоретические положения организации систем искусственного интеллекта с учетом их особенностей и специфики и определяют:

- классификационные признаки систем ИИ;
- варианты определенных типов конкретных систем ИИ;
- стандартизацию систем ИИ с учетом их классификации.

Применимость разработанных и внедренных стандартов не позволяет обеспечить оптимальное использование систем искусственного интеллекта для решения практических задач автономного характера и задач, решаемых во взаимодействии с организационно-техническими системами (человеко-машинные системы, программно-аппаратные комплексы, комплексы средств автоматизации и др.). При этом необходимо отметить, что имеющаяся нормативная база не позволяет формализовать задачи информационной поддержки принятия решений во вновь разрабатываемых программно-аппаратных комплексах (ПАК) систем ИИ для деятельности должностных лиц СУ РЖД, а также что в разработанных НТД классификация и понятийный аппарат не нормализованы и не гармонизированы, что вносит очевидные риски при обеспечении доверия к результатам оценки соответствия данной нормативной базы.

Например, в соответствии с ГОСТ Р 59276-2020 искусственный интеллект определяется как способность технической системы имитировать когнитивные функции человека. Однако ГОСТ Р 59277-2020 рассматривает искусственный интеллект как комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека, включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма и достижение целей.

С точки зрения прикладных задач, решаемых в системах управления, понятие ИИ как комплекса технологических решений позволяет более точно определить объект исследования и разработки.

При этом применительно к системе управления ОАО «РЖД» (рис. 1) искусственный интеллект предлагается рассматривать как особый компонент, который призван в максимально возможной степени оказать помощь должностному лицу в принятии оптимального решения в условиях воздействия множества самых разнообразных факторов, включая лавинообразный рост объемов информации (например, проблема технологии Big Data).

Необходимо отметить, что рост структурированной информации в виде баз данных наблюдался еще 15–20 лет назад. Однако в последние годы идет

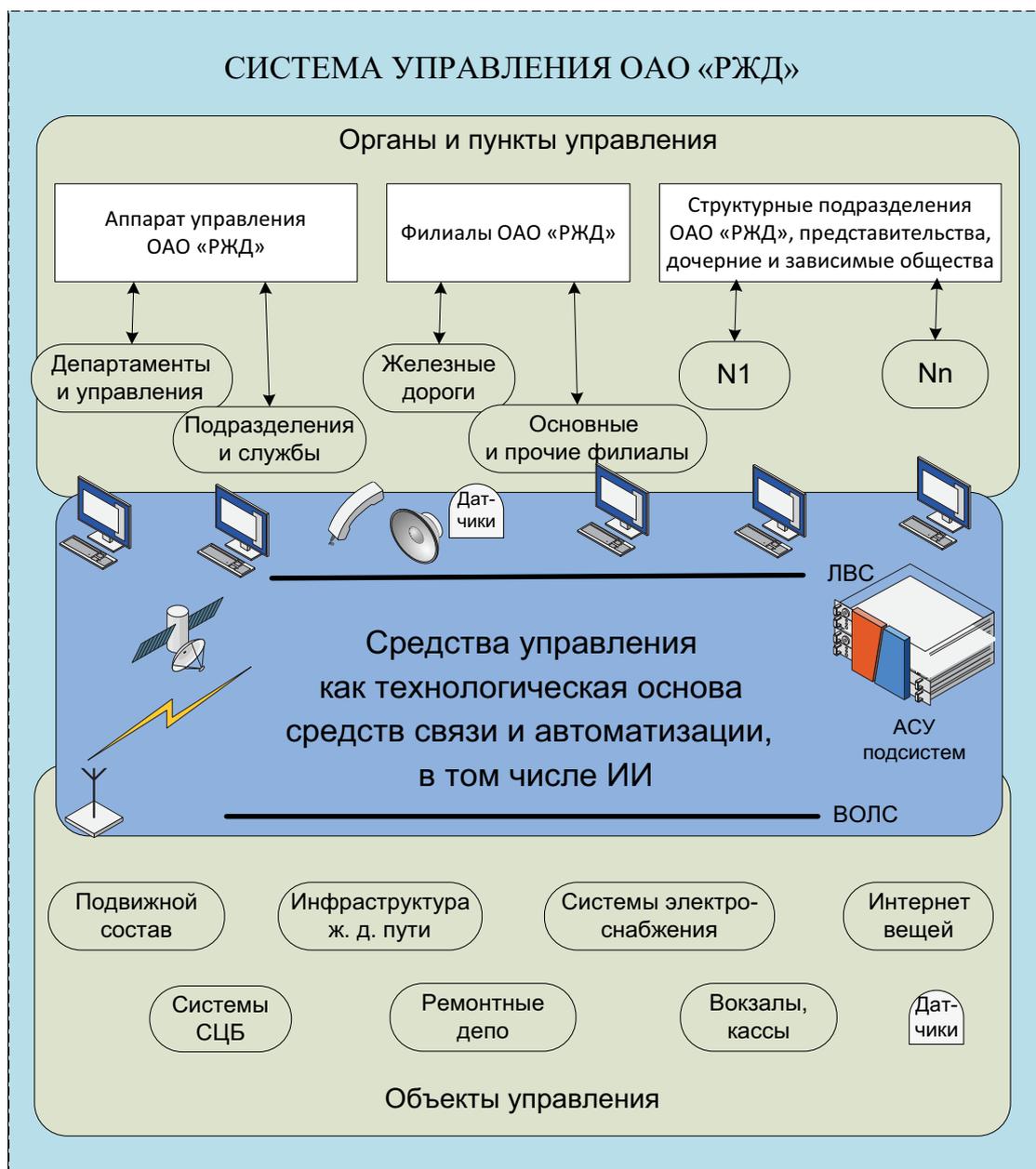


Рис. 1. Система управления ОАО «РЖД»

существенный рост объемов слабоструктурированной информации (тексты, аудио, фото, видео). По предварительным оценкам, объем накопленной информации к настоящему времени превышает 100 петабайт, а в течение 10 лет может возрасти еще в десятки раз.

Проблема решения аналитических задач в СУ РЖД с использованием больших объемов информации накладывает свои условия на развитие информационных систем. Безусловно, она должна учитываться и при разработке систем ИИ, прежде всего в части структуризации приращения объема новых знаний в общем массиве накопленной информации.

Разработка, внедрение и эффективное применение систем ИИ в рамках управления холдингом ОАО «РЖД» является сложным процессом. При этом выбор технологий и технических решений должен учитывать специфику управленческих процессов в рамках функционирования системы управления РЖД, включающей органы и средства управления. Если такие подходы не будут соблюдаться, то самые емкие системы ИИ могут оказаться малоэффективными, если не будет обеспечена формализация системных и организационных вопросов, направленных на встраивание создаваемой системы ИИ в соответствующую организационную структуру, например, функционал департаментов, управлений и отделов.

Система искусственного интеллекта должна функционально дополнять уже работающие информационные системы и стать действенным инструментарием в составе аппарата управления, подразделений и служб ОАО «РЖД», обеспечивающих адекватную оценку работы, специалистов-аналитиков по анализу событий и ситуаций в целях выработки практических рекомендаций для должностных лиц, принимающих решения.

Экспоненциальный рост разнородных потоков информации в органах управления ОАО «РЖД» требует привлечения технологий сбора, хранения и обработки информации. Данные технологии представляют собой аппаратно-программные средства, реализующие набор функций по обобщению, систематизации и анализу информации. Что же касается работы специалистов-аналитиков, то они используют в своей работе не только данные программно-аппаратные средства, но и опыт и интуицию, влияющие на принятие решений.

При этом, как правило, в системе управления в процессе анализа участвуют: должностное лицо, принимающее решение, специалисты-аналитики и специалисты по информационным технологиям. От степени скоординированности и согласованности работы этих субъектов зависит не только качество предлагаемых управленческих решений, но и их целесообразность.

Работу специалистов-аналитиков следует рассматривать как часть цикла управления, который предусматривает сбор информации, анализ, подготовку вариантов решения для должностного лица, его реализацию и контроль его выполнения.

Оптимальный вариант взаимодействия реализуется с использованием последовательной цепочки с наличием обратных связей: должностное лицо, принимающее решение, — специалист-аналитик — ИТ-специалист. Более того, должностное лицо, принимающее решение, должно лично контролировать достоверную работу системы искусственного интеллекта.

Исходя из этого, возможными направлениями формализации подходов, определяющими технологическую основу ИИ в системе СУ РЖД, являются:

1. Формирование требований к различным компонентам системы ИИ (функциональные требования, требования к технологиям, требования к средствам и др.).

2. Определение требований к качеству информационного и лингвистического обеспечения.

3. Минимизация информационных и коммуникационных ресурсов за счет формализации и оптимизации учетно-контрольного процесса в системах ИИ.

Общим для указанных направлений является то, что создание организационно-методического обеспечения системы ИИ производится на основе следующих принципов, обеспечивающих формализацию процессов информационной поддержки деятельности должностных лиц СУ РЖД:

1. Использование вычислительных и телекоммуникационных ресурсов системы ИИ как технологической составляющей в системе управления.

2. Использование внешней среды (датчики-сенсоры) для сбора, обработки, передачи и предоставления информации.

3. Структуризация органов управления (департаментов, управлений и отделов) с интеграцией системы ИИ и распределением зон ответственности.

4. Информационная поддержка деятельности системы управления РЖД должна оцениваться нормированными показателями эффективности функционирования по своевременности предоставления информации с учетом надежности, достоверности, конфиденциальности, защищенности информации с минимизацией стоимостных показателей.

5. Формирование фактических показателей эффективности информационной поддержки деятельности СУ РЖД при использовании специализированного программного обеспечения для функционирования системы ИИ предусматривает сопоставление их с нормированными показателями и принятие при необходимости решений об их пересмотре и изменениях в процессах, средствах и технологиях.

6. Накопление и конфигурирование информации в виде единой ситуационной модели информационной поддержки, размещаемой в единой базе данных (БД). В данной модели должно быть предусмотрено отображение всех сущностей со своими взаимосвязями, которые оказывают помощь при принятии решения.

Процесс информационной поддержки принятия решений и его составных частей, представленный на рис. 2, должен осуществляться с помощью:

- формирования и структуризации баз данных;
- сканирования (мониторинга) объектов наблюдения, ИТ-инфраструктуры;
- инвентаризации инфраструктуры РЖД как организационной системы в целом и ИТ-инфраструктуры.

Данные процессы входят в контур управления системы искусственного интеллекта. Инициализация этих процессов осуществляется из контура управления деятельностью организационной системы ОАО «РЖД».

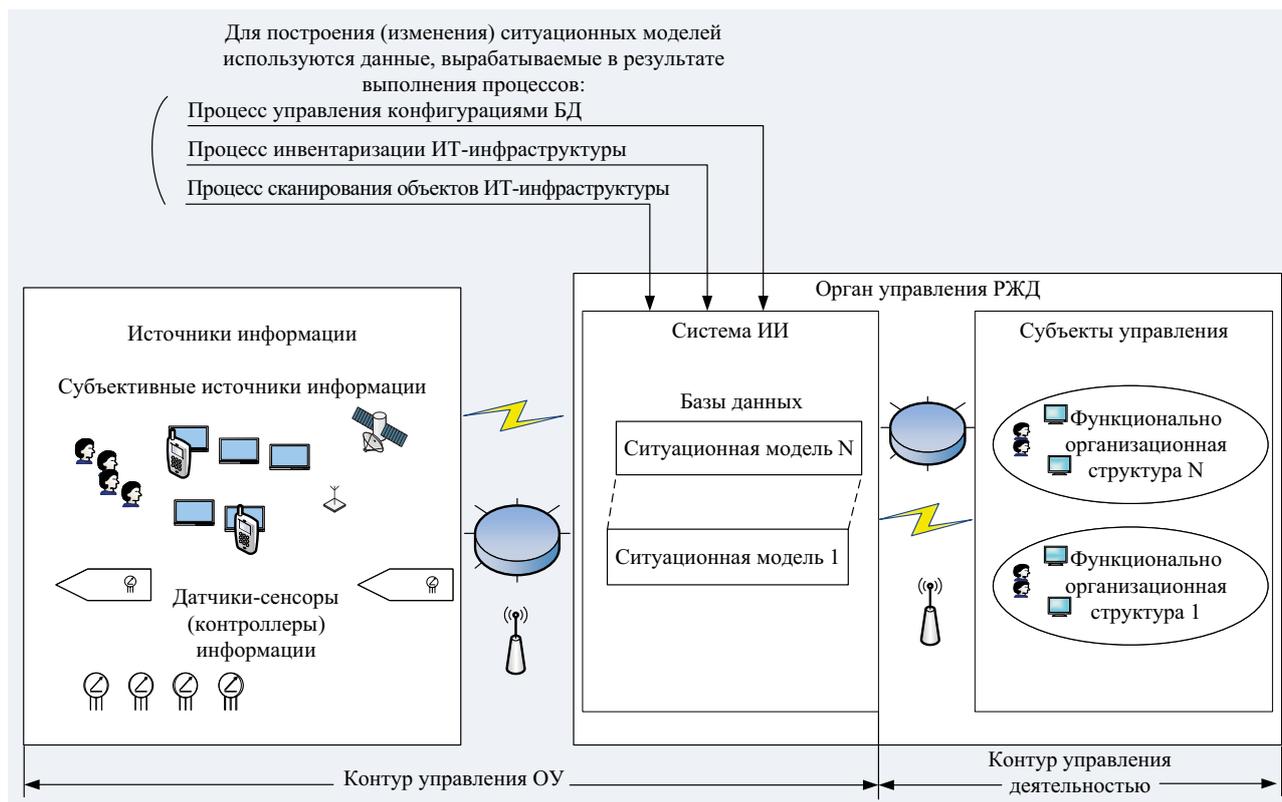


Рис. 2. Процесс информационной поддержки (вариант)

Для автоматизированной поддержки процесса актуализации информации используются, как правило, готовые изделия — программные комплексы (ПК) прикладного назначения, а также вновь разработанные ПК, интегрированные в систему ИИ.

Источниками информации являются субъекты (должностные лица, техника и подвижной состав, информационно-телекоммуникационное оборудование и др.), формирующие объективную обстановку, контроль деятельности всей инфраструктуры ОАО «РЖД» в целом, а также системы ИИ, использующие внешние источники информации в качестве датчиков, сенсоров, контроллеров и др.

Необходимо отметить, что в настоящее время при формировании комплексов, реализующих функции на новом качественном уровне, возникают трудности с реализацией проектов по созданию систем ИИ в заданные сроки. Поэтому разработчики данных систем, как правило, решают эти проблемы с использованием уже существующих образцов изделий аппаратных и программных комплексов и технологий ИИ различных производителей. Данный подход приводит к усложнению систематизации и унификации процессов внедрения ИИ, что определяет актуальность формализации задач интеграции искусственного интеллекта в систему управления ОАО «РЖД».

Анализ приведенных выше организационно-технических задач и направлений формализации подходов, обеспечивающих информационную поддержку

деятельности должностных лиц многоэлементной организационной структуры управления, показывает необходимость дальнейших исследований и уточнения данных подходов для формирования гармонизированной нормативной базы, определяющей этапы жизненного цикла систем искусственного интеллекта, такие как проектирование, тестирование, внедрение, сопровождение, эксплуатация.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 59276-2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2021.
2. ГОСТ Р 59277-2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. М.: Стандартинформ, 2021.
3. ГОСТ Р 59278-2020. Информационная поддержка жизненного цикла изделий. Интерактивные электронные технические руководства с применением технологий искусственного интеллекта и дополненной реальности. Общие сведения. М.: Стандартинформ, 2021.
4. ГОСТ Р 59237-2020. Платформа «Автодата». Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2021.
5. ГОСТ Р 59236-2020. Платформа «Автодата». Общие положения. М.: Стандартинформ, 2021.
6. ГОСТ Р 58776-2019. Средства мониторинга поведения и прогнозирования намерений людей. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2020.
7. ГОСТ Р 58777-2019. Воздушный транспорт. Аэропорты. Технические средства досмотра. Методика определения показателей качества распознавания незаконных вложений по теневым рентгеновским изображениям. М.: Стандартинформ, 2020.
8. ГОСТ Р 59385-2021. Информационные технологии. Искусственный интеллект. Ситуационная видеоаналитика. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2022.
9. ГОСТ Р 59391-2021. Средства мониторинга поведения и прогнозирования намерений людей. Аппаратно-программные средства с применением технологий искусственного интеллекта для колесных транспортных средств. Классификация, назначение, состав и характеристики средств фото- и видеofиксации. М.: Стандартинформ, 2021.
10. ГОСТ Р ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества. Требования.

Дата поступления: 15.09.2024

Решение о публикации: 23.10.2024

Контактная информация:

КАЗАКЕВИЧ Елена Владимировна — канд. техн. наук, доцент; kev-pgups@yandex.ru

БОГДАНОВ Александр Валентинович — канд. воен. наук, доцент; bog-saha@yandex.ru

Approaches to formalization of organizational and technological tasks of integration of artificial intelligence into the management system of JSC “Russian Railways”

E. V. Kazakevich¹, A. V. Bogdanov²

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

² Scientific Research Institute (VSI MTO of the Armed Forces of the Russian Federation) Military Academy of Logistics, 10a, Voznesenskaya nab., Saint Petersburg, 191123, Russia

For citation: *Kazakevich E. V., Bogdanov A. V.* Approaches to formalization of organizational and technological tasks of integrating of artificial intelligence into the management system of JSC “Russian Railways” // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 87–95. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-87-95

Abstract

Annotation: the issues of automation of the processes of collection, storage, transmission, analytical processing of information in the interests of improving the quality of management decisions in the railway management system, as well as the introduction of artificial intelligence systems in relation to the management bodies of Russian Railways are considered. **Purpose:** formalization of regulatory approaches for the implementation of artificial intelligence systems. **Methods:** harmonization, system analysis, simplex planning. **Results:** in the course of the research, approaches to the regulation of regulatory and legal measures have been identified that allow the development and improvement of NTDs based on unified approaches. **Practical significance:** the definition of approaches to the regulation of regulatory and legal measures will allow specialists involved in system design, development, implementation, operation of AI systems, developers of standards, as well as specialists of regulatory authorities, to improve the regulatory framework based on unified approaches, and developers of AI technologies will allow them to form new requirements for software and hardware being developed.

Keywords: artificial intelligence, knowledge base, management system, decision maker, decision support.

References

1. GOST R 59276-2020. Sistemy iskusstvennogo intellekta. Sposoby obespecheniya doveriya. Obshchie polozheniya. M.: Standartinform, 2021. (In Russian)
2. GOST R 59277-2020. Sistemy iskusstvennogo intellekta. Klassifikaciya sistem iskusstvennogo intellekta. M.: Standartinform, 2021. (In Russian)
3. GOST R 59278-2020. Informacionnaya podderzhka zhiznennogo cikla izdelij. Interaktivnye elektronnye tekhnicheskie rukovodstva s primeneniem tekhnologij iskusstvennogo intellekta i dopolnennoj real'nosti. Obshchie svedeniya. M.: Standartinform, 2021. (In Russian)
4. GOST R 59237-2020. Platforma “Avtodata”. Terminy i opredeleniya. M.: Standartinform, 2021. (In Russian)
5. GOST R 59236-2020. Platforma “Avtodata”. Obshchie polozheniya. M.: Standartinform, 2021. (In Russian)
6. GOST R 58776-2019. Sredstva monitoringa povedeniya i prognozirovaniya namerenij lyudej. Terminy i opredeleniya. M.: Standartinform, 2020. (In Russian)

7. GOST R 58777-2019. Vozdushnyj transport. Aeroporty. Tekhnicheskie sredstva dosmotra. Metodika opredeleniya pokazatelej kachestva raspoznavaniya nezakonnyh vlozhenij po tenevym rentgenovskim izobrazheniyam. M.: Standartinform, 2020. (In Russian)

8. GOST R 59385-2021. Informacionnye tekhnologii. Iskusstvennyj intellekt. Situacionnaya videoanalitika. Terminy i opredeleniya. M.: Standartinform, 2022. (In Russian)

9. GOST R 59391-2021. Sredstva monitoringa povedeniya i prognozirovaniya namerenij lyudej. Apparatno-programmnye sredstva s primeneniem tekhnologij iskusstvennogo intellekta dlya kolesnyh transportnyh sredstv. Klassifikaciya, naznachenie, sostav i harakteristiki sredstv foto- i videofiksacii. M.: Standartinform, 2021. (In Russian)

10. GOST R ISO 9001-2001. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya. (In Russian)

Received: 15.09.2024

Accepted: 23.10.2024

Author's information:

Elena V. KAZAKEVICH — Ph.D. of Engineering, Associate Professor; Kazakevich@pgups.ru

Alexander V. BOGDANOV — Ph.D. of Military, Associate Professor; bog-saha@yandex.ru

УДК 629.4.015

Влияние параметров железнодорожного подвижного состава и пути на динамику движения

Л. В. Мартыненко¹, Д. П. Кононов²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

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

Для цитирования: Мартыненко Л. В., Кононов Д. П. Влияние параметров подвижного состава и пути на динамику движения // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 96–102. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-96-102

Аннотация

Цель: повышение безопасности движения железнодорожного подвижного состава в кривых и на горно-перевальных участках пути путем исследования взаимодействия подвижного состава и пути. **Методы:** экспериментальные исследования колебаний вагонов с целью выявления дополнительных колебаний и отклонений в системе «колесо — рельс» при наличии отклонений пути в плане, таких как уровень рельсов, перекося рельсов, просадка, сужение и уширение колеи, рихтовка, перекося. Исследование влияния опасных сочетаний значений параметров подвижного состава и пути на возникновение аварийных ситуаций. **Результаты:** при анализе причин схода железнодорожного подвижного состава необходимо учитывать, помимо дефектов пути, еще и техническое состояние вагонов и локомотива. При этом нужно проводить комплексную оценку как подвижного состава, включая локомотив, так и пути. По результатам комплексной оценки осуществляется выбор опасных сочетаний отклонений от номинальных значений размеров вагона, локомотива и пути в зависимости от скорости движения. **Практическая значимость:** предлагаемые технические решения и рекомендации направлены на совершенствование использования грузовых вагонов с учетом рациональных условий их эксплуатации на горно-рельефной местности Восточно-Сибирской железной дороги. Внедрение данных предложений позволит снизить ежегодные расходы на ликвидацию последствий сходов — ремонт поврежденной инфраструктуры, вагонов, устройств сигнализации, централизации и блокировки, восстановление пути.

Ключевые слова: безопасность движения, колебания, динамика движения, горно-перевальные участки.

Безопасность на железнодорожном транспорте является приоритетной задачей для ОАО «РЖД». Это одно из основных условий нормальной работы железной дороги. Во время движения подвижной состав создает сложный комплекс разнонаправленных сил, приводящих к возникновению колебаний [1–4]. При этом система «подвижной состав — путь» является динамической, т. е. меняющейся во времени в процессе движения. При превышении колебаний вагонов выше определенного значения происходят сходы, которые могут привести к большим материальным потерям, загрязнению окружающей среды, а также человеческим жертвам [5, 6]. Поэтому исследование параметров железнодорожного подвижного состава, параметров пути и их взаимодействия является актуальной задачей [7–9].

При расследовании сходов был проведен комплекс экспериментальных исследований с целью выявления колебаний вагонов и отклонений в системе «колесо — рельс» (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Характеристика отклонений в системе «колесо — рельс»

Название отклонений в плане	Степень	Диапазон измерений, мм	Количество дефектов
Уровень	2	24	2
Перекося	2	20	13
Просадка	2	25	8
Сужение	2	6–15	7
Уширение	2	6–15	20
Рихтовка	2	16	1
Перекося	3	25	1

Отклонения размеров железнодорожного пути от номинального значения делятся по четырем степеням: самые опасные дефекты — 4-я степень, самые безопасные — 1-я степень. Зависят они от скорости движения подвижного состава. Дефекты 4-й степени могут привести к сходу.

На основании выявленных при анализе сходов подвижного состава дефектов пути были выполнены расчеты нагрузок, действующих в вагоне, в зависимости от скорости движения и коэффициента вертикальной динамики необрессоренных и обрессоренных частей вагона (табл. 2, где H_p — рамная сила; P_o — осевая нагрузка).

Как видно из табл. 2, при достижении скорости 60–80 км/ч значения коэффициентов вертикальной динамики необрессоренных и обрессоренных частей вагона становятся выше допустимых величин, в результате чего возникает дисбаланс колесной пары и происходит потеря устойчивости вагона.

Во время движения подвижного состава происходит набегание колеса первой колесной пары в тележке на рельс. При этом возникают боковые силы, достигающие 80 кН [10]. Несмотря на то что вторая колесная пара в данном случае не набегает на рельсовую нить, силы трения в подрельсовом основании вызывают асимметрию отжатий [11]. Из-за наличия зазоров между рельсом и подкладками, а также сухого трения рельсы после прохода экипажа не возвращаются полностью в исходное положение [12]. Это приводит к изменению формы кривой изгиба рельсовой нити. Передний ее фронт становится круче, возрастает нагрузка на крепежные элементы, расположенные в непосредственной близости к месту набегания колесной пары [13, 14].

ТАБЛИЦА 2. Показатели динамики обрессоренных и необрессоренных частей вагона в кривой радиусом 300–650 м

Показатель	Нормативное значение	Тип вагона	Скорость, км/ч					
			44	50	55	65	77	78
H_p / P_o , не более	0,40	крытый 11-280	0,15					
		полувагон 12-127		0,16				
		крытый 11-066-04			0,18			
		полувагон 12-132-02				0,21		
		цистерна 15-869					0,24	
		цистерна 15-1547						0,25
Коэффициент вертикальной динамики необрессоренных частей, не более	0,98	крытый 11-280	0,67					
		полувагон 12-127		0,76				
		крытый 11-066-04			0,84			
		полувагон 12-132-02				0,8		
		цистерна 15-869					1,14	
		цистерна 15-1547						1,16
Коэффициент вертикальной динамики обрессоренных частей, не более	0,75	крытый 11-280	0,6					
		полувагон 12-127		0,67				
		крытый 11-066-04			0,74			
		полувагон 12-132-02				0,7		
		цистерна 15-869					1,04	
		цистерна 15-1547						1,06

Помимо дефектов пути, при анализе причин схода необходимо учитывать еще и техническое состояние вагонов и локомотива. При этом нужно проводить комплексную оценку как подвижного состава, включая локомотив, так и пути. По результатам комплексной оценки осуществляется выбор опасных сочетаний отклонений от номинальных значений размеров вагона, локомотива и пути в зависимости от скорости движения. Дело в том, что при одной скорости движения подвижного состава может быть одно неблагоприятное сочетание, а при другой скорости — другое. Это позволяет в дальнейшем назначать режим движения подвижного состава на определенном участке пути с точки зрения наибольшей безопасности.

По результатам расчетов и расследования сходов грузовых вагонов можно сделать следующие выводы:

1) сочетание таких дефектов, как возвышение наружного рельса с разницей более 10 мм, просадка пути (15 мм и выше) и превышение крена кузова (более 8°), при скоростях движения состава более 40 км/ч является одной из основных причин возникновения аварийных ситуаций на горно-перевальных участках пути;

2) сочетание перекоса и заклинивания автосцепки со снижением устойчивости колесной пары на рельсах на горно-перевальных участках пути, например, при отклонении от нормативного угла наклона образующей гребня колеса, является одной из частых причин схода;

3) к опасным сочетаниям отклонений следует отнести сокращение длительности повторного торможения на затяжных спусках, что может привести к неполной подзарядке тормозной магистрали и, соответственно, к аварийной ситуации (для нормальной работы тормозной системы необходимо выдерживать между торможениями время не менее 60 с).

Библиографический список

1. Мямлин С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. Днепропетровск: Новая идеология, 2002. 240 с.
2. Тюньков В. В., Бузунова В. С., Пашков А. Е. Технологический алгоритм в перспективном конструктивном развитии железнодорожных грузовых вагонов колеи 1520 мм // Молодая наука Сибири. 2020. № 4(10). С. 18–26.
3. Грачева Л. О., Певзнер В. О., Анисимов П. С. Показатели динамики и воздействия на путь грузовых четырехосных вагонов при различных износах тележек и отступлениях от норм содержания в прямых участках пути // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Вып. 549. М.: Транспорт, 1976. С. 4–25.
4. Ромен Ю. С., Николаев В. Е. Исследование влияния детерминированных неровностей пути в плане на уровень боковых сил при движении грузового вагона // Проблемы механики железнодорожного транспорта. Киев: Наукова думка, 1980. С. 40–42.
5. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 560 с.

6. Ершков О.П. Расчет рельса на действие боковых сил в кривых // Тр. ЦНИИ МПС. Вып. 192. М.: Трансжелдориздат, 1960. С. 5–58.
7. Желнин Г.Г., Певзнер В.О., Шинкарев Б.С. Исследование зависимостей между показателями динамики подвижного состава и воздействия его на путь // Тр. ВНИИЖТ. Вып. 542. М.: Транспорт, 1975. С. 84–92.
8. Черняк Ю.В., Матвиенко А.С. Определение силы тяги локомотива при производстве тягово-энергетических испытаний // Сборник научных трудов ДонИЖТ. 2007. № 12. С. 116–126.
9. Лукин В.В., Анисимов В.Н., Котуранов В.Н. Конструирование и расчет вагонов: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. 688 с.
10. Кузович В.М. Динамическая нагруженность специализированных вагонов в криволинейных участках пути: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2010. 211 с.
11. Кудрявцева Н.Н. Динамические нагрузки ходовых частей грузовых вагонов // Тр. ВНИИЖТ. Вып. 572. М.: Транспорт, 1977. 144 с.
12. Доронин И.С. Расчет шейки оси колесной пары на продольную нагрузку // Вестник ВНИИЖТ, 1978. С. 33–34.
13. Кудрявцев Н.Н. Исследования динамики неподрессоренных масс вагонов // Тр. ВНИИЖТ. Вып. 287. М.: Транспорт, 1965. 168 с.
14. Скалов А.Д., Коваль В.А. Методика исследования вертикальных и боковых сил при износных испытаниях рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 1980. № 6. 216 с.

Дата поступления: 21.09.2024

Решение о публикации: 23.10.2024

Контактная информация:

МАРТЫНЕНКО Любовь Викторовна — соискатель; liuba.martinenko@yandex.ru

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — докт. техн. наук, доцент; d_kononov@mail.ru

Influence of railway rolling stock and track parameters on traffic dynamics

L. V. Martynenko¹, D. P. Kononov²

¹ Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia

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

For citation: *Martynenko L. V., Kononov D. P. Influence of railway rolling stock and track parameters on traffic dynamics // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 96–102. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-96-102*

Abstract

Purpose: improving the safety of railway rolling stock in curves and on mountain-pass sections of the track by studying the interaction of rolling stock and track. **Methods:** experimental studies of wagon vibrations in order to identify additional fluctuations and deviations in the wheel-rail system in the presence of track deviations in the plan, such as rail level, rail misalignment, subsidence, narrowing and widening of the track, straightening, skew. Investigation of the influence of dangerous combinations of rolling stock and track parameter values on the occurrence of emergency situations. **Results:** when analyzing the causes of the derailment of railway rolling stock, it is necessary to take into account, in addition to track defects, the technical condition of the wagons and the locomotive. At the same time, it is necessary to carry out a comprehensive assessment of both the rolling stock, including the locomotive, and the track. Based on the results of a comprehensive assessment, a selection of dangerous combinations of deviations from the nominal values of the dimensions of the car, locomotive and track is carried out, depending on the speed of movement. **Practical importance:** the proposed technical solutions and recommendations are aimed at improving the use of freight wagons, taking into account the rational conditions of their operation in the mountainous terrain of the East Siberian railway. The implementation of these proposals will reduce the annual costs of eliminating the consequences of gatherings: damaged infrastructure (repair of wagons, restoration of tracks, alarm, centralization and blocking devices, work of track equipment, etc.).

Keywords: traffic safety, fluctuations, traffic dynamics, mountain pass sections.

References

1. Myamlin S. V. Modelirovanie dinamiki rel'sovyh ekipazhej. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya, 2002. 240 s. (In Russian)
2. Tyun'kov V. V., Buzunova V. S., Pashkov A. E. Tekhnologicheskij algoritm v perspektivnom konstruktivnom razvitii zheleznodorozhnyh gruzovyh vagonov kolei 1520 mm // Molodaya nauka Sibiri. 2020. No. 4(10). S. 18–26. (In Russian)
3. Gracheva L. O., Pevzner V. O., Anisimov P. S. Pokazateli dinamiki i vozdejstviya na put' gruzovyh chetyrekhosnyh vagonov pri razlichnyh iznosah telezhek i otstupleniyah ot norm sodержaniya v pryamyh uchastkah puti // Sb. nauch. tr. VNIIZhT. Vyp. 549. M.: Transport, 1976. S. 4–25. (In Russian)
4. Romen Yu. S., Nikolaev V. E. Issledovanie vliyaniya determinirovannyh nerovnostej putiv plane na uroven' bokovyh sil pri dvizhenii gruzovogo vagona // Problemy mekhaniki zheleznodorozhnogo transporta. Kiev: Naukova dumka, 1980. S. 40–42. (In Russian)
5. Verigo M. F., Kogan A. Ya. Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava. M.: Transport, 1986. 560 s. (In Russian)
6. Ershkov O. P. Raschet rel'sa na dejstvie bokovyh sil v krivyh // Tr. CNII MPS. Vyp. 192. M.: Transzheldorizdat, 1960. S. 5–58. (In Russian)
7. Zhelnin G. G., Pevzner V. O., Shinkarev B. S. Issledovanie zavisimostej mezhdru pokazatelyami dinamiki podvizhnogo sostava i vozdejstviya ego na put' // Tr. VNIIZhT. Vyp. 542. M.: Transport, 1975. S. 84–92. (In Russian)
8. Chernyak Yu. V., Matvienko A. S. Opredelenie sily tyagi lokomotiva pri proizvodstve tyagovo-energeticheskikh ispytaniy // Sbornik nauchny`x trudov DonIZhT. 2007. No. 12. S. 116–126. (In Russian)
9. Lukin V. V., Anisimov V. N., Koturanov V. N. Konstruirovaniye i raschet vagonov: uchebnyk. 2-e izd., pererab. i dop. M.: FGOU "Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte", 2011. 688 s. (In Russian)

10. Kuzovich V.M. Dinamicheskaya nagruzhennost' specializirovannyh vagonov v krivolinejnyh uchastkah puti: diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 2010. 211 s. (In Russian)
11. Kudryavceva N.N. Dinamicheskie nagruzki hodovyh chastej gruzovyh vagonov // Tr. VNIIZhT. Vyp. 572. M.: Transport, 1977. 144 s. (In Russian)
12. Doronin I.S. Raschet shejki osi kolesnoj pary na prodol'nuyu nagruzku // Vestnik VNIIZhT, 1978. S. 33–34. (In Russian)
13. Kudryavcev N.N. Issledovaniya dinamiki nepodressorenyh mass vagonov // Tr. VNIIZhT. Vyp. 287. M.: Transport, 1965. 168 s. (In Russian)
14. Skalov A.D., Koval' V.A. Metodika issledovaniya vertikal'nyh i bokovyh sil pri iznosnyh ispytaniyah rel'sov // Vestnik VNIIZhT. 1980. No. 6. 216 s. (In Russian)

Received: 21.09.2024

Accepted: 23.10.2024

Author's information:

Lyubov' V. MARTYNENKO — the applicant; liuba.martinenko@yandex.ru,

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

УДК 53.089.6

Дистанционная калибровка динамических вагонных весов

Э. Ю. Чистяков, А. Ю. Павлов, А. Г. Нуриев, В. В. Афанасьев, Я. А. Гренадер

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

Для цитирования: Чистяков Э. Ю., Павлов А. Ю., Нуриев А. Г., Афанасьев В. В., Гренадер Я. А. Дистанционная калибровка динамических вагонных весов // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 103–111. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-103-111

Аннотация

Метрологическое обслуживание средств измерений направлено на обеспечение единства измерений. Оно позволяет достичь требуемой точности измеряемых физических величин, определить поправки к показаниям средств измерений и оценить погрешность. С развитием научно-технического прогресса достижение точности обеспечивается более совершенными и простыми методами. Дистанционная калибровка динамических вагонных весов рассматривает актуальные вопросы применения дистанционных методов калибровки в сфере измерений на транспорте. Анализ преимуществ дистанционной калибровки по сравнению с традиционным метрологическим обслуживанием подчеркивает экономическую эффективность и сокращает временные затраты. В статье описан процесс измерений с применением дистанционных методов контроля, использование которого позволит внедрить дистанционную калибровку динамических вагонных весов в железнодорожную отрасль. **Цель:** описать возможность проведения дистанционной калибровки динамических вагонных весов. **Методы:** проведение эксперимента дистанционной калибровки динамических вагонных весов с использованием интернета и специального программного обеспечения, весовой программы и программ связи. **Результаты:** определена возможность проведения дистанционной калибровки динамических вагонных весов, описаны необходимые для работы программы, представлены преимущества и недостатки. **Практическая значимость:** определена возможность внедрения дистанционной калибровки динамических вагонных весов, которая позволит снизить кадровые, временные и финансовые затраты на метрологическое обслуживание — периодическую калибровку.

Ключевые слова: дистанционная калибровка, обеспечение единства измерений, динамические вагонные весы, программное обеспечение, оператор.

Введение

Современный прогресс в области компьютерных технологий влечет за собой изменения или расширение принципов работы в метрологии. В Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года одним из направлений развития является повышение уровня информатизации и автоматизации функционирования системы обеспечения единства измерений, включая выполняемые работы и услуги [12]. В последние годы все большую популярность завоевывает метод дистанционной калибровки. Данный метод дает возможность проводить калибровку удаленно, без необходимости физического присутствия на объекте. Это позволяет не только экономить время и ресурсы, но и повысить

эффективность работы системы, улучшая качество управления и снижая влияние рисков производственного процесса на человека.

Динамические вагонные весы предназначены для взвешивания подвижных составов в движении. Они способны определять массу как каждого вагона в отдельности, так и всего состава в целом.

В данной работе рассматривается процесс дистанционной калибровки динамических вагонных весов (далее — ДКДВВ). Описываются используемые методы и инструменты, а также преимущества такой калибровки.

Описание динамических вагонных весов

В соответствии с областью аккредитации в Октябрьском центре метрологии — филиале ОАО «РЖД» (далее — ОЦМ) — производится калибровка различных типов динамических весов производства ИЦ АСИ Кемерово: ВТВ-Д, РТВ-Д, ВЕСТА-СД и др. Местоположение весов и их количество приведены на рис. 1 [11].

Они предназначены для потележного и поосного взвешивания груженых и порожних железнодорожных вагонов в движении, а весы «ВЕСТА-СД», помимо этого, способны измерять массу вагонов в статическом режиме. Калибровка проводится согласно системе калибровки средств измерений в ОАО «РЖД». В работе будет рассмотрено устройство динамических вагонных весов на примере весов ВТВ-Д (далее — весы). На рис. 2 изображен общий вид весов.

Принцип работы весов основан на преобразовании механической нагрузки в электрический сигнал и последующем его изменении в цифровой. Результаты измерения выводятся на устройства для их отображения и/или регистрации.

Весы состоят из следующих составляющих: грузоприемное устройство (далее — ГПУ), весоизмерительные датчики, подключаемые к программно-техническому комплексу (далее — ПТК). ПТК обрабатывает данные и отображает результаты измерений. Весоизмерительные датчики передают сигнал ПТК с помощью устройства обработки аналоговых данных (далее — УОАД). В качестве УОАД используется весоизмерительный прибор ПВ-15 (рис. 3).

ПВ-15 представляет собой электронное устройство, состоящее из стабилизированного источника питания датчиков, аналого-цифрового преобразователя, процессора обработки данных, клавиатуры управления, дисплея и интерфейсов связи.

Схема устройства весов продемонстрирована на рис. 4.

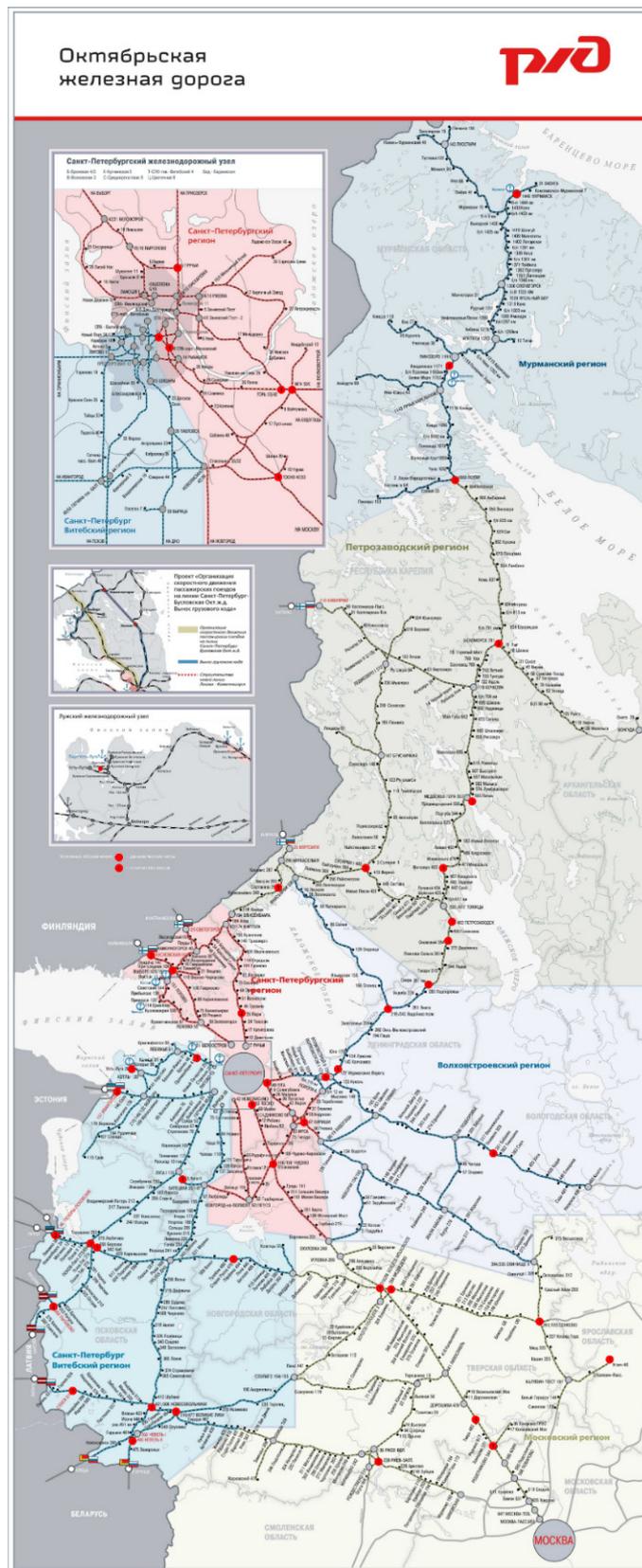


Рис. 1. Схема расположения динамических вагонных весов на Октябрьской железной дороге (источник: https://www.tourister.ru/world/europe/russia/map?hl=ru_RU, редакторы: А. Г. Нуриев и Я. А. Гренадер)



Рис. 2. Общий вид динамических весов (фото А. Ю. Павлова)



Рис. 3. Весоизмерительный прибор ПВ-15
(источник: <https://icasi.ru/docs/documentation/>)

В весах предусмотрены следующие устройства:

- первоначальной установки нуля;
- автоматической установки нуля;
- распознавания вагонов.

Программное обеспечение (далее — ПО) УОАД является встроенным. Оно используется в закрепленной аппаратной части с определенными программными средствами. В УОАД установлена защита от несанкционированного доступа к настройкам и информации об измерениях, которая обеспечивает невозможность изменения ПО без специального оборудования производителя.

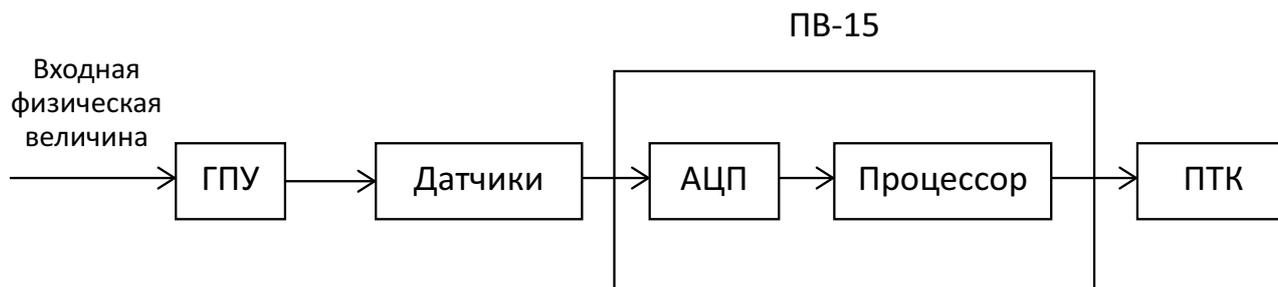


Рис. 4. Схема устройства весов

ПО позволяет осуществлять:

- 1) отображение результатов взвешивания (массы вагона и поезда);
- 2) привязку результатов взвешивания к дате и времени и их хранение в защищенной локальной базе данных;
- 3) автоматическое определение скорости движения каждого взвешиваемого вагона.

Описание процесса дистанционной калибровки весов

Калибровка весов осуществляется в соответствии с методикой калибровки, разработанной в ОЦМ. Перед калибровкой требуется собрать испытательный состав, состоящий из 5–10 порожних и груженых вагонов, включая контрольный (весоповерочный) вагон (далее — ВПВ). Процесс калибровки состоит из четырех этапов:

1. Внешний осмотр. Перед работой необходимо удостовериться в отсутствии каких-либо повреждений весов, в наличии всех комплектующих, в наличии и соответствии маркировке на весах используемой документации. Также проверяется состояние подъездных путей к весам.

2. Опробование. На этом этапе проверяется работоспособность весов: включение весов, установление нулевого значения, взвешивание в статическом режиме и в движении.

3. Определение массы ВПВ на контрольных весах в статическом режиме с расцепкой.

4. Определение метрологических характеристик. Испытательный состав проходит через калибруемые весы с двух сторон не менее 5 раз на каждое направление для получения 60 измерений масс вагонов. Скорость движения состава не должна выходить за пределы, установленные в руководстве по эксплуатации весов (в случае наших весов — не менее 3 км/ч и не более 10 км/ч). По полученным результатам измерений рассчитываются метрологические характеристики: относительная погрешность весов, сходимости результатов измерений, размах показаний, среднее квадратическое отклонение и неопределенность.

Результаты калибровки сохраняются в весовой программе, вносятся в защищенный файл Excel, и выписывается сертификат калибровки, который говорит клиенту о годности весов и их точных показаниях.

Для выполнения ДКДВВ не требуется выезд калибровщика на объект. Все, что необходимо для выполнения внешнего осмотра, проверки техдокументации, подключения и опробования весов, — это наличие видеосвязи любыми способами, не запрещенными законодательством РФ со стороны как владельца (балансодержателя) весов, так и калибровщика. Далее калибровщик путем подключения к ПТК посредством интернета или интранета со своего рабочего места, оборудованного персональным компьютером, сможет контролировать и выполнять следующие операции:

- 1) проведение процедуры калибровки;
- 2) сохранение резервных копий баз данных весов;
- 3) диагностирование работы ПТК и составных частей весов;
- 4) наблюдение за работой ПТК в эксплуатации, своевременное реагирование на какие-либо отклонения от нормы, а в случае сбоя в работе — установление причины и оказание технической поддержки обслуживающему персоналу владельца весов;
- 5) наблюдение за просадкой ГПУ по сигналам файлов.

Заключение

Метод ДКДВВ представляет собой важный шаг в оптимизации метрологического обеспечения средств измерений, применяемых на железной дороге. Он имеет ряд неоспоримых преимуществ: снижение времени на проведение калибровки, рост доходной части бюджета центра метрологии за счет увеличения объема выполняемых работ и снижения их себестоимости, исключение затрат на командировочные выплаты калибровщику. Дистанционная калибровка отвечает требованиям современной логистики, стремящейся к повышению эффективности и оптимизации затрат. Она позволяет свести к минимуму простои и сделать процесс калибровки более оперативным, что в итоге приводит к увеличению производительности и рентабельности бизнеса.

Недостатками ДКДВВ являются возможная неустойчивая связь между оператором и калибровщиком и необходимость адаптации сотрудников, участвующих в калибровке.

В будущем ожидается дальнейшее развитие технологии дистанционной калибровки, которое позволит охватить более широкий спектр измерительных приборов и отраслей промышленности.

Библиографический список

1. Об обеспечении единства измерений: федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ // Российская газета. 2008. № 140.
2. СТО РЖД 06.001-2014. Система калибровки средств измерений в ОАО «РЖД». Основные положения. 2014. 22 с.
3. СТО РЖД 06.002-2014. Система калибровки средств измерений в открытом акционерном обществе «Российские железные дороги». Порядок аккредитации на компетентность в области калибровки средств измерений и предоставления права выполнения калибровочных работ в Системе калибровки средств измерений в ОАО «РЖД». 2014. 46 с.
4. СТО РЖД 06.003-2014. Система калибровки средств измерений в открытом акционерном обществе «Российские железные дороги». Калибровочные клейма. 2014. 20 с.
5. Описание типа средства измерений // Весы вагонные для статического взвешивания и взвешивания в движении вагонов и поездов РТВ. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/69638-17-rtv-79068> (дата обращения: 10.09.2024).
6. МК ОКТ/ДЦМ-03.10.013. Весы вагонные для взвешивания железнодорожных вагонов и составов из них. Методика калибровки. СПб., 2022. 15 с.
7. ГОСТ Р 8.598-2003. Весы для взвешивания железнодорожных транспортных средств в движении. Методика поверки. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032122> (дата обращения: 10.09.2024).
8. Дистанционная калибровка шаблонов в районах Крайнего Севера / Э.Ю. Чистяков [и др.]. URL: <http://izvestiapgups.org/archive/2023/012023.html> (дата обращения: 10.09.2024).
9. ГОСТ 8.647-2015. Весы вагонные автоматические. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200135535?ysclid=lwzhmwofjd87724741> (дата обращения: 10.09.2024).
10. РМГ 74-2004. ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. URL: <https://gostinform.ru/normativnye-dokumenty-po-texnicheskomu-regulirovaniyu-i-metrologii/rmg-74-2004-obj54457.html> (дата обращения: 10.09.2024).
11. Полетаев А. В., Нуриев А. Г., Гренадер Я. А. Оптимизация метрологического обслуживания динамических вагонных весов. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/distsionnaya-kalibrovka-shablonov-v-rayonah-kraynego-severa> (дата обращения: 10.09.2024).
12. О стратегии обеспечения единства измерений в РФ до 2025 года: распоряжение Правительства РФ от 19.04.2017 № 737-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/JZrtqXCDWoE02JAU1OSXkdi0OIXNB21B.pdf> (дата обращения: 10.09.2024).

Дата поступления: 30.10.2024

Решение о публикации: 28.11.2024

Контактная информация:

ЧИСТЯКОВ Эдуард Юрьевич — старший преподаватель; chistyakov@pgups.ru

ПАВЛОВ Алексей Юрьевич — студент; zedasmo3@gmail.com

НУРИЕВ Али Гасаналиевич — студент; informatiks20@gmail.com

АФАНАСЬЕВ Вячеслав Вадимович — студент; g5sv11ac9@gmail.com

ГРЕНАДЕР Яна Алексеевна — студент; yana.grenader@yandex.ru

Remote calibration of dynamic wagon scales

E. Y. Chistyakov, A. Y. Pavlov, A. G. Nuriev, V. V. Afanasyev, Ya. A. Grenadier

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

For citation: Chistyakov E. Y., Pavlov A. Y., Nuriev A. G., Afanasyev V. V., Grenadier Ya. A. Remote calibration of dynamic wagon scales // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 103–111. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-103-111

Abstract

Metrological maintenance of measuring instruments is aimed at ensuring the uniformity of measurements. It allows you to achieve the required accuracy of the measured physical quantities, determine corrections to the readings of measuring instruments and estimate the error. With the development of scientific and technological progress, the achievement of accuracy is ensured by more advanced and simple methods. Remote calibration of dynamic wagon scales examines the current issues of the application of remote calibration methods in the field of measurements in transport. The analysis of the advantages of remote calibration in comparison with traditional metrological services emphasizes economic efficiency and reduces time costs. The article describes the measurement process using remote control methods, the use of which will allow the introduction of remote calibration of dynamic wagon scales in the railway industry. **Purpose:** to describe the possibility of remote calibration of dynamic wagon scales. **Methods:** conducting an experiment of remote calibration of dynamic wagon scales using the global Internet and special software, a weighing program and communication programs. **Results:** the possibility of remote calibration of dynamic wagon scales was determined, the necessary programs for operation were described, advantages and disadvantages were presented. **Practical importance:** the possibility of introducing remote calibration of dynamic wagon scales has been determined, which will reduce personnel time and financial costs for metrological maintenance and periodic calibration.

Keywords: remote calibration, ensuring the uniformity of measurements, dynamic wagon scales, software, operator.

References

1. Ob obespechenii edinstva izmerenij: federal'nyj zakon ot 26.06.2008 № 102-FZ // Rossijskaya gazeta. 2008. № 140. (In Russian)
2. STO RZhD 06.001-2014. Sistema kalibrovki sredstv izmerenij v OAO “RZhD”. Osnovnye polozheniya. 2014. 22 s. (In Russian)
3. STO RZhD 06.002-2014. Sistema kalibrovki sredstv izmerenij v otkrytom akcionernom obshchestve “Rossijskie zheleznye dorogi”. Poryadok akkreditacii na kompetentnost' v oblasti kalibrovki sredstv izmerenij i predostavleniya prava vypolneniya kalibrovochnyh rabot v Sisteme kalibrovki sredstv izmerenij v OAO “RZhD”. 2014. 46 s. (In Russian)

4. STO RZhD 06.003–2014. Sistema kalibrovki sredstv izmerenij v otkrytom akcionernom obshchestve “Rossijskie zheleznye dorogi”. Kalibrovochnye klejma. 2014. 20 s. (In Russian)
5. Opisanie tipa sredstva izmerenij // Vesny vagonnyye dlya staticheskogo vzveshivaniya i vzveshivaniya v dvizhenii vagonov i poezdov RTV. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/69638-17-rtv-79068> (data obrashcheniya: 10.09.2024). (In Russian)
6. MK OKT/DCM-03.10.013. Vesny vagonnyye dlya vzveshivaniya zheleznodorozhnyh vagonov i sostavov iz nih. metodika kalibrovki. SPb., 2022. 15 s. (In Russian)
7. GOST R 8.598-2003. Vesny dlya vzveshivaniya zheleznodorozhnyh transportnyh sredstv v dvizhenii. Metodika poverki. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032122> (data obrashcheniya: 10.09.2024). (In Russian)
8. Distantsionnaya kalibrovka shablonov v rayonah Krajnego Severa / E. Yu. Chistyakov [i dr.]. URL: <http://izvestiapgups.org/archive/2023/012023.html> (data obrashcheniya: 10.09.2024). (In Russian)
9. GOST 8.647-2015. Vesny vagonnyye avtomaticheskie. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200135535?ysclid=lwzhmwofjd87724741> (data obrashcheniya: 10.09.2024). (In Russian)
10. RMG 74-2004. GSI. Metody opredeleniya mezhpoverochnykh i mezhkalibrovochnykh intervalov sredstv izmerenij. URL: <https://gostinform.ru/normativnye-dokumenty-po-texnicheskomu-regulirovaniyu-i-metrologii/rmg-74-2004-obj54457.html> (data obrashcheniya 10.09.2024). (In Russian)
11. Poletaev A. V., Nuriev A. G., Grenader Ya. A. Optimizatsiya metrologicheskogo obsluzhivaniya dinamicheskikh vagonnyh vesov . URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/distantsionnaya-kalibrovka-shablonov-v-rayonah-krajnego-severa> (data obrashcheniya: 10.09.2024). (In Russian)
12. O strategii obespecheniya edinstva izmerenij v RF do 2025 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 19.04.2017 № 737-r. URL: <http://static.government.ru/media/files/JZrtqXCDWoE02JAU-1OSXkdi0OIXNB21B.pdf> (data obrashcheniya: 10.09.2024). (In Russian)

Received: 30.10.2024

Acctpted: 28.11.2024

Author’s information:

Eduard Yu. CHISTYAKOV — Senior Lecturer; chistyakov@pgups.ru

Alexey Yu. PAVLOV — Student; zedasmo3@gmail.com

Ali G. NURIEV — Student; informatiks20@gmail.com

Vyacheslav V. AFANASYEV — Student; g5sv11ac9@gmail.com

Yana A. GRENADIER — Student; yana.grenader@yandex.ru

УДК 621.332.3

Совершенствование метода расчета цепных контактных подвесок электрифицированных железных дорог

А. В. Агунов, Д. Д. Иванов

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

Для цитирования: Агунов А. В., Иванов Д. Д. Совершенствование метода расчета цепных контактных подвесок электрифицированных железных дорог // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 112–122. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-112-122

Аннотация

Цель: произвести анализ, направленный на выявление недостатков существующей методики расчета цепных контактных подвесок электрифицированных железных дорог в экстремальных температурных условиях. Показать необходимость внедрения современных методов расчета на основе математического моделирования с применением средств автоматического проектирования. **Методы:** разработка МКЭ-модели с применением программного комплекса ANSYS Workbench, позволяющей определять натяжение несущего троса контактной подвески с учетом нагрева от протекающего тока в условиях тяжеловесного движения. Сравнение результатов расчета по существующей методике и по разработанной МКЭ-модели. **Результаты:** проведенный анализ показал, что в текущем подходе не учитываются важные физические факторы, что может приводить к потенциальным ошибкам как в проектировании, так и в эксплуатации контактной сети. Результаты электротепломеханического расчета на разработанной МКЭ-модели выявляют несоответствия в определении температуры нагрева и натяжения несущего троса полукompенсированной контактной подвески, что указывает на необходимость пересмотра ключевых параметров, используемых в существующей методике расчета. **Практическая значимость:** разница в результатах расчетов показывает важность внедрения современных методик определения необходимых для проектирования и эксплуатации параметров и подтверждает актуальность исследования, в особенности в условиях организации тяжеловесного движения поездов. МКЭ-модели, примененные в исследовании, обладают широким расчетным функционалом и возможностью задания различных граничных условий, таких как температура окружающего воздуха, величина тока, протекающего по проводам контактной сети, и натяжение проводов. Эти модели могут быть эффективно использованы в проектировании и научной деятельности специалистами различных областей.

Ключевые слова: контактная сеть, контактная подвеска, несущий трос, режим максимальной температуры, температура нагрева провода, системы тягового электроснабжения.

Введение

Контактная подвеска электрифицированных железных дорог является частью тяговой сети и имеет основную особенность по сравнению с другими воздушными линиями — отсутствие возможности резервирования. Ввиду этого к ней предъявляются особые требования в части обеспечения надежного токосъема.

При расчетах проводов контактной сети рассматривают основные и особые (обрывы проводов, падение одной консоли или сейсмические воздействия)

сочетания нагрузок. К основным, как правило, относят следующие нагрузки и их сочетания [1]:

- наибольшее для заданного района давление ветра (гололед отсутствует);
- отложение гололеда на проводах и конструкциях;
- давление ветра на покрытые гололедом провода и конструкции;
- минимальная температура воздуха (ветер и гололед отсутствуют).

Стоит отметить, что для полукompенсированных цепных контактных подвесок большое влияние с точки зрения вертикальных перемещений оказывает режим максимальной температуры с учетом нагрева проводов от солнечной радиации и протекающих токов. В таком режиме у медного несущего троса значительно уменьшается натяжение ввиду основного свойства металла расширяться при увеличении тепловых нагрузок, что может привести к значительному нарушению вертикального габарита контактной подвески.

Анализ существующей методики расчета цепных контактных подвесок

Сегодня основные механические расчеты проводов цепной контактной подвески приведены в работе А. В. Фрайфельда и Г. Н. Брода [2]. В своих трудах авторы приводят методику определения натяжения несущего троса обычной полукompенсированной контактной подвески для различных режимов работы в процентном соотношении от максимального. Так, например, натяжение несущего троса при наибольшем для заданного района давлении ветра определяется как 70% от максимального натяжения. Для режима, при котором контактные провода имеют беспровесное положение, натяжение несущего троса определяется как 80% от максимального.

Температура в режиме беспровесного положения [1]:

$$t_0 = t_r - t', \quad (1)$$

где t_r — среднегодовая температура воздуха, °С [3];

t' — поправка, равная 20–25 °С при одном и 15–20 °С при двух контактных проводах.

Температура беспровесного положения контактного провода более точно определяется исходя из следующих соотношений:

– если значение $t_r \leq t_n$ (после округления до 5 °С), то $t' = 20$ °С при одном и $t' = 15$ °С при двух контактных проводах;

– если значение $t_r > t_n$, то $t' = 25$ °С при одном и $t' = 20$ °С при двух контактных проводах.

Здесь t_n — средняя нормативная температура воздуха:

$$t_n = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2}, \quad (2)$$

где t_{\max} — максимальная температура проводов с учетом нагрева солнечной радиацией, °С;

t_{\min} — абсолютная минимальная температура воздуха, °С.

При проектировании контактной подвески главных путей, находящихся на балансе ОАО «РЖД», применяется несущий трос только из медного провода сечением 120 мм² в соответствии с письмом [4]. Согласно [1, табл. 3.2], наибольшее натяжение несущий трос М-120 имеет в режиме минимальной температуры и составляет 2000 даН.

Задаваясь несколькими значениями натяжений несущего троса для различных сочетаний нагрузок и воспользовавшись методом линейной интерполяции, авторы предлагают найти значения натяжений несущего троса при различных температурных нагрузках. Сегодня данная методика расчета натяжений несущего троса используется при проектировании контактной сети в различных проектных институтах.

Стоит отметить, что на данный момент существующие типовые проекты КС-160, КС-200, КС-250 и КС-400 ограничивают максимальную температуру нагрева проводов до 80 °С. Это связано с ограничениями по температурным перемещениям проводов, как горизонтальным, так и вертикальным. Поэтому максимальную температуру при расчетах с учетом нагрева от протекающего тока обычно принимают именно 80 °С.

В настоящий момент на полигоне ОАО «РЖД» большое количество железнодорожных участков проектируется, монтируется и вводится в эксплуатацию с применением цепной полукомпенсированной контактной подвески. Перспективой развития железнодорожного транспорта до 2030 года и 2035 года предусматривается развитие тяжеловесного движения грузовых поездов массами до 12 600 т для перевозки грузов в порты, а также по различным направлениям [5]. В условиях тяжеловесного движения ток, потребляемый одним современным электровозом, может достигать порядка 500 А на переменном токе и 4000 А на постоянном токе. Такие нагрузки, а также их нелинейность во времени существенно влияют на температуру нагрева проводов контактной подвески и могут достигать или даже превысить допустимые для медного несущего троса 100 °С [6].

Ток нагрузки, протекающий по всем продольным и поперечным проводам контактной подвески, составляет определенную картину токораспределения. В настоящее время на практике при определении токонесущей способности прибегают к естественной модели токораспределения, не учитывающей продольные провода (струны, рессорные тросы). Совершенствование электротепловых и механических расчетов в части распределения тока в элементах контактной сети тесно связано с трудами таких ученых, как А. Б. Батрашов [7], А. В. Воронин [8], Е. В. Кудряшов [9].

Ввиду вышесказанного стоит отметить, что существующая методика определения натяжений несущего троса [2], разработанная еще в 80–90-х годах

прошлого века, может быть применена при инженерных расчетах, не учитывая токораспределение по всем проводам контактной подвески. Разработка математической модели позволит усовершенствовать электротепломеханические расчеты контактной подвески и объективно оценить степень достаточности применения существующих модификаций контактной подвески, а также требований, предъявляемых к ним, с учетом перспективы организации тяжеловесного движения. Данные расчеты можно производить с применением программного комплекса ANSYS Workbench на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Разработка математической модели контактной подвески с применением МКЭ

В качестве объекта исследования выбран пролет типовой полукомпенсированной контактной подвески переменного тока КС-160-3 длиной 65 м и сечением М-120 + МФ-100 со смещенными опорными струнами из провода БСМ1 сечением 4 мм². Выбор длины пролета сделан на основании [1, прил. 1] как наиболее часто встречающийся при проектировании.

Геометрия расчетного пролета представляется линейными поперечными и продольными отрезками заданного поперечного сечения. Сечение фасонного контактного провода в целях упрощения геометрии представляется круглым, равным описанной окружности по поперечному сечению. Расчетная геометрия одного пролета между опорами контактной сети с разбиением на конечные элементы изображена на рис. 1. Для наглядности на рисунке предоставлено меньшее количество узлов и конечных элементов, чем это необходимо для выполнения расчета. В целях сеточной сходимости для расчета необходимо более 350 тыс. конечных элементов.

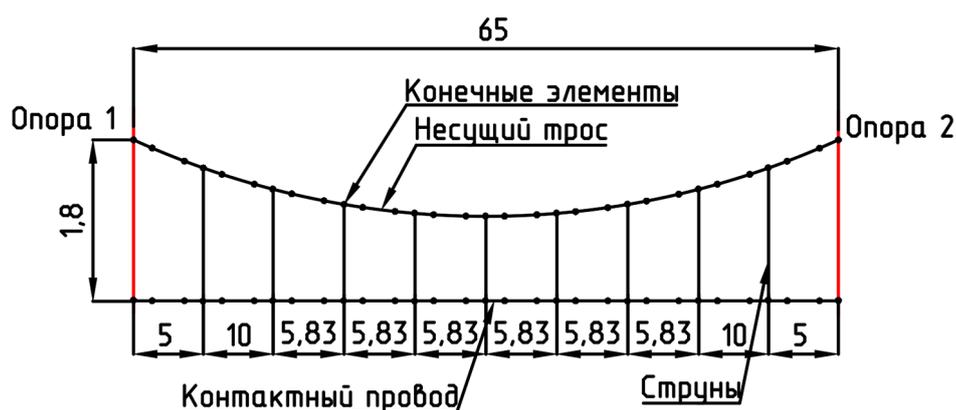


Рис. 1. Геометрия контактной подвески с разбиением на конечные элементы

На первом этапе исследования определяется токораспределение по всем продольным и поперечным проводам контактной подвески. Значение тока принимается на основании тяговых и электрических расчетов экспериментального участка,

электрифицированного по системе тягового электроснабжения переменного тока. На рис. 2 предоставлен фрагмент расчетной схемы тягового электроснабжения с указанием его параметров.

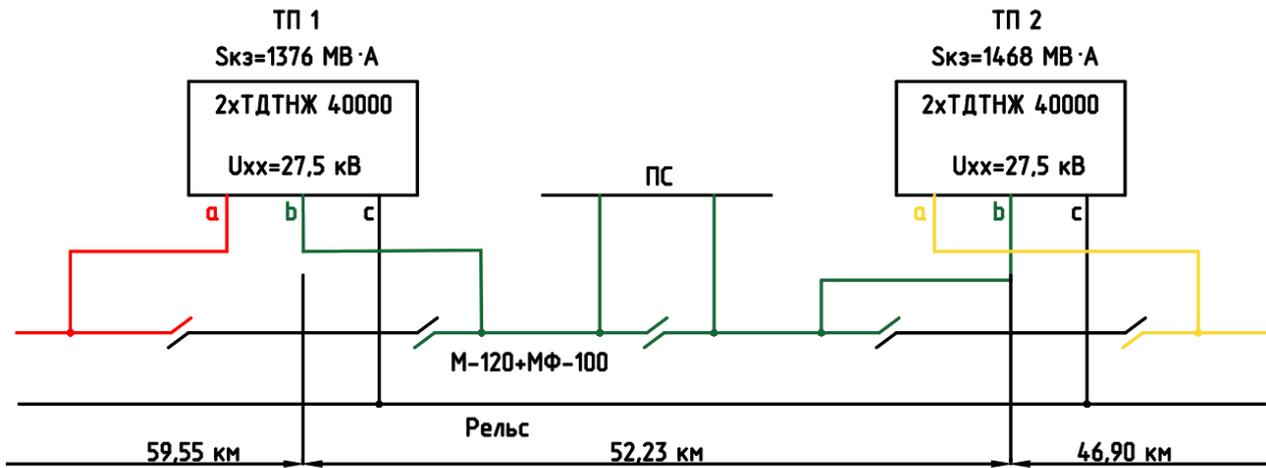


Рис. 2. Схема электроснабжения экспериментального расчетного участка

Расчеты выполнялись методом сечения графика движения поездов с учетом пропуска пакета поездов массами 4000–9000 т в час интенсивных перевозок. Результаты показали, что ток питающей линии тяговой подстанции ТП-1 в месте подключения к контактной подвеске за 20-минутный период составит 500 А.

Объектом исследования принимается пролет контактной подвески, в середине которого подключается питающая линия от тяговой подстанции ТП-1. Температура окружающего воздуха принимается равной 50 °С.

Работа контактной подвески в части протекания тягового тока характеризуется режимом транзита и режимом токосъема [7]. Режим транзита обусловлен протеканием тягового тока от источника до удаленной точки токосъема, а режим токосъема — движением ЭПС. В рассматриваемой модели принимается режим транзита, когда ЭПС находится в соседнем от исследуемого пролете. Режим токосъема не рассматривается. Расчет токораспределения по всем продольным и поперечным проводам рассматриваемого пролета основан на уравнении Максвелла в его дифференциальной форме:

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = \rho_q \\ \nabla \cdot H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \end{cases}, \quad (3)$$

где ρ_q — объемная плотность стороннего электрического заряда, Кл/м³;
 j — плотность электрического тока, А/м²;

H — напряженность магнитного поля, А/м²;

D — электрическая индукция, Кл/м³;

∇ — оператор набла.

Для определения искомой температуры нагрева проводов можно использовать первый закон термодинамики [10, с. 15] в следующем виде:

$$E_{ST} = \frac{dE_{ST}}{dt} = E_{IN} - E_{OUT} + E_G, \quad (4)$$

где E_{ST} — сохраненная тепловая энергия, Дж;

E_{IN} — поступающая тепловая энергия, Дж;

E_{OUT} — отбираемая тепловая энергия, Дж;

E_G — тепловая энергия внутри тела, Дж.

Провода контактной подвески подвергаются нагреву от протекающего тока (резистивному) и солнечной радиации. Взаимодействие с окружающей средой описывается процессами лучистого и конвективного теплообмена [11, с. 721]. Дополнительно на температуру провода контактной подвески влияют поперечный и продольный кондуктивные потоки тепла. Теплообмен возникает при наличии градиента вдоль проводов в местах крепления проводов к поддерживающим конструкциям. В случае вынужденной конвекции поток тепла направлен горизонтально со стороны ветровых нагрузок, в случае естественной конвекции — вертикально вниз. В данном расчете принимается допущение: кондуктивный поток тепла в поперечном направлении провода ввиду его малозначительности принимается равным нулю [7].

Кондуктивный тепловой поток в участке провода можно описать законом Фурье [2]:

$$Q_k = -k(T) \cdot A \cdot \nabla \cdot T, \quad (5)$$

где A — площадь поперечного сечения провода, м².

Уравнение нестационарного теплового баланса для КС, выраженное в потоке тепла на единицу длины провода, можно представить как [7]:

$$A \left(c(T) \cdot \rho \cdot \frac{dT}{dt} - k(T) \cdot \Delta T \right) = Q_J + Q_{SH} - Q_c - Q_R, \quad (6)$$

где c — теплоемкость материала провода, Дж/(кг·К);

k — теплопроводность материала провода, Вт/(м·К);

ρ — плотность материала провода, кг/м³;

Q_J, Q_{SH}, Q_c, Q_R — погонный поток тепла от резистивного нагрева, солнечной радиации, конвективного охлаждения, лучеиспускания, Вт/м;

T — температура, К;
 t — время, с;
 Δ — оператор Лапласа ($\Delta = \nabla^2$).

Визуализация результатов расчета температуры провода при учете токораспределения методом конечных элементов с применением программного комплекса ANSYS Workbench представлена на рис 3.

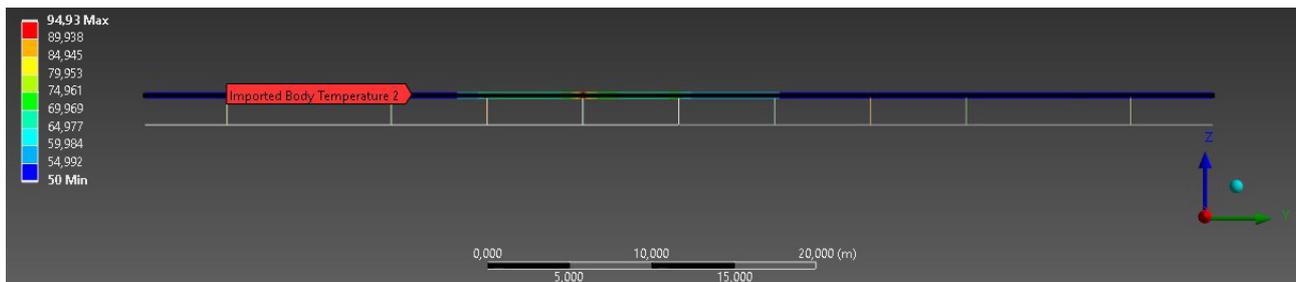


Рис. 3. Визуализация результатов расчета температуры провода при учете токораспределения

Наибольшая температура нагрева провода наблюдается в середине пролета в месте подключения питающей линии ТП к несущему тросу по причине высокой плотности тока в данной точке.

Методика расчета температуры нагрева провода с учетом токораспределения широко описана в работе А. Б. Батрашова [7]. Опыт данной работы используется при создании рассматриваемой модели и переходе от электротепловых расчетов к электротепломеханическим расчетам.

Расчет натяжения несущего троса полукомпенсированной контактной подвески с интеграцией электротеплового расчета основан на переходе к «балочной» геометрии в трехмерном пространстве. Принимается, что все продольные и поперечные провода не имеют поперечных деформаций, то есть перемещаются только в вертикальной плоскости. В рамках классической теории Эйлера — Бернулли можно описать провода моделью предварительно натянутого стержня [9]. Уравнение изгиба такого стержня в системе координат X, Y, Z имеет вид:

$$EJ \cdot \frac{d^4 v'}{dx'^4} - H \cdot \frac{d^2 v'}{dx'^2} + q'(x') = 0, \quad (7)$$

где x' — продольная координата оси стержня;
 v' — поперечное перемещение оси стержня;
 E — модуль упругости;
 J — момент инерции сечения, Н;
 H — натяжение, Н;

$q'(x')$ — распределенная поперечная нагрузка.

Так как в данном расчете изгибной жесткостью стержня пренебрегают, уравнение (7) можно представить так:

$$-H \cdot \frac{d^2 v'}{dx'^2} + q'(x') = 0, \quad (8)$$

Продольное растяжение проводов описывается уравнением:

$$ES \cdot \frac{d^2 u'}{dx'^2} + \tau'(x') = 0, \quad (9)$$

где u' — перемещение вдоль оси провода, м;

S — площадь поперечного сечения провода, мм²;

$\tau'(x')$ — распределенная продольная нагрузка.

Программный комплекс ANSYS Workbench имеет возможность интеграции электротеплового в механический расчет посредством переноса результатов в каждый из узлов сетки. Граничными являются условия, выполняемые в два этапа. На первом задается натяжение несущего троса в режиме беспровесного положения — 1470 даН, а натяжение контактного провода — 1050 даН. Так как в полукompенсированной контактной подвеске несущий трос жестко анкеруется на опоре, то на втором этапе расчета «блокируется» его натяжение и производится интеграция электротеплового расчета для определения натяжения несущего троса в режиме максимальной температуры с учетом нагрева от протекающего тока. Натяжение контактного провода остается постоянным вне зависимости от прикладываемых тепловых нагрузок.

В табл. 1 приведены сводные результаты расчетов и сравнение принимаемых параметров, выполненных на разработанной МКЭ-модели и по методике, изложенной в [2].

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчетов по разработанной МКЭ-модели и по методике [2]

Параметр	Рассматриваемая методика	
	Методика [2]	МКЭ-модель
Максимальная температура провода с учетом нагрева от протекающего тока	80 °С	94,93 °С
Натяжение НТ в режиме максимальной температуры	637 даН	849 даН

Заключение

Результаты расчета и анализа показывают, что в существующей методике [2] в части определения максимальной температуры провода недоучитывается порядка 14 °С. Тогда как натяжение несущего троса в режиме максимальной температуры, наоборот, принимается приблизительно на 200 даН меньше, чем по расчетам МКЭ-модели.

Такой параметр, как натяжение в режиме максимальной температуры, используется в расчете стрелы провеса несущего троса при проверке вертикальных перемещений и вертикального габарита контактной подвески. Стрела провеса несущего троса в середине пролета при учете натяжения, определенного по методике [2], составляет 1,67 м, а при учете натяжения, определенного по МКЭ-модели, составляет 1,25 м.

С учетом вышеизложенного можно утверждать, что методика [2] изначально предполагает выполнение расчетов с запасом в сравнении с разработанной МКЭ-моделью.

МКЭ-модели имеют большой расчетный функционал и возможность задавать различные граничные условия расчета, такие как температура окружающего воздуха, величина тока, протекающего по проводам КС, натяжение проводов КС. Такие модели могут быть использованы при проектировании, научной деятельности широким кругом специалистов. Описанная МКЭ-модель на данный момент дорабатывается на кафедре «Электроснабжение железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I и в ближайшее время будет подвержена процессу валидации.

Библиографический список

1. СТН ЦЭ 141-99. Нормы проектирования контактной сети. М.: ЦЭ МПС РФ, 2001. 16 с.
2. Фрайфельд А. В., Брод Г. Н. Проектирование контактной сети. М.: Транспорт, 1991. 335 с.
3. СП 131.13330.2020. Строительная климатология СНиП 23-01-99* (с изменениями № 1, 2). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2021. 132 с.
4. Техническое указание № К-06-07 «О несущих тросах контактной сети переменного тока», утв. письмом Департамента электрификации и электроснабжения от 31.08.2007 № ЦЭТ-2/49.
5. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 № 877-р).
6. ГОСТ 32697-2019. Тросы контактной сети железной дороги несущие. Технические условия. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.
7. Батрашов А. Б. Совершенствование электротепловых расчетов и характеристик контактной сети постоянного тока: дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2019. 216 с.
8. Воронин А. В. Токораспределение между продольными проводами контактной сети и тепловой расчет ее элементов: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1946. 143 с.

9. Кудряшов Е. В. Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечно-элементных моделей: дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2010. 162 с.

10. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F. P. Incopera [et al.]. 6th ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006. 1070 p.

11. Contact Lines for Electric Railways. Planning, Design, Implementation, Maintenance / F. Kiessling [et al.]. 2nd ed. Erlangen: Publicis Publishing, 2009. 994 p.

Дата поступления: 30.10.2024

Решение о публикации: 27.11.2024

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — докт. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение железных дорог»; agunov@pgups.ru

ИВАНОВ Денис Дмитриевич — аспирант кафедры «Электроснабжение железных дорог»; denis_08a@mail.ru

Improving the calculation method for catenary contact suspensions of electrified railways

A. V. Agunov, D. D. Ivanov

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

For citation: Agunov A. V., Ivanov D. D. Improving the calculation method for catenary contact suspensions of electrified railways // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 112–122. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-112-122

Abstract

Purpose: to conduct an analysis aimed at identifying the shortcomings of the existing calculation methodology for catenary overhead catenaries of electrified railways under extreme temperature conditions. To demonstrate the need to implement modern calculation methods based on mathematical modeling using computer-aided design tools. **Methods:** development of a FEM model using the ANSYS Workbench software package, which allows determining the tension of the overhead catenary supporting cable taking into account heating from the flowing current under heavy-haul traffic conditions. Comparison of calculation results using the existing methodology and the developed FEM model. **Results:** the analysis showed that the current approach does not take into account important physical factors, which can lead to potential errors both in the design and operation of the overhead catenary. The results of the electrothermal-mechanical calculation using the developed FEM model reveal inconsistencies in determining the heating temperature and tension of the overhead catenary supporting cable, which indicates the need to revise the key parameters used in the existing calculation methodology. **Practical significance:** the difference in the calculation results shows the importance of implementing modern methods for determining the parameters required for design and operation and confirms the relevance of the study, especially in the conditions of organizing heavy-haul train traffic. The FEM

models used in the study have a wide calculation functionality and the ability to specify various boundary conditions, such as ambient air temperature, current applied to the contact network wires, and wire tension. These models can be effectively used in design and scientific activities by specialists in various fields.

Keywords: contact network, contact suspension, carrier cable, maximum temperature mode, wire heating temperature, traction power supply systems.

References

1. STN CE 141-99. Normy proektirovaniya kontaktnoj seti. M.: CE MPS RF, 2001. 16 s. (In Russian)
2. Frajfel'd A. V., Brod G. N. Proektirovanie kontaktnoj seti. M.: Transport, 1991. 335 s. (In Russian)
3. SP 131.13330.2020 Stroitel'naya klimatologiya SNiP 23-01-99* (s izmeneniyami No. 1, 2). Oficial'noe izdanie. M.: Standartinform, 2021. 132 s. (In Russian)
4. Tekhnicheskoe ukazanie № K-06-07 "O nesushchih trosah kontaktnoj seti peremennogo toka", utv. pis'mom Departamenta elektrifikacii i elektrosnabzheniya ot 31.08.2007 No. CET-2/49. (In Russian)
5. Strategiya razvitiya zhelezodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii do 2030 goda (utv. Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 17.06.2008 No. 877-r). (In Russian)
6. GOST 32697-2019. Trosy kontaktnoj seti zheleznoj dorogi nesushchie. Tekhnicheskie usloviya. Oficial'noe izdanie. M.: Standartinform, 2019. 8 s. (In Russian)
7. Batrashov A. B. Sovershenstvovanie elektroteplovyh raschetov i harakteristik kontaktnoj seti postoyannogo toka: diss. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2019. 216 s. (In Russian)
8. Voronin A. V. Tokoraspredelenie mezhdru prodol'nymi provodami kontaktnoj seti i teplovoj raschet ee elementov: diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 1946. 143 s. (In Russian)
9. Kudryashov E. V. Sovershenstvovanie mekhanicheskikh raschetov kontaktnyh podvesok na osnove staticheskikh konechno-elementnyh modelej: diss. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2010. 162 s. (In Russian)
10. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F. P. Incopera [et al.]. 6th ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006. 1070 p.
11. Contact Lines for Electric Railways. Planning, Design, Implementation, Maintenance / F. Kiessling [et al.]. 2nd ed. Erlangen: Publicis Publishing, 2009. 994 p.

Received: 30.10.2024

Accepted: 27.11.2024

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — D. Sci. in Engineering, Professor; agunov@pgups.ru

Denis D. IVANOV — Postgraduate Student; denis_08a@mail.ru

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 625.03

Волнообразный износ рельсов на трамвайном транспорте

Е. П. Дудкин, Я. С. Хомяков, Д. А. Каковко

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

Для цитирования: Дудкин Е. П., Хомяков Я. С., Каковко Д. А. Волнообразный износ рельсов на трамвайном транспорте // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 123–133. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-123-133

Аннотация

Цель: рассмотрение проблемы волнообразного износа рельсов на трамвайном транспорте. Обзор исследований по проблеме волнообразного износа рельсов и действующей нормативной документации. Изучение современных методов борьбы с волнообразным износом и мер по предотвращению или снижению его проявления. Понимание причин и механизмов волнообразного износа рельсов для разработки эффективных стратегий и мероприятий для обеспечения безопасности и надежности трамвайного сообщения, увеличения срока службы инфраструктуры и сокращения затрат на ее техническое обслуживание и ремонт. **Методы:** анализ научной литературы и исследовательских работ по теме волнообразного износа рельсов. Обобщение и систематизация информации о причинах волнообразного износа, его влиянии на работу системы «колесо — рельс» и методах борьбы с ним. Описание исторических аспектов изучения проблемы волнообразного износа и современных подходов к ее решению. Выявление и анализ мероприятий, направленных на снижение волнообразного износа и повышение эффективности работы трамвайного транспорта. Представление рекомендаций по улучшению нормативной базы и повышению безопасности трамвайного движения. **Результаты:** обобщены причины возникновения волнообразного износа рельсов, рассмотрены его особенности. Указано на необходимость совершенствования нормативной базы по содержанию трамвайных путей. Предложены меры по продлению срока службы рельсов и недопущению развития волнообразного износа. **Практическая значимость:** статья представляет собой систематизированное исследование проблемы волнообразного износа рельсов на трамвайном транспорте, которое может быть использовано специалистами в данной области для разработки эффективных методов нормирования этого явления и борьбы с ним. Полученные результаты также могут быть полезны для студентов и преподавателей транспортных вузов, изучающих вопросы эксплуатации и обслуживания рельсового транспорта.

Ключевые слова: трамвайный путь, волнообразный износ, шлифовка рельсов, фрезерование рельсов, техническое содержание путей.

Введение

Основным элементом верхнего строения пути являются рельсы. Они не только воспринимают нагрузку от подвижного состава, но и задают направление движения колеса по рельсу. Состояние рельсов напрямую влияет на безопасность движения экипажа по рельсовому пути, на характер взаимодействия «колесо — рельс» и плавность движения.

При эксплуатации пути в рельсах постепенно возникают износ, смятие, коррозия и усталость металла. Вследствие этих процессов в рельсах появляются различные дефекты, которые характеризуются отклонениями от утвержденных норм их геометрических и прочностных характеристик, соблюдение которых гарантирует работоспособное состояние рельса в заданных условиях эксплуатации [1].

Одним из дефектов, природа которого на сегодня до конца не изучена, а его проявление носит частый и практически случайный характер, является волнообразный износ.

История исследования проблемы

Первые упоминания о волнообразном износе относятся к концу XIX века. На железных дорогах Великобритании [2], США [3] и Германии, а позднее и Индии [2] при паровой тяге был отмечен волнообразный износ отдельных рельсов, у которых наблюдались характерные возвышения на головке, располагающиеся через равные промежутки (от 4 до 6 см). Рельсы с таким типом износа были обнаружены в равной степени как на прямых участках пути, так и в кривых, на площадках и уклонах, но во всех случаях подобный износ затрагивал только одиночные рельсы, износ на обоих рельсовых нитях встречался в единичных случаях [2].

В первой половине XX века с развитием электрификации железных дорог и активным строительством трамвайных линий все чаще отмечался волнообразный износ как отдельных рельсов магистральных железнодорожных линий, так и желобчатых рельсов трамвайных путей [2].

Первые исследователи явления волнообразного износа искали причину дефекта в свойствах самих рельсов. Основными причинами возникновения волн считались неудовлетворительное качество рельсовой стали и дефекты проката [2].

Наряду с проблемами качества рельсов отмечалось влияние жесткости подрельсового основания. Было установлено, что при перекладке рельсов с волнообразным износом на другие участки того же пути или при частичной замене, присыпке балласта другого вида, а также при смене подвижного состава ранее рифленые рельсы начинали изнашиваться гладко [2, 4]. В связи с этим обсуждались теории возникновения волнообразного износа как результата резонанса конструкции пути и элементов подвижного состава в определенных условиях [2].

В 1920-х годах на зарубежных железных дорогах начинается активная борьба с волнообразным износом путем шлифования рельсов [5].

В середине XX века с развитием металлургической промышленности и методов исследования структуры стали значительно повысилось качество рельсов, но проблема волнообразного износа осталась актуальна, поскольку дефект по-прежнему активно проявлялся на вновь строящихся железных дорогах. Фокус исследований начал все больше сдвигаться в сторону изучения особенностей взаимодействия пути и подвижного состава в связи с внедрением новейших локомотивов (электровозов) с большими, чем у паровозов, ускорениями при торможении и трогании с места [4].

Развивается классификация волнообразных неровностей, происходит выделение коротких волн с длиной 35–75 мм и длинных — 500 мм и более. Выносятся предположения о различной природе возникновения волн разной длины [4, 5].

Инженер Н. П. Кондаков в качестве причины возникновения коротких волн отмечал микробоксование в виде следующих друг за другом срывов в скольжение отдельных колесных пар электровоза в местах реализации наибольших тормозных и тяговых усилий: на спусках, подъемах и их сочетаниях с кривыми. Уделял внимание изменениям в структуре стали в результате кратковременного, практически точечного нагрева и охлаждения чередующихся участков при таком характере боксования [4].

В 1958 году на XVII сессии Международной ассоциации железнодорожных конгрессов формируется общепризнанный перечень факторов, вызывающих волнообразный износ. Среди них все также выделяются качество рельсов (как металла, так и их проката), вибрационные воздействия в пути и подвижном составе, особенности режима движения локомотивов и их конструкция, а также влияние состояния пути и подвижного состава [5].

Общепризнанным также становится факт, что большинство высказанных причин не могут вызвать волнообразный износ самостоятельно, а их воздействие в совокупности повышает вероятность возникновения волнообразного износа [5].

Отечественные исследователи (М. И. Кулагин, Э. И. Кац) в середине 1960-х годов уделяют внимание волнообразному износу с длинными (50–250 см) волнами как наиболее часто встречающемуся на железных дорогах СССР. Исследования подтверждают теорию образования начальных неровностей на поверхности катания рельсов в результате осевого биения валов прокатных станков.

Также подтверждается влияние жесткости подрельсового основания на волнообразный износ. Установлено, что интенсивность развития волн на пути с железобетонными шпалами в 1,3–1,5 раза больше, чем с деревянными [5].

В 60–70-х годах совершенствуется технология шлифовки рельсов, разрабатываются рельсошлифовальные поезда, а также специальные путеизмерительные тележки, регистрирующие длину и амплитуду волн [5].

В 80–90-х годах за рубежом параллельно ведутся исследования образования коротких и длинных волн. Природа возникновения длинных волн уже не связы-

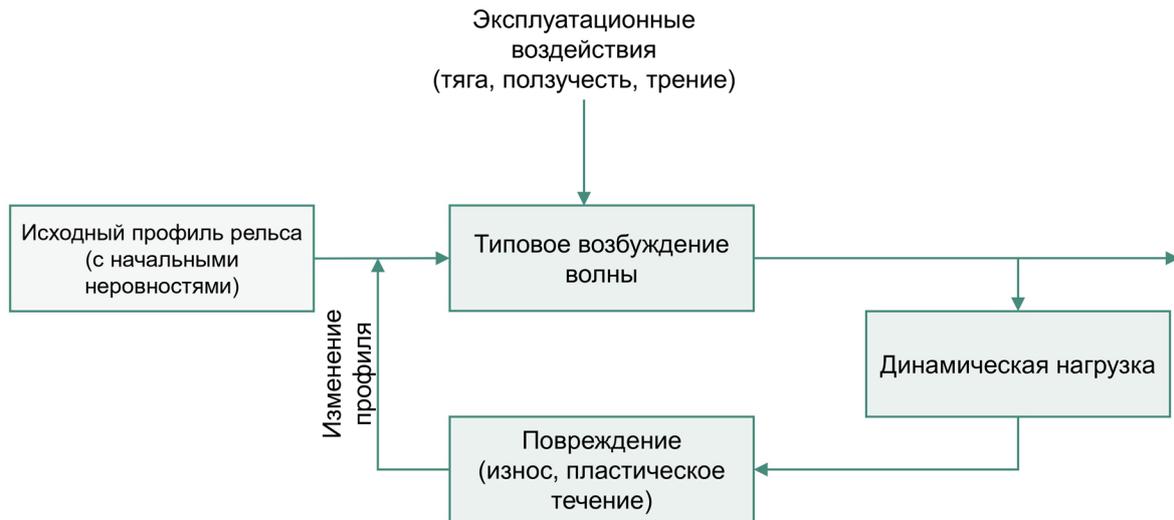


Рис. 1. Контур обратной связи возникновения и развития волнообразного износа, предложенный S. L. Grassie и J. Kalousek

вается с качеством проката, основной причиной считаются вертикальные динамические колебания неподрессоренной массы подвижного состава.

В 1993 году S. L. Grassie и J. Kalousek представили механизм образования волнообразного износа в виде обратной связи (рис. 1) [6].

В 2000-х годах отечественными авторами А. И. Козыревым и А. Алижаном установлена связь параметров волнообразного износа рельсов с динамическими свойствами системы «ходовые части — колесо» и скоростью. Подтверждается, что резонансные явления в рельсе при динамическом взаимодействии ходовых частей с верхним строением пути присутствуют всегда. Однако они являются необходимым, но не достаточным условием образования и развития волнообразного износа. В результате исследования резонансных явлений устанавливается, что подвижной состав имеет некоторые резонансные скорости движения, при которых происходит образование в упруго-деформированном рельсе резонирующих стоячих волн [7].

В 2010 году А. Алижан доказывает, что достаточным условием для образования волнообразных неровностей рельсов является эксплуатация на участке пути однотипного подвижного состава в узком диапазоне скоростей движения, включающем резонансные. Также приводится распределение групп факторов, инициирующих образование волнообразного износа, основными из которых являются:

- шероховатость и дефекты на поверхности катания колес;
- осевая нагрузка;
- однотипные перевозки однотипным подвижным составом;
- шероховатость и технологические неровности на поверхности катания рельсов;
- ослабление промежуточных рельсовых скреплений [3].

К концу 2010-х годов группа исследователей (С. К. Каргапольцев, П. В. Новосельцев, Ю. А. Крупцов) связывает возникновение волнообразного износа на прямых участках пути с периодическим проскальзыванием колеса по рельсам при торможении, которое связано с тем, что система взаимодействия «колесо — рельс» является колебательной. Величина проскальзывания зависит от скорости и технического состояния рельсового пути [8].

Аналогичные результаты получены в это время и за рубежом. Формируется теория неустойчивого качения, возникающего в переходных условиях: при ускорении и торможении. Неустойчивое качение характеризуется двумя фазами: в первой происходит устойчивое качение, во второй — срыв в скольжение за счет превышения тангенциальными силами сил сцепления колеса с рельсом, а затем возврат к состоянию сцепления за счет энергии вибрации колесной пары. Чередование качения и скольжения приводит к развитию пластической деформации металла головки рельса — образованию волн [6].

На 6-й линии метрополитена г. Чэнду (Китай), открытой для движения 18 декабря 2020 года, в кривой радиуса 600 м на внешнем рельсе был отмечен волнообразный износ с длинами волн 56–62 мм уже через 17 месяцев после начала эксплуатации.

Установлено, что волнообразный износ связан с развившимся двухточечным контактом колеса с рельсом в ходе их взаимного изнашивания и появлением самовозбуждающихся вибрационных колебаний [9].

Исследования причин возникновения волнообразного износа приводились и на высокоскоростных дорогах Китая на прямых участках пути. Механизм образования волнообразного износа рельса в этом случае был основан на резонансных явлениях в системе «колесо — рельс» [10, 11].

Вышеупомянутые факторы также актуальны и для трамвайного транспорта, насыщенного кривыми малых радиусов, характеризующегося однотипными перевозками и частыми изменениями режима движения со значительными ускорениями по сравнению с железнодорожным подвижным составом. Кроме того, трамвайный путь обладает в определенных смыслах достаточно сложными по сравнению с железной дорогой условиями эксплуатации.

Текущее состояние вопроса

На сегодняшний день проблема волнообразного износа остается актуальной как для железнодорожного транспорта, так и для трамвая.

В нормативной литературе РФ волнообразный износ достаточно полно описан для магистральных железных дорог. В инструкции «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 23 октября 2014 года № 2499р (далее — инструкция), приведен дефект с кодом 40 «волнообразный износ и смятие

головки рельса». Выделяются длинные (25–150 см) и короткие (менее 25 см) волны, а также приводятся причины возникновения волн разной длины [1].

В инструкции приводятся допускаемые и критические параметры длины и глубины волн, при которых рельсы признаются дефектными, подлежат замене, шлифовке или требуется ограничение скорости.

На трамвайном транспорте проблема волнообразного износа отмечена в инструкции по техническому содержанию трамвайных путей 1992 года. В п. 2.3.13 указано, что рельсы с волнообразным износом выше нормы заменяются или шлифуются. При превышении нормы износа устанавливается ограничение скорости трамваев. Норма износа устанавливается исходя из длины и глубины волн [12].

Однако при каких значениях глубины и длины волн необходимо ограничивать скорость и до какого уровня, документ не регламентирует.

Эксплуатирующие организации городского электрического транспорта нормы волнообразного износа устанавливают самостоятельно. Так, в путевом хозяйстве ГЭТ города Санкт-Петербурга выделяется три категории волнообразного износа рельсов с длинами волн 30–120 мм:

- 1-я категория (волнообразный износ более 2 мм);
- 2-я категория (волнообразный износ от 0,5 до 2 мм);
- 3-я категория (волнообразный износ до 0,5 мм).

На рис. 2 представлена диаграмма распределения протяженности развернутой длины трамвайных путей (за исключением путей парков, конечных пунктов и подходов к ним) по категориям волнообразного износа по состоянию на начало 2018 и 2024 годов.

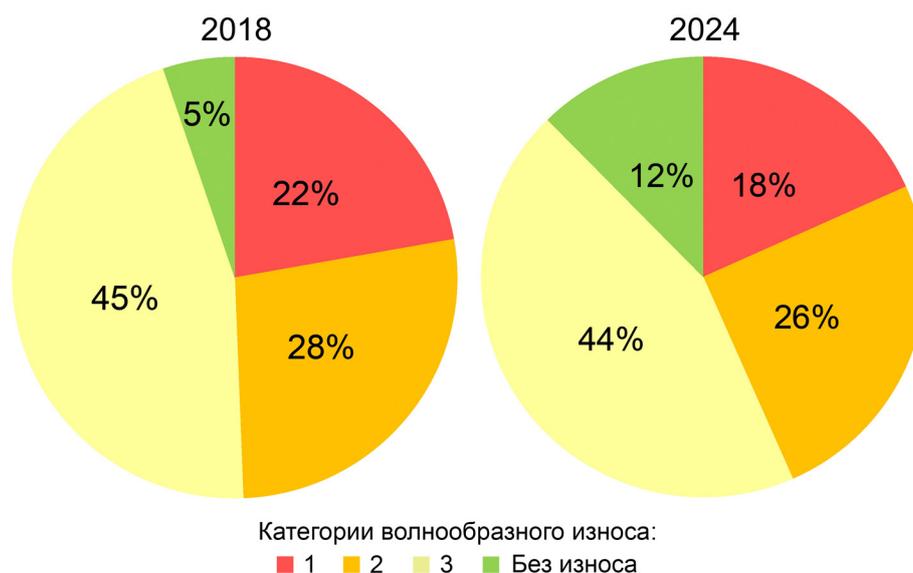


Рис. 2. Диаграмма распределения трамвайных путей по категориям волнообразного износа (%)

Как видно, на настоящий момент по-прежнему существенная доля путей (44 %) имеет волнообразный износ 3-й категории с волнами глубиной до 0,5 мм. Доля путей без износа значительно возросла (с 5 до 12 %) за счет активного ремонта путей с износом 1-й и 2-й категорий (замена рельсов).

Значительная часть участков имеет данную проблему. Важным на сегодняшний день является не только принятие мер по восстановлению рельсов с волнообразным износом, но и проведение мероприятий, направленных на снижение его появления.

Шлифовка и фрезерование рельсов

Значительный вклад в продление межремонтного срока службы путей на начальных этапах развития волнообразного износа может внести профилактическое шлифование рельсов.

Опыт таких зарубежных фирм, как Vossloh, показывает, что предупредительное удаление волн на начальном этапе их зарождения более эффективно, чем «агрессивное» шлифование волн с глубиной 1–2 мм.

Основным методом профилактической шлифовки, рекомендуемой Vossloh, является высокоскоростная шлифовка (HSG) специальной рельсошлифовальной машиной.

Профилактическую шлифовку в первую очередь целесообразно проводить на «больных» участках, где проблема наблюдается постоянно, а также в характерных местах, таких как:

- места резкого изменения продольного профиля (спуски, подъемы на мосты/эстакады);
- кривые малых радиусов;
- участки пересечения трамвайных путей с крупными потоками колесных транспортных средств;
- места неблагоприятного сочетания элементов плана и профиля (кривые на подъемах и спусках, кривые в зоне поперечного движения безрельсового транспорта);
- места смены типа подрельсового основания;
- участки с установившимся режимом — участки пути, по которым осуществляет движение однотипный подвижной состав с приблизительно одинаковыми осевой нагрузкой, типом тележек и техническим состоянием в одном и том же режиме (ускорение или торможение).

Для устранения же более глубоких волн обычного шлифования недостаточно, Vossloh рекомендует применение фрезерования. Фрезерование позволяет восстановить профиль рельса за счет снятия металла до 2 мм за один проход со скоростью 2–4 м в минуту.

Механизированная шлифовка рельсов и фрезерование позволяют получить ряд существенных эксплуатационных эффектов:

- снижение уровня шума при движении трамвая;
- повышение уровня комфорта пассажиров в салоне трамвая;
- повышение скорости движения трамваев;
- снижение динамических нагрузок на экипажную часть вагона;
- сокращение потребности в замене рельсов.

Заключение

Волнообразный износ рельсов в настоящий момент остается серьезной проблемой, с которой сталкивается рельсовый транспорт по всему миру.

Механизм образования и развития волнообразного износа заключается в случайном возникновении в ходе эксплуатации мелких начальных неровностей, которые сами по себе не приводят к образованию волн. Однако под действием определенных факторов (специфические воздействия подвижного состава, резонанс, неравноупругость пути и др.), носящих вероятностный характер, начальные неровности провоцируют износ прилегающих участков рельса, что ведет к образованию новых неровностей. Происходит лавинообразное нарастание интенсивности износа, формируются повторяющиеся через равные промежутки волны, длина которых зависит от динамических свойств подвижного состава и пути.

Основными причинами возникновения волнообразного износа в современных условиях являются:

- резонансные явления в системе «колесо — рельс», «ходовые части — колесо»;
- неустойчивое качение (микробоксование);
- двухточечный контакт колеса с рельсом.

Особенностью волнообразного износа является то, что он нередко затрагивает и свежееуложенный путь, созданный с применением новых материалов и современных конструкций. Появление данного дефекта снижает экономический эффект от строительства новых путей, сокращая сроки службы элементов верхнего строения [5, с. 39] и, соответственно, увеличивая долю затрат, отводимых на работы по текущему содержанию.

Для трамвайных путей в нормативном поле РФ волнообразный износ до сих пор не регламентирован, отсутствуют допуски по его проявлению и конкретные значения, при которых требуется выполнять те или иные мероприятия. В связи с чем необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований по определению допустимых параметров волнообразного износа (длины и глубины волн) для заданных скоростей движения с целью обеспечения безопасной эксплуатации трамвайного транспорта.

Одной из основных мер по продлению срока службы рельсов и недопущению развития волнообразного износа является профилактическая шлифовка в том числе и новых рельсов.

Кроме того, необходимо проведение мероприятий, способствующих снижению интенсивности развития волнообразного износа:

- улучшение технического состояния подвижного состава (геометрии бандажей, более тщательное содержание экипажной части);
- лубрикация боковой поверхности рельса в кривых малого радиуса;
- подметание пути и очистка желобов для снижения абразивности внешних воздействий и предупреждения возникновения начальных неровностей;
- устройство пути на монолитном плитном основании, обеспечивающем равномерную жесткость подрельсового основания на всем протяжении пути;
- применение виброгасящих конструкций пути и колес подвижного состава, более эффективно поглощающих совместные колебания системы.

Библиографический список

1. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefектных рельсов: инструкция, утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 № 2499р.
2. Тихомиров К. Волнообразный износ рельсов // Журнал Министерства путей сообщения. Кн. VIII. СПб., 1905.
3. Алижан А. Влияние динамических процессов в системе «колесо — рельс» на образование волнообразных неровностей на поверхности катания рельсов: автореферат. М., 2010. 24 с.
4. Кондаков Н. П. Волнообразный износ рельсов и меры борьбы с ним (по наблюдениям на Томской железной дороге): автореферат. Новосибирск, 1958. 15 с.
5. Кулагин М. И., Кац Э. И., Тюриков В. Н. Волнообразный износ рельсов. М.: Транспорт, 1970. 145 с.
6. Fangfang D. Numerical tribology of the wheel-rail contact: application to corrugation defect // L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2015. URL: <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2015ISAL0019/these.pdf>
7. Козырев А. И. Связь параметров волнообразного износа рельсов с динамическими свойствами системы «ходовые части — путь» и скоростью // Национальная ассоциация ученых (НАУ). 2015. Т. 2, № 7. С. 111–115.
8. Каргапольцев С. К., Новосельцев П. В., Крупцов Ю. А. Волнообразный износ рельсов при торможении // Мир транспорта. 2017. Т. 15, № 5. С. 46–53.
9. Study on the Formation Mechanism for High Rail Corrugation / Q. Song [et al.] // Tribology Transactions. 2024. Vol. 67, iss. 1. P. 141–156. DOI: 10.1080/10402004.2024.2301717
10. New Insights into the Short Pitch Corrugation Enigma Based on 3D-FE Coupled Dynamic Vehicle-Track Modeling of Frictional Rolling Contact / S. Li [et al.] // Appl. Sci. 2017. Vol. 7. P. 807. DOI: 10.3390/app7080807
11. An assessment method of rail corrugation based on wheel–rail vertical force and its application for rail grinding / L. Niu [et al.] // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2023. Vol. 13 (4–5). P. 1131–1150. DOI: 10.1007/s13349-023-00700-w

12. Инструкция по техническому содержанию трамвайных путей, утв. и введена в действие 01.01.1993 приказом концерна «Росгорэлектротранс» от 30.12.1992 № 112. 96 с.

13. Wang Z., Lei Z. Formation Mechanism of Metro Rail Corrugation Based on Wheel-Rail Stick-Slip Behaviors // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 8128. DOI: 10.3390/app11178128

Дата поступления: 07.08.2024

Решение о публикации: 15.10.2024

Контактная информация:

ДУДКИН Евгений Павлович — докт. техн. наук, профессор; ed@pgups-tempus.ru

ХОМЯКОВ Ярослав Сергеевич — аспирант; jaro97@mail.ru

КАКОВКО Дмитрий Андреевич — студент; dmank@mail.ru

Wave-shaped depreciation of rails on tram transport

E. P. Dudkin, J. S. Khomyakov, D. A. Kakovko

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

For citation: *Dudkin E. P., Khomyakov Y. S., Kakovko D. A. Wave-shaped depreciation of rails on tram transport // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 123–133. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-123-133*

Abstract

Purpose: to consider the problem of wave-shaped depreciation of rails on tram transport. A review of research on the problem of wave-shaped wear of rails and current regulatory documentation. The study of modern methods of combating wave-like wear and measures to prevent or reduce its manifestation. Understanding the causes and mechanisms of rail corrugation in order to develop effective strategies and measures to ensure the safety and reliability of tram services, increase the service life of infrastructure and reduce the cost of its maintenance and repair. **Methods:** analysis of scientific literature and research papers on the topic of rail corrugation. Generalization and systematization of information about the causes of wave-like wear, its effect on the operation of the wheel-rail system and methods of combating it. Description of the historical aspects of studying the problem of wave-like wear and modern approaches to its solution. Identification and analysis of measures aimed at reducing corrugation and improving the efficiency of tram transport. Presentation of recommendations on improving the regulatory framework and improving the safety of tram traffic. **Results:** the causes of rail corrugation are summarized, its features are considered. The need to improve the regulatory framework for the maintenance of tramways is indicated. Measures are given to extend the service life of rails and prevent the development of corrugation. **Practical importance:** the article is a systematic study of the problem of wave-shaped depreciation of rail in tram transport, which can be used by specialists in this field to develop effective methods of rationing this phenomenon and combating it. The results obtained can also be useful for students and teachers of transport universities studying the issues of operation and maintenance of rail transport.

Keywords: tram, wave-shaped wear, rail corrugation, grinding of rails, milling of rails, track maintenance.

References

1. Defekty rel'sov. Klassifikaciya, katalog i parametry defektnyh i ostrodefektnyh rel'sov: instrukciya, utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 23.10.2014 № 2499r. (In Russian)
2. Tikhomirov K. Volnoobraznyj iznos rel'sov // Zhurnal Ministerstva putej soobshheniya. Kn. VIII. SPb., 1905. (In Russian)
3. Alizhan A. Vliyanie dinamicheskikh processov v sisteme "koleso — rel's" na obrazovanie volnoobraznyh nerovnostej na poverhnosti kataniya rel'sov: avtoreferat. M., 2010. (In Russian)
4. Kondakov N. P. Volnoobraznyj iznos rel'sov i mery bor'by s nim (po nablyudenyam na Tomskoj zheleznoj doroge): avtoreferat. Novosibirsk, 1958. (In Russian)
5. Kulagin M. I., Katz E. I., Tyurikov V. N. Volnoobraznyj iznos rel'sov. M.: Transport, 1970, 145 p. (In Russian)
6. Fangfang D. Numerical tribology of the wheel-rail contact: application to corrugation defect // L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2015. URL: <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2015ISAL0019/these.pdf>
7. Kozyrev A. I. Svyaz' parametrov volnoobraznogo iznosa rel'sov s dinamicheskimi svojstvami sistemy "hodovye chasti — put'" i skorost'yu // Nacional'naya asociaciya uchenyh (NAU). 2015. T. 2, No. 7. S. 111–115. (In Russian)
8. Kargapoltsev S. K., Novoseltsev P. V., Kuptsov Yu. A. Volnoobraznyj iznos rel'sov pri tormozhenii // Mir transporta. 2017. T. 15, No. 5. S. 46–53. (In Russian)
9. Study on the Formation Mechanism for High Rail Corrugation / Q. Song [et al.] // Tribology Transactions. 2024. Vol. 67, iss. 1. P. 141–156. DOI: 10.1080/10402004.2024.2301717
10. New Insights into the Short Pitch Corrugation Enigma Based on 3D-FE Coupled Dynamic Vehicle-Track Modeling of Frictional Rolling Contact / S. Li [et al.] // Appl. Sci. 2017. Vol. 7. P. 807. DOI: 10.3390/app7080807
11. An assessment method of rail corrugation based on wheel-rail vertical force and its application for rail grinding / L. Niu [et al.] // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2023. Vol. 13 (4–5). P. 1131–1150. DOI: 10.1007/s13349-023-00700-w
12. Instrukciya po tekhnicheskomu sodержaniyu tramvajnyh putej, utv. i vvedena v dejstvie 01.01.1993 prikazom koncerna "Rosgorelektrotrans" ot 30.12.1992 № 112. 96 p. (In Russian)
13. Wang Z., Lei Z. Formation Mechanism of Metro Rail Corrugation Based on Wheel-Rail Stick-Slip Behaviors // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 8128. DOI: 10.3390/app11178128

Received: 07.08.2024

Accepted: 15.10.2024

Author's information:

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

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

Dmitrii A. KAKOVKO — Student; dmank@mail.ru

УДК 621.333.4

Использование энергии рекуперации для обогрева стрелочных переводов от контактной сети постоянного тока с напряжением 3 кВ

М. Ю. Изварин, И. А. Ролле, Е. В. Денисенко

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

Для цитирования: Изварин М. Ю., Ролле И. А., Денисенко Е. В. Использование энергии рекуперации для обогрева стрелочных переводов от контактной сети постоянного тока с напряжением 3 кВ // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 134–141. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-134-141

Аннотация

Цель: создание системы для использования энергии рекуперации на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе с напряжением 3 кВ. Предлагаемая система должна давать возможность использовать для обогрева стрелочных переводов энергию рекуперативного торможения, вырабатываемую электровозом или электропоездом постоянного тока при рекуперативном торможении и недостаточной мощности тяговых потребителей или их отсутствии в тяговой сети. **Методы:** анализ статистических данных по режимам работы электроподвижного состава и тяговой сети, выполнения графика движения поездов, анализ и синтез схмотехнических решений, изучение отечественного и зарубежного опыта утилизации энергии рекуперации на железнодорожном транспорте. **Результаты:** предложен принцип использования энергии рекуперации, которую невозможно использовать из-за малой нагрузки в контактной сети, для обогрева стрелочных переводов, повышающий энергоэффективность перевозок на электрифицированном железнодорожном транспорте. **Практическая значимость:** показана возможность использования электрической энергии рекуперации электрического подвижного состава для обогрева стрелочных переводов в зимний период при невозможности ее потребления другими электровозами и электропоездами. Данную систему можно использовать на участках, электрифицированных на постоянном токе с грузовым и пассажирским движением, где эксплуатируется электрический подвижной состав (ЭПС) с рекуперативным и рекуперативно-реостатным торможением.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, контактная сеть, система электроснабжения, обогрев стрелочного перевода.

Введение

На большинстве типов современного ЭПС применяется электрическое торможение — рекуперативное или реостатное, а также и комбинированное — рекуперативно-реостатное. При таком режиме работы тяговые электродвигатели (ТЭД) ЭПС переводятся в генераторный режим, а выработанная ими энергия либо отдается в контактную сеть, либо переводится в тепловую на тормозных резисторах. С каждым годом доля энергии, возвращенной в сеть при рекуперативном торможении, возрастает и достигла к настоящему времени около 6% от потребленной на тягу [1]. И если с экономической точки зрения наиболее

эффективным является рекуперативное торможение, то с точки зрения надежности и безопасности — реостатное. Причина этого состоит в том, что эффективность рекуперативного торможения зависит от состояния контактной сети и наличия потребителей в ней, а для реостатного — нет. Срабатывание защиты на подстанции, отключение тяги электровоза или выход его с фидерного участка на ЭПС с рекуперативным торможением приведет к срыву торможения и пропаданию тормозной силы.

1. О возможности повышения надежности рекуперации и возможности использования выработанной энергии

На новейшем ЭПС с преобразовательными установками применяется комбинация двух видов электрического торможения — рекуперативно-реостатное. При этом рекуперативное торможение может постепенно замещаться реостатным. И если вопрос надежности такая система решает, то энергоэффективность она не повышает [1, 2, 5]. Большинство же современных видов электровозов и электропоездов при отсутствии нагрузки в контактной сети переходят в режим реостатного или пневматического торможения, и выработанная энергия утилизируется в виде тепла [3, 4, 5].

По-прежнему особенно остро стоит вопрос полезного использования энергии рекуперации на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе с напряжением 3 кВ. Особенно это важно на участках с небольшими объемами движения, где энергия рекуперации не может использоваться для тяги, так как вероятность нахождения на одном фидерном участке двух единиц электрического подвижного состава мала. В то же время можно обеспечить дополнительную нагрузку на сеть с целью полезного применения энергии рекуперации.

Одними из значительных и наиболее мощных потребителей являются стрелочные электрообогреватели. Использование энергии рекуперации для питания таких потребителей создало бы хороший резерв для роста энергоэффективности перевозочного процесса.

Питание электронагревателей стрелок осуществляется, как правило, от промышленной системы электроснабжения с напряжением 380/220 В либо, если мощность сети недостаточна, — от ЛЭП 10 кВ через трансформаторы, что по сути одно и то же, так как ЛЭП 10 кВ обеспечивает и питание устройств СЦБ и нетяговых потребителей станций и перегонов. Однако в этом случае значительно увеличиваются затраты на покупку электроэнергии, и не во всех случаях электрические сети станций или подстанций могут обеспечить обогреватели достаточной мощностью. Поэтому в последние годы было предпринято немало попыток по использованию для обогрева стрелок тепла земли, например, тепловых насосов [6], замене обогревателей на систему обработки антиобледенительными жидкостями и прочее.

В то же время использование с этой целью системы тягового электроснабжения было бы экономически целесообразным, так как у нее большой резерв мощности, передача энергии сопровождается меньшими потерями, и из-за недостаточного количества потребителей недоиспользуется энергия рекуперации, которая могла бы быть возвращена электровозами.

2. Система питания обогревателей стрелок от контактной сети

Наиболее эффективно питать обогреватели стрелочных переводов от контактной сети. Это позволяет не только установить нагревательные элементы высокой мощности, но и использовать энергию рекуперации (см. выше). При этом стрелочные обогреватели на трамвайных линиях давно и успешно питаются от контактной сети в различных странах мира. Этот же способ используется на магистральных железных дорогах, электрифицированных на переменном токе [7, 8].

До недавнего времени камнем преткновения в вопросе использования энергии контактной сети для нетяговых нужд на участках постоянного тока с напряжением 3 кВ была система преобразования постоянного тока высокого напряжения в переменный с обеспечением изоляции (гальванической развязки). При существовавшем в 1980–1990-х годах уровне преобразовательной техники система питания получалась бы громоздкой и дорогой, а ее КПД редко превышал бы 70–80%. В настоящее время многие компании освоили производство многоячейковых (иногда их также называют многоуровневыми) высоковольтных инверторов напряжения на основе IGBT-транзисторов, которые имеют компактные габариты и большую мощность, КПД систем доходит до 91% и выше (имеются и другие схемы).

Данный агрегат подключается к контактной сети постоянного тока с напряжением 3кВ и имеет два гальванически развязанных друг с другом и с контактной сетью выхода, на каждом из которых имеется напряжение 230 В частотой 50 Гц. Одним из примеров является преобразователь, предлагаемый компанией EVPU (Словакия).

Источник состоит из следующих основных элементов: входного индуктивно-емкостного фильтра, высоковольтного IGBT-инвертора и мощного разделительного понижающего трансформатора с двумя вторичными обмотками и выходным фильтром.

Первичная обмотка трансформатора получает питание от инвертора. Соотношение числа витков первичной и вторичной обмоток обеспечивает уровень напряжения на выходе 230 В, а алгоритм работы инвертора (так называемая широтно-импульсная модуляция, ШИМ) и специальный фильтр на выходе позволяют получить напряжение, приближенное к синусоидальному, с промышленной частотой 50 Гц. При этом выходное напряжение стабилизируется по величине.

Цепи управления питаются от однофазного переменного напряжения 230 В, 50 Гц. Цепи сигнализации позволяют контролировать работу и выявлять неисправности источника.

Конструктивно преобразователь будет выполнен в виде шкафа, устанавливаемого у железной дороги либо на опоре контактной сети. Входной фильтр, высоковольтный инвертор, аппараты управления и выходной трансформатор находятся на одной раме, которая закреплена в шкафу. Конструкция последнего имеет защищенное исполнение и позволяет эксплуатировать систему вне помещений с установкой непосредственно в горловинах станций.

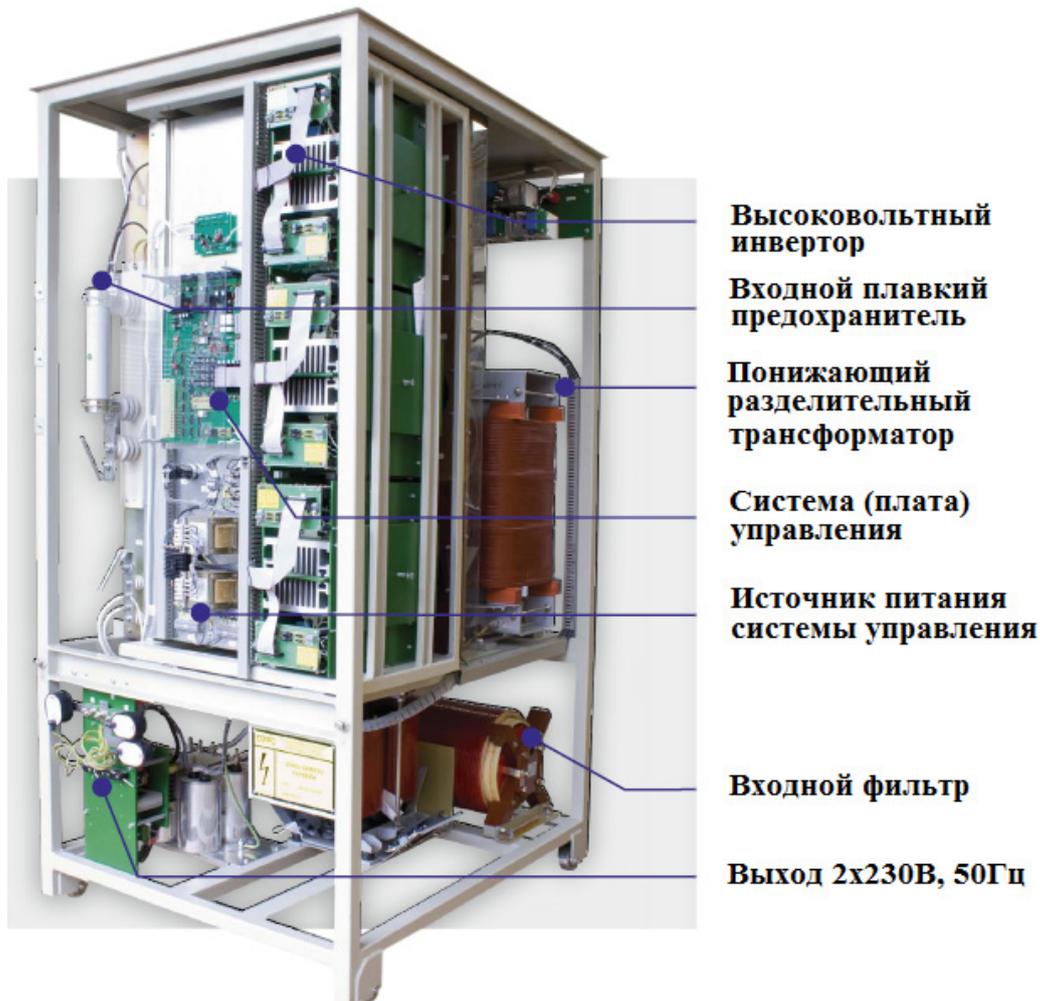
Источник питания имеет плату управления, расположенную внутри шкафа. Доступ к ней и к клеммовым рейкам осуществляется персоналом, обученным для работы с высоковольтными установками. Для предотвращения короткого замыкания контактной сети при выходе из строя преобразователя в конструкции имеется плавкий высоковольтный предохранитель.

Система работает следующим образом. При повышении напряжения в контактной сети до значения 3,7 кВ, что говорит о рекуперации, а также по команде от тяговой подстанции система начинает обогрев стрелочных переводов. Энергия запасается в виде тепла разогретых элементов переводов. При значительном понижении температуры окружающего воздуха система просто обогревает стрелочные переводы от контактной сети, снижая нагрузку на ЛЭП 10 кВ. Система может быть использована в качестве резервирования для питания нетяговых потребителей (СЦБ, станции и пр.) на случай повреждения ЛЭП 10 кВ.

ТАБЛИЦА. Технические характеристики преобразователя

Напряжение питания, В	3000 ± 33 %, пост. ток.
Максимально допустимое перенапряжение, кВ при длительности 4 мС	16
Номинальная мощность, кВт	60
Выходное напряжение	2 × 230 В, 50 Гц
Коэффициент искажений, %	5
КПД, %	91
Уровень шума не более, дБА	60
Масса, кг	1100

Конструктивно преобразователь выполняется в виде модуля, пригодного для подвешивания на опоре контактной сети. На этой же опоре закрепляются разъединитель, контактор и аппаратура защиты.



Источник питания систем обогрева стрелочных переводов от контактной сети с напряжением 3 кВ на примере блока питания нетяговых потребителей от контактной сети EVPU (фото автора)

Основной проблемой при создании подобной системы станет способ определения режима рекуперации электровозом или электропоездом, так как постоянное ее подключение приведет лишь к увеличению расхода энергии от тяговой подстанции — система должна работать лишь в момент, когда подвижной состав рекуперировывает энергию торможения.

С этой целью можно использовать алгоритм, построенный на двух принципах:

- 1) включение системы лишь при повышении напряжения в контактной сети выше 3,7 кВ;
- 2) включение системы по команде, передаваемой от подвижного состава с использованием какой-либо системы передачи данных.

Первый из способов наиболее просто реализовать, однако при его использовании потребуются индивидуальная настройка системы управления, так как

уровень напряжения в контактной сети зависит от расположения точки подключения преобразователя относительно подстанции (близко к питающему фидеру либо на большом расстоянии от него). Однако даже при использовании такого простого алгоритма система даст экономический эффект.

Более сложно реализовать второй вариант, так как потребуется оборудовать электрический подвижной состав устройствами передачи информации, подключенными к системе управления электровоза или электропоезда. Однако в данном случае можно будет точно определить момент начала рекуперации и заблаговременно создать дополнительную нагрузку в контактной сети. Наиболее перспективными в качестве устройств передачи данных являются системы наподобие GSM-R, однако полигон применения такой системы в России невелик. Поэтому можно рассмотреть возможность применения системы PLC, при которой каналом передачи информации будет сама контактная сеть [9].

Заключение

Выполненный анализ показал, что для повышения энергетической эффективности электрической тяги при невысокой интенсивности движения поездов и невозможности в связи с этим эффективного потребления рекуперированной энергии электроподвижным составом на участках постоянного тока возможна утилизация этой энергии в зимний период в электроустановках для обогрева стрелочных переводов. Предложены структурная схема системы питания обогревателей, включающая статический преобразователь, и принцип работы системы управления.

Библиографический список

1. Кузнецов А. А., Изварин М. Ю. Использование энергии рекуперативного торможения в системе отопления пассажирских вагонов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9. № 2. С. 33–43. DOI: 10.17816/transsyst20239233-43
2. Оценка энергоэффективности работы железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения / Т. С. Титова [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2017. Т. 14. № 1. С. 119–126.
3. Тихменев Б. Н., Трахтман Л. М. Подвижной состав электрических железных дорог. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1969. 408 с.
4. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 2 / Т. С. Титова [и др.] // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 2(81). С. 52–55.
5. Смаглюков Д. А. Устройство и эксплуатация электровоза ЭП20: учебное пособие. М.: Российские железные дороги, 2015. 360 с.
6. Steingraber J. Eisenbahn Ingenieur. 2007. № 9. S. 32–34.
7. Обогрев стрелочных переводов на железных дорогах Германии // Железные дороги мира. 2011. № 2. С. 75–78.

8. Система обогрева трамвайных стрелочных переводов «НСТ» // Официальный сайт компании ООО «Альфа Инжиниринг». URL: <https://al-teh.ru/category/sistema-obogreva-tramvajnyh-strelochnyh-perevodov> (дата обращения: 10.03.2024).

9. Шишкин Ф. Д., Бростилов С. А., Трусов В. А. Технология Power Line Communication и ее применение // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы семинара. 2015. № 18. С. 402–406.

Дата поступления: 13.09.2024

Решение о публикации: 05.10.2024

Контактная информация:

ИЗВАРИН Михаил Юльевич — канд. техн. наук, доцент; misha3568723@yandex.ru

РОЛЛЕ Игорь Александрович — канд. техн. наук, доцент; igor.rollet@inbox.ru

ДЕНИСЕНКО Елена Владимировна — инженер; denisenko@pgups.ru

The use of recuperation energy for heating railroad switches from a DC contact network with a voltage of 3 kV

M. Yu. Izvarin, I. A. Rolle, E. V. Denisenko

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

For citation: *Izvarin M. Yu., Rolle I. A., Denisenko E. V.* The use of recovery energy for heating railroad switches from a DC contact network with a voltage of 3 kV // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 134–141. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-134-141

Abstract

Purpose: to create a system for the use of energy recovery on sections of railways electrified with direct current with a voltage of 3 kV. The proposed system should make it possible to use the energy of regenerative braking generated by an electric locomotive or a DC electric train for heating switches during regenerative braking and insufficient power of traction consumers or their absence in the traction network. **Methods:** analysis of statistical data on the modes of operation of electric rolling stock and traction network, execution of train schedules, analysis and synthesis of circuit solutions, study of domestic and foreign experience in the utilization of energy recovery in railway transport. **Results:** the principle of using energy recovery, which cannot be used due to the low load in the contact network, for heating switches, increasing the energy efficiency of transportation on electrified rail transport, is proposed. **Practical significance:** the possibility of using electric energy recovery of electric rolling stock for heating switches in winter is shown, if it is impossible to consume it by other electric locomotives and electric trains. This system can be used in areas electrified with direct current with freight and passenger traffic, which operates electric rolling stock (EPS) with regenerative and regenerative-rheostatic braking.

Keywords: regenerative braking, contact network, power supply system, switch heating.

References

1. Kuznecov A. A., Izvarin M. Yu. Ispol'zovanie energii rekuperativnogo tormozheniya v sisteme otopleniya passazhirskih vagonov // Innovacionnye transportnye sistemy i tekhnologii. 2023. T. 9. No. 2. S. 33–43. DOI: 10.17816/transsyst20239233-43 (In Russian)
2. Ocenka energoeffektivnosti raboty zheleznodorozhnogo transporta primeneniem specializirovannykh udel'nykh edinits izmereniya / T. S. Titova [i dr.] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2017. T. 14. No. 1. S. 119–126. (In Russian)
3. Tihmenev B. N., Trahtman L. M. Podvizhnoj sostav elektricheskikh zheleznykh dorog. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Transport, 1969. 408 s. (In Russian)
4. Perspektivy razvitiya tyagovogo podvizhnogo sostava. Chast' 2 / T. S. Titova [i dr.] // Transport Rossijskoj Federacii. 2019. No. 2(81). S. 52–55. (In Russian)
5. Smaglyukov D. A. Ustrojstvo i ekspluatatsiya elektrovoza EP20: uchebnoe posobie. M.: Rossijskie zheleznye dorogi, 2015. 360 s. (In Russian)
6. Steingraber J. Eisenbahn Ingenieur. 2007. № 9. S. 32–34.
7. Obogrev strelochnykh perevodov na zheleznykh dorogah Germanii // Zheleznye dorogi mira. 2011. No. 2. S. 75–78. (In Russian)
8. Sistema obogreva tramvajnykh strelochnykh perevodov “NST” // Oficial'nyj sajt kompanii OOO “Al'fa Inzhiniring”. URL: <https://al-teh.ru/category/sistema-obogreva-tramvajnykh-strelochnykh-perevodov> (data obrascheniya: 10.03 2024) (In Russian)
9. Shishkin F. D., Brostilov S. A., Trusov V. A. Tekhnologiya Power Line Communication i ee primenenie // Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemah: materialy seminar. 2015. No. 18. C. 402–406. (In Russian)

Received: 13.09.2024

Accepted: 05.10.2024

Author's information:

Michael Yu. IZVARIN — PhD in Engineering, Associate Professor; misha3568723@yandex.ru

Igor A. ROLLE — PhD in Engineering, Associate Professor; igor.rollet@inbox.ru

Elena V. DENISENKO — Engineer; denisenko@pgups.ru

УДК 338.28

Эффект синергии транспортной сопряженности цепей поставок по маршрутам международного транспортного коридора «Север — Юг»: сценарный анализ

Н. А. Журавлева, Т. А. Крюкова

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

Для цитирования: Журавлева Н. А., Крюкова Т. А. Экономическая оценка влияния железнодорожных грузовых перевозок на эффективность цепей поставок в различных сценариях развития международного транспортного коридора «Север — Юг» // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 142–154. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-142-154

Аннотация

Международные транспортные коридоры (МТК) как основной элемент формирования новой геоэкономики становятся важнейшим объектом исследований и разработок. Их влияние на экономический рост стран прилегания к маршрутам, на эффективность деятельности грузовладельцев, транспортных операторов, перевозчиков, владельцев инфраструктуры не имеет четких теоретических и эмпирических оценок. **Целями** данного исследования являются обоснование и расчет показателя эффекта синергии транспортной сопряженности МТК «Север — Юг», а именно оценка максимальных объемов перевозимых грузов по всем маршрутам МТК с учетом факторов, ограничивающих его пропускную и провозную способность. **Методы исследования:** сценарный прогноз развития МТК получен методом выборки — сценарного распределения. В расчете показателей оценки экономических эффектов маршрутов МТК использован метод сравнения цифровых данных с факторами риска, ограничивающими грузопотоки железнодорожных перевозок. Использован анализ матрицы расстояний по трем маршрутам МТК. Прогноз оценочных показателей выполнен методом динамического анализа последовательных рядов показателей грузовой железнодорожной перевозки, характеризующих каждый маршрут, их изменения во времени. **Результаты:** на основании таких показателей, как пропускная и провозная способность железнодорожной инфраструктуры МТК; индекс устойчивого развития стран региона; индекс логистики (таможенное и пограничное оформление; качество торговой и транспортной инфраструктуры); стоимость перевозки, рассчитаны эффекты сопряженности, отражающие максимальные объемы перевозимых грузов с учетом связанности инфраструктуры и видов транспорта по всем маршрутам МТК «Север — Юг». **Практическая значимость:** сценарный расчет эффектов сопряженности по маршрутам МТК может использоваться в проектах развития транспортно-логистической инфраструктуры МТК, поскольку позволяет оценить эффекты роста пропуска грузов.

Ключевые слова: эффект сопряженности, транспортный каркас, международные транспортные коридоры.

Введение

Последние три года формируют принципиально новую парадигму развития российской экономики: сближение с экономиками ряда стран Центральной, Южной и Восточной Азии, на пространстве которых формируется новый транспортный каркас, соединяемый стремительно развивающимся МТК «Север — Юг»¹. Его самый протяженный маршрут ведет из Санкт-Петербурга в Мумбаи. С введением санкций в отношении РФ, изменением географии товарных рынков, обрывом традиционных цепей поставок МТК «Север — Юг» становится одной из главных торговых артерий для России. Это связано с динамическим ростом производства развивающихся стран Азиатско-Тихоокеанского региона, активизацией их торговых потоков в сторону РФ и ЕС [1]. При этом эффективность существующей транспортной системы Евразийского экономического союза (ЕАЭС) в 3 раза ниже, чем в ЕС (транспортная составляющая в цене перевозимой продукции в ЕАЭС составляет 30%, а в ЕС — 10%), что существенно влияет на конкурентоспособность экономик стран региона. При этом большинство стран Евразии не имеет выхода к морям, что существенно сдерживает темпы роста их экономик.

По своей сути МТК «Север — Юг» составляет основу транспортного каркаса между Европой и Азией, поскольку соединяет большинство транспортных путей между этими регионами, его маршруты способны обеспечить связанность с важнейшими МТК и региональными маршрутами. Прежде всего это «Транс-сиб» и его цепи поставок по коридорам № 1 и № 2 ОСЖД, а также по маршруту Европа — Западный Китай; МТК «ТРАСЕКА» и проходящие по его оси международные Лазуритовый транспортный коридор (Lapis Lazuli), международные логистические сети, соединяющие Черное и Каспийское моря; маршруты транспортного коридора «Южный», соединяющие Турцию и Иран, страны Юго-Восточной Азии, Индию и Пакистан. Транскаспийский маршрут МТК «Север — Юг» с высоким уровнем мультимодальности в цепях поставок проходит по инфраструктуре МТК № 2, 3, 6 — CAREC² [2, 3]. Полная характеристика инфраструктуры данного транспортного каркаса представлена в докладе Евразийского банка развития [4].

Такое многоширотное маршрутное соединение стран Восточноазиатского региона формирует логистику новой геоэкономики мира, развивая новые товарные рынки, способствующие повышению конкурентоспособности стран на маршрутах МТК, прежде всего РФ [5].

¹ Международный транспортный коридор — совокупность магистральных транспортных коммуникаций (как имеющихся, так и вновь создаваемых), связывающих стороны, с соответствующим обустройством, как правило, различных видов транспорта, обеспечивающих перевозки пассажиров и товаров в международном сообщении, на направлении их наибольшей концентрации // Соглашение о международном транспортном коридоре «Север — Юг», ратифицировано Федеральным законом РФ от 12.03.2002 № 24-ФЗ.

² Central Asian Regional Economic Cooperation, соединяет страны Средиземноморья и Восточной Азии.

Целью данного исследования является расчет показателя эффекта синергии транспортной сопряженности МТК «Север — Юг»: формирование системы оценочных показателей и метода их интеграции в совокупные показатели, подтверждающие эффективность перевозки по различным маршрутам и сценариям их развития.

Объектом исследования является железнодорожная инфраструктура и железнодорожные грузовые перевозки по трем маршрутам МТК, обеспечивающие в том числе подходы к морским портам Каспийского моря и портам Персидского залива, пунктам пропуска, а также к внутренним и международным аэропортам:

1. Западный — от портов Северо-Западного федерального округа России (СЗФО) через РФ и Азербайджан до порта Бендер-Аббас (Иран). Маршрут обеспечивает 70% от всего грузопотока (~ 5,1 тыс. км). Основу маршрута составляет железнодорожная инфраструктура, кроме участка на территории Ирана, где идет перегрузка на автотранспорт.

2. Самый смешанный, мультимодальный маршрут (~ 4,9 тыс. км) — Транскаспийский. Начало грузопотоков формируется от морских портов Северо-Западного региона, далее через порты Каспия грузы идут в иранские порты. В общем объеме грузоперевозок МТК доля маршрута — более 25%.

3. Восточный, или маршрут Казахстан — Туркменистан — Иран (~ 6,1 тыс. км), также начинается от портов СЗФО РФ и идет до иранского порта Бендер-Аббас, объем перевозок по нему — не более 5% всего грузопотока.

Северная точка маршрута — восемь морских портов на Балтийском, Баренцевом и Белом морях (СЗФО РФ) с крупнейшими грузовыми и контейнерными терминалами. Именно от/в данное направление идут массовые объемы грузов стран АТР, Азербайджана, Грузии, Армении и далее в южном направлении. С введением торговых санкций в отношении РФ ситуация изменилась: ожидаемого обвала объемов перевозки и перевалки грузов не случилось, но структура и маршруты перевозки существенно изменились. Так, если до 2022 года объемы перевозимого импорта и экспорта были приблизительно равны, то в 2023 году около 75% грузоперевозок составил экспорт из РФ, а 25% — импорт [6].

Торговый баланс России в 2022–2023 годах изменился по объему и структуре товаров: рост торговли с дружественными странами существенно вырос к 2023 году, что позволяет оценить потенциал роста торговли к 2030 году на 90% к уровню 2022-го. Основными торговыми партнерами остаются КНР, Индия, страны ЕАЭС. По оценкам аналитических агентств, в структуре грузов наибольший прирост составят энергоресурсы (нефть и нефтепродукты — до 300 млн т, уголь — до 239 млн т). Планируемый прирост объемов перевозок руды оценивается на уровне 7,5% в год, древесины и ЦБК — 6,4%, продукции химической промышленности — 5,5%, продовольствия и зерна — 3% [7].

Сценарии развития МТК «Север — Юг» обусловлены прогнозами торговых балансов между странами на маршрутах, планами развития регионов, прилегающих к маршрутам, торговых соглашений и рядом ограничений, накладываемых на них. Рассматриваются два сценария развития до 2030 года: инерционный сценарий, способный пропустить и перевезти 46 млн т, и оптимистический сценарий с потенциалом перевозки 60 млн т. С учетом межгосударственных соглашений и проектов развития транспортной инфраструктуры на маршрутах целевой сценарий развернут до 2040 года с оценкой объемов перевозок до 75 млн т [8].

Данные и методы

В исследовании использованы данные международной и российской статистики перевозок грузов по МТК «Север — Юг» за период с 2019 по 2023 год. Данные обработаны и проанализированы (табл. 1–5).

ТАБЛИЦА 1. Отчетные данные об объемах перевезенных грузов железнодорожным транспортом по двум маршрутам МТК «Север — Юг», млн т

Направление		2021	2022	2023
Западный маршрут	в/из Азербайджана	3,88	4,46	4,75
	в/из Грузии	0,81	3,03	2,75
	в/из Ирана (включая третьи страны, в т. ч. Индию)	0,25	0,35	0,52
	В том числе в контейнерах, тыс. ДФЭ:			
	в/из Азербайджана	3,95	9,21	34,74
	в/из Грузии	2,37	9,49	6,6
	в/из Ирана (включая третьи страны, в т. ч. Индию)	0,15	0,44	1,66
Восточный маршрут	Россия — Туркменистан	0,36	0,37	0,36
	Россия — Афганистан	0,06	0,14	0,20
	Россия — Иран (через Туркменистан)	0,00	0,08	0,19
	Туркменистан — Иран	0,15	0,17	0,20
	Казахстан — Иран	0,12	0,14	0,16
	В том числе в контейнерах, тыс. 20-футового эквивалента:			
	Россия — Туркменистан	0,69	0,91	0,49
	Россия — Иран (через Акяйля и Серахс)	–	0,39	1,13
	Россия — Афганистан (через Акяйля и Серахс)	–	–	2,00

Сост. по источникам [4, 9, 10].

Как следует из табл. 1, железнодорожные перевозки доминируют в Западном маршруте МТК, существенная их доля проходит через Азербайджан с достаточно высокой долей контейнеров.

ТАБЛИЦА 2. Структура грузов, перевозимых железнодорожным транспортом по Западному и Восточному маршрутам МТК «Север — Юг», млн т

Вид груза	2022		2023		2023/2022, %	
	Западный	Восточный	Западный	Восточный	Западный	Восточный
Нефтяные грузы	2,47	0,00	1,73	0,09	70,04	–
Зерно	1,50	0,12	1,45	0,13	96,67	108,33
Лесные грузы	1,12	0,12	1,40	0,19	125,00	158,33
Черные металлы	0,62	0,05	0,73	0,01	117,74	20,00
Уголь каменный и кокс	0,49	0,005	0,20	0,004	40,82	80,00
Химические грузы и удобрения	1,17	0,07	0,40	0,07	34,19	100,00
Прочие грузы	1,25	0,21	1,31	0,26	104,80	123,81

Сост. по источникам [4, 9, 10].

В структуре грузов, перевозимых по МТК, преобладают нефтяные грузы, зерно, химические грузы и удобрения — это в большей степени российский экспорт.

ТАБЛИЦА 3. Данные об объемах перевозок грузов железнодорожным транспортом по Транскаспийскому маршруту МТК «Север — Юг» в пределах РФ к морским портам Каспия, млн т

Порты	2021	2022	2023
Астрахань	2,9	2,5	2,6
Оля	0,1	0,2	0,1
Махачкала	1,2	1,0	1,2
В том числе в контейнерах:			
Астрахань	0,20	1,08	0,37
Оля	0,61	1,04	1,59
Махачкала	0,23	0,16	0,07

Сост. по источникам [9–11].

ТАБЛИЦА 4. Динамика объемов экспортно-импортных и транзитных грузовых железнодорожных перевозок по МТК «Север — Юг» (млн т), включая контейнерные перевозки по Транскаспийскому маршруту (тыс. ДФЭ)

Вид перевозок	2019	2020	2021	2022	2023	2023/2019, %
Всего, в том числе:	7,5	6,5	9,6	12,1	12,5	166,7
экспорт	5,7	5,2	8,1	8,9	9,7	170,2
импорт	0,8	0,7	0,9	0,7	0,8	100,0
транзит	1,0	0,6	0,6	2,5	2,1	210,0
Из них в контейнерах, тыс. ДФЭ:	7,3	10,0	8,1	22,7	46,6	638,4
экспорт	3,1	4,5	3,9	10,2	23,4	754,8
импорт	3,1	4,7	3,4	9,3	19,9	641,9
транзит	1,1	0,8	0,8	3,2	3,3	300,0
Уровень контейнеризации грузопотока, %	1,6	2,6	1,4	3,2	6,2	+4,6

Сост. по источникам [4, 9, 10].

Как следует из представленных данных, наибольшее сопряжение транспортных путей обеспечивает транзит по Транскаспийскому мультимодальному маршруту с высшим уровнем контейнеризации: железная дорога — морские порты — автотранспорт [12]. Смешанность перевозки различными видами транспорта означает вовлечение в маршрут инфраструктуры не только МТК «Север — Юг», но и множества других МТК, региональных и локальных маршрутов. На этом строится наше утверждение о наличии сопряженности эффектов перевозки по МТК «Север — Юг» как транспортному каркасу региона, оценка которого является актуальной экономической задачей.

С учетом приведенных данных и их анализа уточнены сценарные прогнозные оценки перевозок грузов всеми видами транспорта по маршрутам МТК (табл. 5).

Сценарный прогноз, представленный в табл. 5, получен методом выборки — сценарного распределения существенных и маловероятностных признаков генеральной совокупности информации об объемах, структуре грузов, факторах и рисках ограничения пропускной и провозной способности маршрутов МТК по железным дорогам.

ТАБЛИЦА 5. Прогноз объемов перевозок по МТК «Север — Юг» до 2030 года:
инерционный и целевой сценарии, млн т

Направление	2023, факт	Прогноз				
		2024, оценка	2025		2030	
			инерцион- ный	целевой	инерцион- ный	целевой
Всего	13,0	14	16	20	25	32
В том числе по маршрутам МТК «Север — Юг»						
Западный	8,0	8,5	9	10	13	18
Восточный	1,1	1,2	2	3	4	5
Транскаспийский, всего, в т. ч.	3,9	4,3	5	7	8	9
в контейнерах тыс. ДФЭ	46,6	49,7	58,0	65,6	102,9	150,0
Западный	43,0	44,7	47,7	53,4	87,9	129,2
Восточный	2,0	3,0	8,1	9,7	12,0	16,6
Транскаспийский	1,6	2,0	2,1	2,5	2,9	4,2
Уровень контейнеризации, %	6,2	6,5	6,5	6,7	7,1	7,8

Для получения итоговых результатов исследования, а именно оценки экономических эффектов маршрутов МТК, использован метод сравнения цифровых данных с факторами риска, ограничивающими грузопотоки железнодорожных перевозок. Полученные расчетные данные на основе анализа матрицы расстояний по трем маршрутам МТК позволяют рассчитать параметры среднего минимального расстояния маршрутов транспортировки грузов от начального до конечного пункта (в части перевозок железнодорожным транспортом). Прогноз оценочных показателей выполнен методом динамического анализа последовательных рядов показателей грузовой железнодорожной перевозки, характеризующих каждый маршрут, их изменения во времени.

Поскольку качество железнодорожной инфраструктуры динамически отражается на объемах перевозок грузов, принят индекс сопряженности: рост пропускной и провозной способности железнодорожной инфраструктуры на 0,1 балла увеличивает грузопоток на 5,7% в сопоставимых условиях.

Результаты

Основным эффектом развития всех маршрутов МТК «Север — Юг» является эффект синергии транспортной сопряженности, являющейся драйвером роста

стран Евразийского региона. Этот эффект в части железнодорожных перевозок определяется следующими показателями:

1. *Пропускная и провозная способность железнодорожной инфраструктуры.*

Несмотря на потенциал роста объемов грузов, предъявляемых к перевозке, пропускная способность только железнодорожной инфраструктуры на всех маршрутах МТК ограничена 27–28 млн т, а в смешанной инфраструктуре железнодорожного и автотранспорта — 10 млн т в год.

2. *Индекс устойчивого развития стран региона.* Перевозки железнодорожным транспортом позволяют на 25% по всему МТК снизить выбросы парниковых газов (сравнение с выбросами парниковых газов: морского транспорта — на 6 г/т·км выше; в 2 раза ниже речного, в 7 раз — автодорожного и на 30% — воздушного).

3. *Индекс логистики.* В индекс включены: эффективность таможенного и пограничного оформления, качество торговой и транспортной инфраструктуры (рассчитаны по [13]). По этим двум индексам по всем маршрутам МТК более половины транзитного времени уходит на таможенное оформление, складирование, контроль, задержки на погранпереходах. Двойное увеличение срока перевозки ведет к росту транспортных расходов в 3–4 раза³.

3. *Показатель «стоимость перевозки»:* отражает поведение грузоотправителей при выборе различных видов маршрутов. Рассчитывается по каждому коду товарной группы (классификатор ВЭД) с учетом расстояния транспортировки, времени транспортировки, переменной определения смежности между страной происхождения и страной назначения. Несмотря на более короткое время перевозки, по сравнению, например, с маршрутами через Суэцкий канал, стоимость перевозки может быть выше в 3 раза.

В связи с этим будущая эффективность МТК будет зависеть мультимодального тарифа и скорости перевозки по всей цепи поставок.

На основании данных показателей рассчитаны эффекты сопряженности — максимальные объемы перевозимых грузов по всем маршрутам МТК «Север — Юг» (табл. 6).

Таким образом, расчет эффекта сопряженности транспортного каркаса, соединяемого МТК «Север — Юг», показывает, что пропускная и провозная способность всех маршрутов МТК с низкой вероятностью обеспечит сценарные прогнозные показатели объемов перевозок. Этому препятствует множество обстоятельств, прежде всего ограничения инфраструктуры, геоэкономика и политика, в том числе финансовая и таможенная, а также различный уровень экономического развития стран на маршрутах, их социально-культурных традиций. Такой вывод подтверждает ряд исследователей, в частности [14, 15, 16].

³ В частности, от Москвы до иранского порта Бендер-Аббасу стоимость перевозки в 4,7 раза выше стоимости перевозок по среднеевропейскому МТК (378,12 долл. за тонну на маршруте МТК «Север — Юг» и 79,83 долл. за тонну Средиземноморский МТК).

ТАБЛИЦА 6. Объемы перевозок грузов по маршрутам МТК «Север — Юг» с учетом эффектов сопряженности инфраструктуры и видов транспорта

Показатели	Сценарии развития до 2040 года		Прогноз к 2040 году с учетом эффекта транспортной сопряженности
	инерционный	целевой	
Общая провозная способность перевозок по МТК, всего, в т. ч. по маршрутам, млн т:	60	75	43
Западный	25	35	15
Транскаспийский (мультиmodalный)	20	25	20
Восточный	15	15	8
Контейнерный транзит: Европа — ЕАЭС — Китай, тыс. ДФЭ	14,6	24,7	14,6
Время доставки грузов из Индии в Европу, дней	14	6	6
Индекс устойчивого развития, рост в %	на 25 %	на 25 %	на 25 %
Потенциал контейнерных перевозок, рост к 2023 году			21,2 %

Заключение

В нынешних экономических условиях смещения торговых связей и, соответственно, товарных потоков на/из Восток МТК «Север — Юг» может существенно повлиять на рост эффективности российской экономики. Снятие инфраструктурных ограничений, цифровизация оформления грузов и таможенных процедур, развитие подходов к морским портам, логистической инфраструктуры позволят сделать данный МТК драйвером роста экономик стран региона. Доминирование на маршрутах железнодорожных перевозок обеспечивает чистые перевозки, способствуя устойчивому региональному развитию. Приведенный расчет эффекта сопряженности, отражающий максимально возможный объем перевозки грузов по маршрутам МТК, является начальным этапом моделирования проектов развития его транспортной инфраструктуры, что является целью последующих исследований.

Библиографический список

1. Вериго С. А., Позднякова Т. И., Кудряшов А. Б. Международный транспортный коридор «Север — Юг»: проблемы и перспективы // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2024. Т. 14. № 4А. С. 492–502.
2. Международные транспортные коридоры на евразийском пространстве: развитие широтных маршрутов. URL: <https://index1520.com/analytics/mezhdunarodnye-transportnye-koridory-na-evraziyskom-prostranstve-razvitie-shirotnykh-marshrutov/> (дата обращения: 08.10.2024).

3. Милёшкина Ю.И., Хисамова А.А. Международный транспортный коридор «Север — Юг» — ключевой элемент транспортного каркаса и «новой» логистики // Молодой ученый. 2023. № 5 (452). С. 181–183.
4. Международный транспортный коридор «Север — Юг»: создание транспортного каркаса Евразии: доклад 21/5 / Е. Винокуров [и др.]. Алматы; М.: Евразийский банк развития, 2021. URL: <https://eabr.org/analytics/special-reports> (дата обращения: 10.11.2024).
5. 1520 International. Россия и БРИКС строят логистику будущего // Международный транспортный коридор от Балтики до Индийского океана: цифры, карты, прогнозы. URL: <https://1520international.com/content/2024/iyul-2024/the-north-south-corridor-how-russia-and-the-brics-are-shaping-eurasia-s-global-logistics/> (дата обращения: 06.12.2024).
6. Доля Азии в экспорте РФ превысила 70 % // Коммерсантъ. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6508829> (дата обращения: 06.12.2024).
7. Внешнеторговое сальдо РФ по итогам 2023 года составило \$140 млрд // Коммерсантъ. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6508330> (дата обращения: 06.12.2024).
8. Перспективы развития перевозок грузов по маршрутам мультимодального международного транспортного коридора «Север — Юг». URL: <https://1economic.ru/lib/117073> (дата обращения: 29.11.2024).
9. Из варяг в персы: перспективы развития транспортного коридора «Север — Юг». URL: <https://spec.rzd-partner.ru/page46841705.html> (дата обращения: 06.12.2024).
10. МТК «Север — Юг»: от замысла к реализации // Морские вести России. URL: <https://morvesti.ru/analitika/1685/106899/> (дата обращения: 06.12.2024).
11. Колея в большую игру: что заботит партнеров России по коридору «Север — Юг» // Коммерсантъ. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6030407> (дата обращения: 06.12.2024).
12. Прогнозный грузопоток по МТК «Север — Юг» к 2030 году превысит 32 млн тонн // ТАСС. URL: <https://tass.ru/ekonomika/18786749> (дата обращения: 06.12.2024).
13. Открытые данные Всемирного банка. Индикаторы. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/> (дата обращения: 06.12.2024).
14. Захаров А.И. Международный транспортный коридор «Север — Юг»: вызовы и возможности для развития транспортной связности между Россией и Индией // Вестник МГИМО-Университета. 2023. № 16 (2). С. 216–234. DOI: 10.24833/2071-8160-2023-2-89-216-234
15. Гулый И.М. Перспективы развития перевозок грузов по маршрутам мультимодального международного транспортного коридора «Север — Юг» // Экономика Центральной Азии. 2022. Т. 6, № 4. С. 341–354. DOI: 10.18334/asia.6.4.117073
16. Тихомиров А.А., Мартышкин Р.В. Основные векторы развития транспортной инфраструктуры МТК «Север — Юг» в новых макроэкономических условиях // Вестник транспорта. 2022. № 11. С. 23–24.

Дата поступления: 08.11.2024

Решение о публикации: 02.12.2024

Контактная информация:

ЖУРАВЛЕВА Наталья Александровна — докт. экон. наук, директор ИПЭБУ;

zhuravleva_na@mail.ru

КРЮКОВА Татьяна Анатольевна — начальник Управления экономики железнодорожного транспорта ИПЭБУ; vtorm2012@mail.ru

The synergy effect of transport connectivity of supply chains along the routes of the international transport corridor “North — South”: scenario analysis

N. A. Zhuravleva, T. A. Kryukova

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

For citation: Zhuravleva N. A., Kryukova T. A. Economic assessment of the impact of rail freight transportation on the efficiency of supply chains in various scenarios for the development of the international transport corridor “North — South” // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 142–154. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-142-154

Abstract

International transport corridors (ITC), as the main element of the formation of a new geo-economics, are becoming the most important object of research and development. Their impact on the economic growth of the countries adjacent to the routes, on the efficiency of cargo owners, transport operators, carriers, and infrastructure owners has no clear theoretical or empirical estimates. The **purpose** of this study is to substantiate and calculate the synergy effect indicator of transport connectivity of the North – South ITC, namely, to assess the maximum volumes of cargo transported along all ITC routes, taking into account the factors limiting its throughput and carrying capacity. **Research methods:** the scenario forecast for the development of the ITC was obtained by sampling — scenario distribution. In calculating the indicators for assessing the economic effects of the ITC routes, the method of comparing digital data with risk factors limiting rail freight flows was used. The analysis of the distance matrix for three ITC routes was used. The forecast of the estimated indicators is made by the method of dynamic analysis of successive series of indicators of rail freight transportation, characterizing each route, their changes over time. **Results:** based on the following indicators: throughput and carrying capacity of the ITC railway infrastructure; sustainable development index of the countries of the region; logistics index (customs and border clearance; quality of trade and transport infrastructure); “transportation costs” — the contingency effects were calculated, reflecting the maximum volumes of transported goods, taking into account the connectivity of infrastructure and modes of transport along all routes of the North – South ITC. **Practical significance:** scenario calculation of contingency effects along the ITC routes can be used in projects for the development of the transport and logistics infrastructure of the ITC, since it allows assessing the effects of growth in freight throughput.

Keywords: contingency effect, transport framework, international transport corridors.

References

1. Verigo S.A., Pozdnyakova T.I., Kudryashov A.B. Mezhdunarodnyj transportnyj koridor “Sever — Yug”: problemy i perspektivy // *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra*. 2024. T. 14. № 4A. S. 492–502. (In Russian)
2. Mezhdunarodnye transportnye koridory na evrazijskom prostranstve: razvitie shirotnyh marshrutov. URL: <https://index1520.com/analytics/mezhdunarodnye-transportnye-koridory-na-evrazijskom-prostranstve-razvitie-shirotnykh-marshrutov/> (data obrashcheniya: 08.10.2024). (In Russian)
3. Milyoshkina Yu. I., Hisamova A. A. Mezhdunarodnyj transportnyj koridor “Sever — Yug” — klyuchevoj element transportnogo karkasa i “nojvoj” logistiki // *Molodoj uchenyj*. 2023. No. 5 (452). S. 181–183. (In Russian)
4. Mezhdunarodnyj transportnyj koridor “Sever — Yug”: sozdanie transportnogo karkasa Evrazii: doklad 21/5 / E. Vinokurov. Almaty, M.: Evrazijskij bank razvitiya, 2021. URL: <https://eabr.org/analytics/special-reports> (data obrashcheniya: 10.11.2024). (In Russian)
5. 1520 International. Rossiya i BRIKS stroyat logistiku budushchego // *Mezhdunarodnyj transportnyj koridor ot Baltiki do Indijskogo okeana: cifry, karty, prognozy*. URL: <https://1520international.com/content/2024/iyul-2024/the-north-south-corridor-how-russia-and-the-brics-are-shaping-eurasia-s-global-logistics/> (data obrashcheniya: 06.12.2024). (In Russian)
6. Dolya Azii v eksporte RF prevysila 70 % // *Kommersant*. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6508829> (data obrashcheniya: 06.12.2024). (In Russian)
7. Vneshnetorgovoe sal'do RF po itogam 2023 goda sostavilo \$140 mlrd // *Kommersant*. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6508330> (data obrashcheniya: 06.12.2024). (In Russian)
8. Perspektivy razvitiya perevozok gruzov po marshrutam mul'timodal'nogo mezhdunarodnogo transportnogo koridora “Sever — Yug”. URL: <https://1economic.ru/lib/117073> (data obrashcheniya: 29.11.2024). (In Russian)
9. Iz varyag v persy: perspektivy razvitiya transportnogo koridora “Sever — Yug”. URL: <https://spec.rzd-partner.ru/page46841705.html> (data obrashcheniya: 06.12.2024). (In Russian)
10. MTK “Sever — Yug”: ot zamysla k realizacii // *Morskie vesti Rossii*. URL: <https://morvesti.ru/analitika/1685/106899/> (data obrashcheniya: 06.12.2024). (In Russian)
11. Kolya v bol'shuyu igru: chto zabotit partnerov Rossii po koridoru “Sever — Yug” // *Kommersant*. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6030407> (data obrashcheniya: 06.12.2024). (In Russian)
12. Prognoznij gruzopotok po MTK “Sever — Yug” k 2030 godu prevysit 32 mln tonn // *TASS*. URL: <https://tass.ru/ekonomika/18786749> (data obrashcheniya: 06.12.2024). (In Russian)
13. Otkrytye dannye Vsemirnogo banka. Indikatory. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/> (data obrashcheniya: 06.12.2024). (In Russian)
14. Zaharov A. I. Mezhdunarodnyj transportnyj koridor “Sever — Yug”: vyzovy i vozmozhnosti dlya razvitiya transportnoj svyaznosti mezhdru Rossiej i Indiej // *Vestnik MGIMO-Universiteta*. 2023. No. 16 (2). S. 216–234. DOI: 10.24833/2071-8160-2023-2-89-216-234 (In Russian)

15. Gulyj I.M. Perspektivy razvitiya perevozok gruzov po marshrutam mul'timodal'nogo mezhdunarodnogo transportnogo koridora “Sever — Yug” // *Ekonomika Central'noj Azii*. 2022. T. 6, no. 4. S. 341–354. DOI: 10.18334/asia.6.4.117073 (In Russian)

16. Tihomirov A. A., Martyshkin R. V. Osnovnye vektory razvitiya transportnoj infrastruktury MTK “Sever — Yug” v novyh makroekonomicheskikh usloviyah // *Vestnik transporta*. 2022. No. 11. S. 23–24. (In Russian)

Received: 08.11.2024

Accepted: 02.12.2024

Author’s information:

Natalia A. ZHURAVLEVA — Dr. Sci. in Economics, Director of IPEBU; zhuravleva_na@mail.ru

Tatyana A. KRYUKOVA — Head of the Department of Economics of Railway Transport of IPEBU; vtorm2012@mail.ru

УДК 338.24

Методы оценки экономической безопасности в организациях электроэнергетики при реализации инвестиционных проектов

Р. Г. Романова, Т. П. Сацук

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

Для цитирования: Романова Р. Г., Сацук Т. П. Методы оценки экономической безопасности в организациях электроэнергетики при реализации инвестиционных проектов // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 155–162. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-155-162

Аннотация

Цель: рассмотреть статистику электроэнергетической отрасли в текущий период времени, выявить актуальные угрозы, предложить инструмент снижения негативного влияния представленных угроз, охарактеризовать существующие методы оценки экономической безопасности в процессе инвестирования, предложить авторский метод оценки экономической безопасности электроэнергетической организации. **Методы:** анализ и синтез, экономико-статистические подходы, расчетно-конструктивные методы, экспертные оценки. **Результаты:** определен недостаток финансирования инвестиционных проектов в электроэнергетике, что в условиях санкционного давления со стороны западных стран является ключевой угрозой экономической безопасности организации. Выделены проблемные направления, задающие вектор для инвестирования. Оценены существующие подходы к оценке инвестирования, выявлена невозможность их применения для формирования адекватной оценки инвестирования для электроэнергетических компаний. Предложен авторский метод оценки экономической безопасности организации, включающий в себя оценку эффективности инвестиционного проекта, рассчитанную с помощью метода реальных опционов, учитывающего размер предотвращенного ущерба. **Практическая значимость:** показана необходимость поиска новых методов оценки экономической безопасности, учитывающих специфику деятельности и особенности функционирования электроэнергетической компании.

Ключевые слова: экономическая безопасность, эффективность инвестирования, метод реальных опционов, угрозы электроэнергетической отрасли, предотвращенный ущерб.

Введение

Российская электроэнергетика находится в настоящее время на переходном этапе применения политики внедрения возобновляемых источников энергии в планировании развития отрасли в долгосрочном периоде. Введение санкций со стороны западных стран в отношении России оказало негативный эффект на функционирование электроэнергетического комплекса.

Износ используемого оборудования в электрических сетях составляет 46%. Повышенный износ и аварийность увеличивают рост потребления электрической энергии и увеличивают сроки ремонта. Недостаток квалифицированного персонала для обслуживания сетей является дополнительной предпосылкой для снижения объемов бесперебойного обеспечения электрической энергией промышленных

предприятий. Климатические изменения и перераспределение производственных мощностей по территории Российской Федерации приводят к увеличению мощности и аварийности на электрических станциях.

В мае 2024 года президентом Российской Федерации В. В. Путиным было проведено совещание по развитию топливно-энергетического комплекса. Согласно статистике, предоставленной Министерством энергетики РФ за предыдущие 20 лет, объем инвестирования в электроэнергетическую отрасль составил 2,6 трлн рублей. Инвестиционные проекты реализуются с участием более 150 холдингов, которые включают в себя не только электросетевые компании, но и организации, осуществляющие проектирование и строительство в энергетической промышленности. Несмотря на то что к инвестированию в перспективе ближайших 12 лет запланировано 6,4 трлн рублей, не планируется увеличение денежных потоков на строительство новых энергообъектов [1].

В 2024 году для электроэнергетической отрасли актуальны четыре проблемных момента:

1. Сложности надежного и бесперебойного обеспечения. Отсутствие дефицита электроэнергии позволит стабильно развивать экономику страны и бизнеса.
2. Доступность. Повышение цены на энергоресурсы снижает конкурентоспособность российской экономики и экспорта.
3. Эффективность. Остро стоит необходимость внедрения прогрессивных технологий для обеспечения устойчивой экономики в долгосрочном периоде.
4. Цифровизация. Внедрение цифровых инструментов не только на этапах генерации и распределения электрической энергии, но и в процессе взаимодействия между участниками электроэнергетического рынка.

Все компании в энергетическом комплексе России следуют общему тренду — цифровой трансформации. Она позволяет компаниям улучшать эффективность своей деятельности, создавать новые возможности для роста и развития взаимодействия с клиентами и поставщиками разнообразных предприятий и производственных линий, а также способствует росту корпоративной культуры.

Материалы и методы

Основой цифровой трансформации является значительное изменение и развитие производственных и экономических отношений в электроэнергетической отрасли с использованием цифровых подходов. Основные направления включают в себя создание общего информационного поля и концептуальной модели всей энергосистемы, разработку цифровой сети для обеспечения прозрачности и управляемости объектов электроэнергетики, внедрение единой цифровой платформы для участников отрасли и формирование архитектуры электроэнергетики.

Прежде всего, цифровая трансформация признана важным национальным приоритетом, требующим обеспечения надежного доступа к электроэнергии. Цели

стратегии полностью соответствуют этим приоритетам и гармонизированы с федеральными и ведомственными проектами, такими как Энергетическая стратегия Российской Федерации, внедрение передовых технологий, цифровые инициативы в городской среде, транспортной логистике, единая техническая политика и обеспечение надежности энергоснабжения.

Развитие цифровой трансформации в электроэнергетике России позволит определить общие цели и координацию участников отрасли. В рамках этой стратегии будут определены приоритетные направления, включая участие государства в цифровизации, использование цифровых технологий и внедрение цифровых решений в деятельность компаний. Важную роль в этом процессе играют компетенции и основные направления деятельности в области цифровой трансформации электроэнергетики.

Угрозы, существующие в настоящее время по отношению к электроэнергетике, и характеристика их негативного влияния представлены в табл. 1 [2, 3, 4].

ТАБЛИЦА. Угрозы электроэнергетической отрасли

Виды угроз	Оказываемое влияние на экономическую безопасность
Экономические	Санкции, направленные на поставщика ресурсов, понуждают к изменению выбранного политического курса из-за ограничений в пополнении денежных запасов для реализации проектов, направленных на поддержание национальной безопасности
Политические	Доступ к ограниченным ресурсам позволяет контролировать энергоснабжение, создавая для остальных участников взаимодействия на мировом уровне дополнительные трудности для выстраивания кооперативной модели сотрудничества
Технологические	Физические и технологические свойства энергии приводят к возникновению рисков природных/технических опасностей и угроз
Экологические	Изменение климата приводит к необходимости поиска дополнительных источников энергии, внедрение которых может приводить к катастрофам, наносящим вред экологии
Цифровые	Развитие систем генерации, потребления и контроля энергии ведется с применением цифровых технологий. Обмен информации посредством цифровых информационных сетей может привести к утечке информации о стратегически значимых объектах энергетического комплекса, а также оборудование может быть удаленно выведено из строя

Для нивелирования данных угроз необходимо вести эффективную инвестиционную политику в разрезе электросетевых организаций. Большинство организаций на этапе планирования инвестиционного проекта не производит расчет экономической эффективности, так как необходимый объем привлекаемых денежных средств и отдача от реализации инвестиционного проекта распределяются на период более 20 лет. Данное явление связано спецификой оборудования, составляющего электрическую сеть, и его дороговизной.

В научных работах исследователей можно отследить два похода к методам оценки эффективности инвестиционных проектов [5, 6]:

- на основании данных бухгалтерской отчетности;
- на основании прогнозных экономических показателей, рассчитываемых на основании статистических данных за предыдущие периоды и включающих в себя индексацию стоимости затрат в период реализации инвестиций.

В первую группу могут быть включены простой период окупаемости, точный период окупаемости, экстренный период окупаемости и учетная норма доходности. Данные показатели не могут быть применены в процессе оценки инвестиционного проекта в электроэнергетике, так как инвестиционные проекты несут в себе эффект повышения технических показателей электрических сетей даже при условии отсутствия экономического эффекта [7].

Во вторую группу входят норма доходности, расчет методом кумулятивного построения, метод экспертных оценок на основе статистических данных о доходности схожих инвестиционных проектов, дисконтированный период окупаемости, чистая приведенная стоимость. Несмотря на то что расчет производится с применением индексов, характеризующих изменения во времени, отсутствует гибкость в управлении проектом, в связи с чем возникают ограничения в принятии управленческих решений [8, 9].

Учитывая негативные черты применения исследованных подходов, в качестве альтернативы предлагаем производить расчет эффективности инвестиционного проекта с помощью метода реальных опционов с учетом предотвращенного ущерба в результате аварии. Предотвращенный ущерб может быть рассчитан согласно формуле:

$$\text{ЭУ} = (Y_{\text{пр}} + Y_{\text{др}} + Y_{\text{ос}} + C_{\text{л}} + Y_{\text{сз}}), \quad (1)$$

где ЭУ — величина предотвращенного ущерба, руб.;

$Y_{\text{пр}}$ — ущерб, нанесенный оборудованию электрических сетей, руб.;

$Y_{\text{др}}$ — ущерб, нанесенный организациям в связи с отсутствием бесперебойного обеспечения электрической энергией, руб.;

$Y_{\text{ос}}$ — ущерб, нанесенный окружающей среде как в результате аварии, так и от мероприятий по ее ликвидации, руб.;

$C_{\text{л}}$ — затраты на ликвидацию аварийной ситуации и анализ ее причин, руб.;

$Y_{\text{сз}}$ — ущерб, нанесенный в связи с гибелью и травматизмом людей, руб.

Несмотря на разнонаправленность показателей, расчет можно произвести, применив метод экспертных оценок на основании статистических данных за предыдущие периоды [10].

Расчет эффективности инвестиционного проекта с помощью применения метода реальных опционов производится по формуле:

$$Val = S \cdot N(d1) - K \cdot e^{-\rho \cdot T} \cdot N(d2), \quad (2)$$

где Val — эффективность (доход) по проекту, руб.;

S — стоимость ожидаемых и текущих денежных потоков от проекта, руб.;

K — затраты на проект, руб.;

ρ — безрисковая процентная ставка, %;

T — срок реализации проекта, лет;

$e^{-\rho \cdot T}$ — дисконтирующий фактор;

$N(d)$ — функция нормального распределения.

Параметры $d1$ и $d2$ определяются по формулам:

$$d1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(\rho + \frac{\sigma^2}{2}\right) \cdot T}{\sqrt{\sigma^2 \cdot T}}; \quad d2 = d1 - \sqrt{\sigma^2 \cdot T}, \quad (3)$$

где σ — стандартное отклонение (волатильность) стоимости инвестиционного проекта.

Уменьшаемое в формуле (2) $S \cdot N(d1)$ — это ожидаемая текущая стоимость актива (проекта) к моменту исполнения опциона, а вычитаемое $K \cdot e^{-\rho \cdot T} \cdot N(d2)$ — это ожидаемая величина затрат на реализацию инвестиционного проекта.

Тогда параметр S может быть оценен как ЭУ. Общий параметр, отвечающий за эффекты, — это ef .

Результаты исследования

Справедливо ввести авторский показатель эффективности инвестиционного проекта с учетом влияния эффектов $Ef1$, рассчитываемый по формуле:

$$Ef1 = \frac{Val1 - Val}{Val} \cdot 100\%, \quad (4)$$

при этом $Val1$ оценивается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Val1 &= [\text{ЭУ} + ef] \cdot N(d1) - K \cdot e^{-\rho \cdot T} \cdot N(d2); \\ d1 &= \frac{\ln\left(\frac{\text{ЭУ} + ef}{K}\right) + \left(\rho + \frac{\sigma^2}{2}\right) \cdot T}{\sqrt{\sigma^2 \cdot T}}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $Val1$ — эффективность (доход) по проекту с учетом эффектов этого проекта, руб.

Составленная система уравнений позволит прогнозировать изменения эффективности инвестиционного проекта в зависимости от объема необходимых затрат, изменяющихся в процессе периода его реализации.

Исходя из определения экономической безопасности организации, подразумевающей наиболее эффективное использование ресурсов для обеспечения защищенности от внутренних и внешних угроз, оценка эффективности инвестиционного проекта предложенным методом в электроэнергетической организации может быть использована как элемент интегрального показателя экономической безопасности инвестирования.

Библиографический список

1. Минэнерго РФ. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/433>
2. Дорохова М. В. Подходы к регулированию рисков экономической безопасности государства, возникающие в результате распространения цифровых экосистем // Экономическая безопасность. 2022. № 2. Т. 5. С. 695–710.
3. Коломыцева О. Ю. Экономические санкции как вызов экономической безопасности Российской промышленности // Известия СПбГЭУ. 2024. № 1(145). С. 92–97.
4. Круглова И. А., Гнатюк А. А. Сценарии энергетического перехода как фактор экономической безопасности России // Ученые записки Международного банковского института. 2024. № 1(47). С. 133–148.
5. Миэринь Л. А., Погодина В. В., Смирнов А. А. Технологический суверенитет как условие долгосрочной национальной экономической безопасности // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2023. № 6-1(144). С. 63–70.
6. Медведева Н. В. Новые инструменты привлечения инфраструктурных инвестиций в экономику региона // Власть и управление на Востоке России. 2022. № 3(100). С. 87–100.
7. Поздеев В. Л. Экономическая безопасность предприятия: угрозы и меры защиты // Инновационное развитие экономики. 2016. № 6(36). Ч. 2. С. 277–280.
8. Семешина Н. Т. Преимущества устойчивого инвестирования // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. 2019. № 6(79). С. 237–244.
9. Терехина Д. А., Подольская Т. В. Методы обеспечения экономической безопасности предприятия // Вестник науки. 2024. № 6(75). С. 364–371.
10. Яниогло А. Комплексная система обеспечения экономической безопасности предприятия // Экономика сельского хозяйства и ресурсов. 2015. № 1. Т. 1. С. 69–79.

Дата поступления: 01.11.2024

Решение о публикации: 29.11.2024

Контактная информация:

РОМАНОВА Рената Геннадьевна — ассистент; rehaha423@gmail.com

САЦУК Татьяна Павловна — докт. экон. наук, профессор; stp13@mail.ru

Methods for assessing the economic security of an electric power organization during the investment process

R. G. Romanova, T. P. Satsuk

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

For citation: Romanova R. G., Satsuk T. P. Methods for assessing the economic security of an electric power organization during the investment process // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 155–162. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-155-162

Abstract

Purpose: to review the statistics of the electric power industry in the current period of time, identify current threats, propose a tool to reduce the negative impact of the threats presented, characterize existing methods of assessing economic security in the investment process, propose an author's method of assessing the economic security of an electric power organization. **Methods:** methods of analysis and synthesis, economic and statistical approaches, computational and constructive methods, expert assessments. **Results:** the lack of financing of investment projects in the electric power industry has been identified, which, under the conditions of sanctions pressure from Western countries, is a key threat to the economic security of the organization. The problematic areas that set the vector for investment are highlighted. The existing approaches to investment assessment are evaluated, the impossibility of their application to form an adequate investment assessment for electric power companies is revealed. The author's method of assessing the economic security of an organization is proposed, which includes an assessment of the effectiveness of an investment project calculated using the method of real options, taking into account the amount of damage prevented. **Practical importance:** the necessity of searching for new methods of assessing economic security, taking into account the specifics of the activity and functioning of an electric power company, is shown.

Keywords: economic security, investment efficiency, real options method, threats to the electric power industry, prevented damage.

References

1. Minenergo RF. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/433> (In Russian)
2. Dorohova M. V. Podhody k regulirovaniyu riskov ekonomicheskoy bezopasnosti gosudarstva, vznikayushchie v rezul'tate rasprostraneniya cifrovyyh ekosistem // Ekonomicheskaya bezopasnost'. 2022. No. 2. T. 5. S. 695–710. (In Russian)
3. Kolomyceva O. Yu. Ekonomicheskie sankcii kak vyzov ekonomicheskoy bezopasnosti Rossijskoj promyshlennosti // Izvestiya SPbGEU. 2024. No. 1(145). S. 92–97. (In Russian)
4. Kruglova I. A., Gnatyuk A. A. Scenarii energeticheskogo perekhoda kak faktor ekonomicheskoy bezopasnosti Rossii // Uchenye zapiski Mezhdunarodnogo bankovskogo instituta. 2024. No. 1(47). S. 133–148. (In Russian)
5. Mierin' L. A., Pogodina V. V., Smirnov A. A. Tekhnologicheskij suverenitet kak uslovie dlongosrochnoj nacional'noj ekonomicheskoy bezopasnosti // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. 2023. No. 6-1(144). S. 63–70. (In Russian)
6. Medvedeva N. V. Novye instrumenty privlecheniya infrastruktturnyyh investitsij v ekonomiku regiona // Vlast' i upravlenie na Vostoke Rossii. 2022. No. 3(100). S. 87–100. (In Russian)

7. Pozdeev V.L. Ekonomicheskaya bezopasnost' predpriyatiya: ugrozy i mery zashchity // Innovacionnoe razvitie ekonomiki. 2016. No. 6(36). Ch. 2. S. 277–280. (In Russian)
8. Semeshina N.T. Preimushchestva ustojchivogo investirovaniya // Vestnik Belgorodskogo universiteta kooperacii, ekonomiki i prava. 2019. No. 6(79). S. 237–244. (In Russian)
9. Terekhina D.A., Podol'skaya T.V. Metody obespecheniya ekonomicheskoy bezopasnosti predpriyatiya // Vestnik nauki. 2024. No. 6(75). S. 364–371. (In Russian)
10. Yanioglo A. Kompleksnaya sistema obespecheniya ekonomicheskoy bezopasnosti predpriyatiya // Ekonomika sel'skogo hozyajstva i resursov. 2015. No. 1. T. 1. S. 69–79. (In Russian)

Received: 01.11.2024

Accepted: 29.11.2024

Author's information:

Renata G. ROMANOVA — Assistant; rehaha423@gmail.com

Tatyana P. SATSUK — Dr. Sci. in Economics, Professor; stp13@mail.ru

УДК 338.47

Создание критериев экономической безопасности предприятия на основе методики учета рисков Value at Risk

Сюзэ Нью

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

Для цитирования: Нью Сюзэ. Создание критериев экономической безопасности предприятия на основе методики учета рисков Value at Risk // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 163–172. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-163-172

Аннотация

Цель: продемонстрировать применение методики анализа рисков VaR при возникновении таких рисков. **Методы:** статистические модели на основе моделирования экономических процессов предприятия. **Результаты:** в соответствии с проведенными исследованиями выявлено, что в современных условиях у предприятий пищевой отрасли возрастают угрозы экономической безопасности. Выявлено, что направления возникновения новых угроз и проблем совпадают с созданием критериев экономической безопасности на основе современных исследовательских экономико-статистических инструментов, одним из которых является метод Value at Risk (VaR) — стоимость под риском. Применены современные методы определения рисков, разработана авторская методика адаптации этих методов в современных условиях для пищевого предприятия для установления пороговых значений критериев экономической безопасности. Уточнено понятие «экономическая безопасность» с учетом современных мировых реалий применения глобальными конкурентами как «жесткой», так и «мягкой» силы, а также с учетом социалистического характера производства объекта исследования (китайского мясоперерабатывающего предприятия) в связи с обеспечением факторов общего благополучия населения, густонаселенностью страны, достижением целей устойчивого развития при экономии издержек, взаимосвязью безопасности отдельного предприятия с экономической и продовольственной безопасностью всей страны. **Практическая значимость:** разработанные методы повышения экономической безопасности, созданные на основе методики учета рисков Value at Risk, критерии экономической безопасности предприятия расширяют и дополняют информационную базу и статистические данные по управлению рисками экономической безопасности и устранению угроз в условиях экономической неопределенности и разрушения стоимости регионального предприятия пищевой отрасли по выращиванию племенного стада и переработке мяса.

Ключевые слова: экономическая безопасность, методика анализа рисков VaR, стоимость под риском, критерии экономической безопасности, стоимостная оценка.

Введение

Понятие «экономическая безопасность» в последние годы получает большое внимание в исследованиях российских и зарубежных ученых-экономистов. Оно складывается под влиянием применения глобальными конкурентами как «жесткой», так и «мягкой» силы [1]. В результате исследования многочисленных научных работ в сфере экономической безопасности автором было уточнено само определение экономической безопасности с учетом социалистического характера

производства базового при проведении исследования китайского мясоперерабатывающего предприятия [3]. Эти предприятия в соответствии с российским и китайским отраслевыми классификаторами относятся к мясной промышленности [13]. Сама отрасль мясной промышленности, в свою очередь, является отраслью пищевой промышленности. Поэтому, говоря об экономической безопасности мясоперерабатывающих предприятий, мы говорим об экономической безопасности пищевых предприятий. Пищевое предприятие — это предприятие, идентифицируемое по российским стандартам отнесения предприятий к той или иной отрасли как предприятие по производству пищевых продуктов.

Номер общероссийского классификатора видов экономической деятельности «Отрасли народного хозяйства» (ОКОНХ) — 10. Экономическая безопасность в контексте отрасли также связана с обеспечением факторов общего благополучия населения [14], густонаселенностью страны [9], достижением целей устойчивого развития при экономии издержек [4], взаимосвязью безопасности отдельного предприятия с безопасностью всей страны [5].

При этом ключевым моментом является связь механизмов экономической безопасности со стоимостным фактором, который является регулирующим и управляющим элементом в системе мероприятий по разработке и обеспечению безопасности [7]. Стоимостной аспект является особенно важным в условиях после пандемии COVID-19, когда появились и устойчиво начали существовать угрозы цепочкам создания стоимости в контексте безопасности. Особенности аспекты, связанные с сельскохозяйственным, пищевым характером предприятия, проявляются во взаимосвязи экономической безопасности пищевого предприятия и продовольственной безопасности страны [10].

Материалы и методы

В соответствии с созданной авторской методикой критерии экономической безопасности пищевого предприятия определяются путем измерения рыночной стоимости предприятия. Затем рассчитывается ущерб этой стоимости предприятия под действием рисков разрушения экономической безопасности. Выделяются и классифицируются риски. Их измерение происходит на основе методики учета рисков Value at Risk, широко применяемой в современных научных исследованиях.

В основе методики Value at Risk (VaR, стоимость под риском) лежит постановка вопроса о значении, которое считается экстремальным и описывается квантилем [11, 12]. Квантиль используется при заданном уровне доверия α [2]. Ответ на вопрос об уровне доверия α дается с помощью вопроса о проценте событий, которые превышают это значение [6]. В разработанной методике это такие показатели, как сбои поставок зерна (основного сырья при производстве свинины), задержки закупок и привоза другого сырья, комплектующих, запасных частей, нового стада для разведения породы.

Отдельно рассчитывается влияние на стоимость конъюнктурных изменений, связанных с колебанием цен на зерно, готовую продукцию. Также с помощью методики Value at Risk оценивается влияние технологических рисков, выражающихся в простоях оборудования.

Методика Value at Risk предоставляет одну из наиболее важных мер риска в финансовой практике. Эта мера описывает сумму, которая с заданной вероятностью не будет превышена в течение определенного периода времени [2].

С математической точки зрения величина риска — это квантиль распределения вероятности или распределения выборки [6].

В экономике риск понимается как отклонение от ожидаемого значения. Поэтому часто рассматривается средняя стоимость под риском (Mean Value at Risk, MVaR) [8]. Средняя стоимость под риском не зависит от ожидаемого значения. Она получается путем вычитания ожидаемого значения из VaR. На практике термины Value at Risk и Mean Value at Risk часто не различаются.

В методике при определении стоимости под риском на основе исторических данных определяемые стоимостные ориентиры в относительных величинах были признаны более подходящими, чем величины, измеряемые в денежных единицах, абсолютные величины. Причина этого заключается в том, что относительные величины, как правило, имеют постоянное ожидаемое значение и постоянную дисперсию по сравнению с абсолютными величинами.

В методике значение Value at Risk рассчитывается для дискретного распределения вероятности, то есть оно применяется к выбранному временному интервалу базовых данных. Дискретная доходность основана на ежедневных данных, рассчитанная Value at Risk применяется к одному дню. Масштабирование до недельных, месячных, квартальных или годовых значений для Value at Risk невозможно при наличии дискретного распределения вероятности. Поэтому в методике оно не проводится. Это возможно только при непрерывном распределении вероятности.

Также в методике применяется допущение о том, что, в отличие от Value at Risk, Conditional Value at Risk удовлетворяет всем условиям для последовательной меры риска. В частности, условная стоимость риска является субаддитивной, что не соответствует условию VaR.

Дополнительно в методике понимается, что стоимость под риском и условная стоимость тесно связаны между собой. Если Value at Risk показывает, какой ущерб экономической безопасности под влиянием рисков будет причинен не более чем в $(100 \cdot \alpha)\%$ случаев, то Conditional Value at Risk показывает, насколько высок ущерб экономической безопасности в $(100 \cdot \alpha)\%$ случаев с наибольшим ущербом. Таким образом, CVaR показывает, насколько высок будет ожидаемый убыток, если произойдет непредвиденный случай (превышение стоимости под риском).

Модели и меры риска, примененные в методике, основаны на собранных на предприятия данных. Эти данные могут неточно отражать реальность. Поэтому

при применении методики важно проверять используемые меры риска и модели на их историческую точность. Одним из подходов, примененных для этого, является бэктестинг.

Бэктестинг проверяет, насколько хорошо Value at Risk предсказала фактический исторический риск. Наблюдаемые при этом превышения VaR называются исключениями. При применении бэктестинга необходимо проверять, является ли количество исключений достаточным для опровержения предположений для заданного VaR. Для этого используется известный из статистики тест на значимость.

Расчеты критериев экономической безопасности

По каждому из вышеперечисленных показателей рисков собирается статистика за прошлые периоды. Сортировка происходит в зависимости от направления влияния факторов на ущерб экономической безопасности.

В табл. 1 приведены отсортированные значения колебаний цен на зерно. Всего данные взяты за 3,5 года. Данные отсортированы от минимальных, отрицательных значений до максимальных положительных. В таблице приведены десять интервальных значений для иллюстрации разброса данных.

ТАБЛИЦА 1. Отсортированные значения колебаний цен на зерно

№ п/п	Дата	Отсортированные колебания цен на зерно (%)
1	26.08.2021	-49,52
36	24.03.2022	-22,91
85	05.06.2022	-16,23
260	13.02.2022	-7,54
303	11.01.2024	-6,45
495	20.02.2024	-1,95
526	01.04.2022	-1,50
638	12.05.2022	0,00
893	06.02.2024	3,56
1293	16.08.2022	31,95

Со времен COVID-19 в мировой торговле наибольшие риски и угрозы ущерба разрушения стоимости, снижения экономической безопасности стали возникать при крушении логистических цепочек. Этот фактор был отдельно исследован в статистике предприятия и нашел отражение в показателе сбоя поставок. В табл. 2 приведены отсортированные значения неритмичности поставок, ухудшающие работу предприятия. Как и в предыдущем случае, приведены несколько значений

за весь период статистики за 3,5 года работы предприятия, отсортированные от минимальных отрицательных значений до положительных.

ТАБЛИЦА 2. Отсортированные показатели неритмичности поставок

№ п/п	Дата	Отсортированные сбои поставок (%)
1	25.08.2020	-51,16
61	27.11.2021	-17,23
167	26.05.2021	-8,02
444	06.08.2021	-0,89
698	16.02.2020	0,05
1105	23.05.2021	0,97
1303	06.07.2021	6,16

Для измерения конъюнктурных рисков, рисков, разрушающих стоимость и угрожающих экономической безопасности со стороны сбыта, были выбраны показатели колебания цен на готовую продукцию. Для анализируемого предприятия это цена на свиные полутуши [15]. Аналогичные данные по ним приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Отсортированные изменения цен на готовую продукцию

№ п/п	Дата	Отсортированные колебания цен на готовую товарную продукцию пищевого предприятия (%)
1	26.08.2021	-12,38
114	14.04.2022	-3,51
213	24.10.2021	-2,27
312	29.09.2022	-1,58
455	07.05.2021	-0,75
613	19.08.2021	-0,05
771	18.11.2023	0,44
1182	10.10.2023	3,09
1296	10.10.2021	10,08
1303	07.07.2022	14,91

По такой же методике были выбраны и отсортированы данные по технологическим сбоям. В данном случае измерителем технологических сбоев были выбраны отклонения фактического выпуска от планового. Были собраны данные за 3,5 года и представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Отсортированные технологические сбои

№ п/п	Дата	Отсортированные данные по технологическим сбоям (%)
1	09.07.2022	-36,05
65	04.09.2023	-3,85
208	15.11.2021	-1,99
351	11.12.2021	-1,06
472	22.04.2023	-0,51
938	11.02.2023	0,89
1250	05.12.2023	3,78
1278	12.12.2023	5,23
1301	10.07.2024	11,22
1302	26.07.2024	12,32
1303	21.01.2023	114,84

Данные получены за 3,5 года и отсортированы от минимальных отрицательных значений до максимальных положительных. В таблице приведены несколько интервальных значений для иллюстрации разброса данных.

Затем в соответствии с вышеописанной методикой проведены расчеты по исследованным показателям, и их результаты представлены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Дискретный доход по методике Value at Risk по выделенным показателям

Показатель	Изменения цен на основное сырье (%)	Неритмичность поставок (%)	Конъюнктурные неблагоприятные изменения (%)	Технологические сбои (%)
Уровень достоверности	95	95	95	95
Альфа	5	5	5	5
Количество значений	236	236	236	236
Квантиль α	-18,10	-16,60	-4,53	-3,81
VaR дискр. доход, п	18,10	16,60	4,53	3,81

Value at Risk в контексте данного исследования измеряет риск возможного ущерба стоимости как наибольшее разрушение стоимости, которое не будет превышено с вероятностью 95%. Для того чтобы ее количественно измерить, в расчет вводятся дополнительные параметры, указанные для каждого из факторов риска в табл. 6.

ТАБЛИЦА 6. Стоимостные расчетные параметры для оценки степени ущерба экономической безопасности по стоимостным критериям

Показатель	Изменения цен на основное сырье	Неритмичность поставок	Конъюнктурные неблагоприятные изменения	Технологические сбои
Измеряемый по методике VaR показатель	Цена одной тонны зерна	Общий фонд рабочего времени, часы	Цена готовой продукции	Общий фонд рабочего времени, часы
Вспомогательный показатель, для оценки влияния на стоимость	Количество закупаемого зерна, тонны в год	Стоимость одного часа работы	Выручка, условные тонны готовой продукции	Стоимость одного часа

Результаты исследования

Проведем оценку влияния факторов риска на экономическую безопасность предприятия по критерию стоимости. Общее влияние всех выявленных рисков на экономическую безопасность по стоимостному критерию оценивается по формуле:

$$C = \sum_{k=0}^n \Pi(\text{VaR}) \cdot \Pi(C),$$

где C — общее влияние рисков на стоимость;

$\Pi(\text{VaR})$ — значение показателя, рассчитанное по методике Value at Risk, с соответствующим знаком;

$\Pi(C)$ — показатель, оценивающий стоимостное влияние.

В итоговый расчет были добавлены еще экологические риски, рассчитанные аналогично вышеописанным. Влияние факторов было оценено на базовом сценарии работы пищевого предприятия (свинокомплекса) с годовой выручкой 1 млрд денежных единиц и прибылью 100 млн денежных единиц (табл. 7).

ТАБЛИЦА 7. Оценка влияния факторов риска на экономическую безопасность пищевого предприятия (свинокомплекса)

Факторы риска, разрушающие стоимость	Оценка ущерба экономической безопасности по стоимостному критерию, млн ден. ед.	Доля в общем ущербе экономической безопасности, %
Факторы стоимости поставок сырья	11	9,09
Факторы разрушения логистических цепочек поставок	84	69,42
Рыночные факторы конъюнктуры	4	3,31
Технологические сбои	19	15,70
ESG-факторы	3	2,48

С использованием созданной автором методики учета рисков Value at Risk определены диапазоны критериев экономической безопасности в виде пороговых значений, которые могут использоваться для разработки конкретного плана организационно-экономических мероприятий по повышению экономической безопасности.

Библиографический список

1. Андропова И. В., Ганеева М. В. Евразийский экономический союз: внешние угрозы экономической безопасности («жесткая» и «мягкая» сила российских оппонентов) // Большая Евразия: Развитие, безопасность, сотрудничество. Ежегодник / ИНИОН РАН. 2018. С. 175–180.
2. Афонин Д. Н. Применение критерия var (value at risk) в системе управления таможенными рисками // Бюллетень инновационных технологий. 2021. Т. 5. № 2(18). С. 56–57.
3. Васильева Л. П. Экономическая безопасность: определение и сущность // Журнал прикладных исследований. 2020. № 3. С. 6–13.
4. Гиоев Г. В. Факторы обеспечения экономической безопасности // Вестник экономической безопасности. 2021. № 5. С. 282–288.
5. Гудков А. А., Миронюк А. А. Концепция финансовой безопасности промышленного предприятия // Управление финансовыми рисками. 2016. № 4(48). С. 298–311.
6. Дробыш И. И. Модели value at risk в оценке рыночных рисков // Аудит и финансовый анализ. 2015. № 4. С. 101–112.
7. Заболоцкая В. В., Бордиян Л. В. Методологические аспекты оценки финансовой безопасности и устойчивости малых сельскохозяйственных и торговых предприятий // Региональная экономика: теория и практика. 2017. Т. 15. Вып. 11. С. 2167–2186.
8. Землянский Г. С., Быков И. В., Кульчицкая К. И. Анализ эффективности использования метрики value at risk при оценке товарных рисков // Матрица научного познания. 2021. № 1-1. С. 97–104.
9. Казакова Н. А., Иванова А. Н. Финансовая безопасность компании: аналитический аспект // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 10(457). С. 93–105.
10. Каранина Р. В. Финансовая безопасность (на уровне государства, региона, предприятия, личности): монография. Киров: ФГБОУ ВО «ВятГУ». 2015. 239 с.
11. Belhad A., Lauria D., Trindade A. A. Nonparametric estimation of systemic risk via conditional value-at-risk // Journal of Risk. 2022. No. 34. P. 34–50.
12. Broll U., Förster A. Market risk, value-at-risk and exponential weighting // Economics and Business Review. 2022. Vol. 8. No. 2. P. 80–91.
13. Yuquan Ch., Xiaohua Yu. Does the centralized slaughtering policy create market power for pork industry in China? // China Economic Review. 2018. Vol. 50. P. 59–71.
14. Hengyu L., Kai Zh. Analysis of the Chinese government's subsidy programs to restore the pork supply chain: The case of African swine fever // Omega. 2024. Vol. 124. P. 950–980.
15. Emerging market for pork with animal welfare attribute in China: An ethical perspective / L. Yaoming [et al.] // Meat Science. 2023. Vol. 195. P. 940–994.

Дата поступления: 08.10.2024

Решение о публикации: 11.11.2024

Контактная информация:

НЮ Сюэкэ — аспирант; niuke2022@mail.ru

Creation of criteria for economic security of an enterprise based on the risk accounting methodology Value at Risk

Xueke Niu

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

For citation: Niu Xueke. Creation of criteria for economic security of an enterprise based on the risk accounting methodology Value at Risk // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 163–172. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-163-172

Abstract

Purpose: to demonstrate the application of the VaR risk analysis methodology when such risks arise. **Methods:** statistical models based on modeling of economic processes of the enterprise. **Results:** in accordance with the conducted research, it was revealed that in modern conditions, the economic security threats to food industry enterprises are increasing. It was revealed that the directions of emergence of new threats and problems coincide with the creation of economic security criteria based on modern research economic and statistical tools, one of which is the Value at Risk (VaR) method — value at risk. Modern methods of risk determination were applied, and the author's methodology for adapting these methods to modern conditions for a food enterprise to establish threshold values of economic security criteria was developed. The concept of economic security has been clarified taking into account the modern world realities of the use of both “hard” and “soft” power by global competitors, taking into account the socialist nature of production, characteristic of the object of study, a Chinese meat processing plant, in connection with ensuring factors of general well-being of the population, the dense population of the country, achieving sustainable development goals while saving costs, the connection of the security of an individual enterprise with the economic and food security of the entire country. The terminology of economic security has been clarified taking into account the modern world realities of the use of both “hard” and “soft” power by global competitors, taking into account the socialist nature of production, characteristic of the object of study, a Chinese meat processing plant, in connection with ensuring factors of general well-being of the population, the dense population of the country, achieving sustainable development goals while saving costs, the connection of the security of an individual enterprise with the economic and food security of the entire country. **Practical importance:** the developed methods for increasing economic security, created on the basis of the Value at Risk risk accounting methodology, economic security criteria of the enterprise expand and supplement the information base and statistical data on economic security risk management and threat elimination in conditions of economic uncertainty and destruction of the value of a regional food industry enterprise for breeding stock and meat processing.

Keywords: economic security, VaR risk analysis methodology, value at risk, economic security criteria, valuation.

References

1. Andronova I. V., Ganeeva M. V. Evrazijskij ekonomicheskij soyuz: vneshnie ugrozy ekonomicheskoy bezopasnosti (“zhestkaya” i “myagkaya” sila rossijskih opponentov) // Bol'shaya

Evraziya: Razvitie, bezopasnost', sotrudnichestvo. Ezhegodnik / INION RAN. 2018. S. 175–180. (In Russian)

2. Afonin D.N. Primenenie kriteriya var (value at risk) v sisteme upravleniya tamozhennymi riskami // Byulleten' innovacionnyh tekhnologij. 2021. T. 5. No. 2(18). S. 56–57. (In Russian)

3. Vasil'eva L.P. Ekonomicheskaya bezopasnost': opredelenie i sushchnost' // Zhurnal prikladnyh issledovanij. 2020. No. 3. S. 6–13. (In Russian)

4. Gioev G.V. Faktory obespecheniya ekonomicheskoy bezopasnosti // Vestnik ekonomicheskoy bezopasnosti. 2021. No. 5. S. 282–288. (In Russian)

5. Gudkov A.A., Mironyuk A.A. Konceptiya finansovoj bezopasnosti promyshlennogo predpriyatiya // Upravlenie finansovymi riskami. 2016. No. 4(48). S. 298–311. (In Russian)

6. Drobysh I.I. Modeli value at risk v ocenke rynochnyh riskov // Audit i finansovyj analiz. 2015. No. 4. S. 101–112. (In Russian)

7. Zabolockaya V.V., Bordiyani L.V. Metodologicheskie aspekty ocenki finansovoj bezopasnosti i ustojchivosti malyh sel'skohozyajstvennyh i torgovyh predpriyatij // Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika. 2017. T. 15. Vyp. 11. S. 2167–2186. (In Russian)

8. Zemlyanskij G.S., Bykov I.V., Kul'chickaya K.I. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya metriki “value at risk” pri ocenke tovarnyh riskov // Matrica nauchnogo poznaniya. 2021. № 1-1. S. 97–104. (In Russian)

9. Kazakova N.A., Ivanova A.N. Finansovaya bezopasnost' kompanii: analiticheskij aspekt // Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika. 2016. № 10(457). S. 93–105. (In Russian)

10. Karanina R.V. Finansovaya bezopasnost' (na urovne gosudarstva, regiona, predpriyatiya, lichnosti): monografiya. Kirov: FGBOU VO “VyatGU”. 2015. 239 s. (In Russian)

11. Belhad A., Lauria D., Trindade A.A. Nonparametric estimation of systemic risk via conditional value-at-risk // Journal of Risk. 2022. No. 34. P. 34–50.

12. Broll U., Förster A. Market risk, value-at-risk and exponential weighting // Economics and Business Review. 2022. Vol. 8. No. 2. P. 80–91.

13. Yuquan Ch., Xiaohua Yu. Does the centralized slaughtering policy create market power for pork industry in China? // China Economic Review. 2018. Vol. 50. P. 59–71.

14. Hengyu L., Kai Zh. Analysis of the Chinese government's subsidy programs to restore the pork supply chain: The case of African swine fever // Omega. 2024. Vol. 124. P. 950–980.

15. Emerging market for pork with animal welfare attribute in China: An ethical perspective / L. Yaoming [et al.] // Meat Science. 2023. Vol. 195. P. 940–994.

Received: 08.10.2024

Accepted: 11.11.2024

Author's information:

Xueke NIU — Postgraduate Student; niuke2022@mail.ru