

Главный редактор А. М. Евстафьев, д-р техн. наук, профессор
Editor-in-chief A. Evstafev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Заместитель главного редактора А. К. Канаев, д-р техн. наук, профессор
Deputy chief editor A. Kanayev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Научный редактор Т. С. Титова, д-р техн. наук профессор
Scientific Editor T. Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Перевод на английский язык А. А. Лобанова
English translation Anastasia A. Lobanova
Литературное редактирование и корректура Н. В. Юдина
Editing and proofreading Nadezhda V. Yudina
Верстка И. Г. Иваньшина
Layout Irina G. Ivanshina

Учредитель

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

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Центр РИОР» по договору № ЭА94514 от 19.12.2022

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Limited Liability Company "Publishing Center RIOR", under contract N ЭА94514 dated 19.12.2022

Контакты

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

Contacts

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Mass media registration certificate number

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

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

Журнал имеет институт рецензирования

The Journal has the Peer-review division

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

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

Минимальные системные требования

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

INTERNATIONAL EDITORIAL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

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

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

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

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

Файл 1 – рукопись научной статьи в формате MS Word.

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

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

Файл 4 – информация об авторах:

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

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

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

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

Файл 8 – лицензионный договор.

1.5 Все рукописи проходят рецензирование (внешняя экспертная оценка).

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

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

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

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

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

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

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

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

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

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

Внимание! Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

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

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

Содержание

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

А. В. Агунов, И. А. Терехин, Р. А. Щербаков, Е. Г. Абишов, И. А. Баранов	Оценка возможности автоматического определения состояния искрового промежутка	7
А. Ф. Колос, Д. В. Серебряков, К. Е. Демин, Д. С. Чеботаев, С. В. Исаков, Н. А. Эван	Исследование физико-механических свойств материалов балластной призмы для скоростного и высокоскоростного движения	15
М. А. Шрайбер	Исследование усталостного старения изоляции тяговых электродвигателей тепловозов при циклической нагрузке	27
Д. И. Прохор, В. В. Лысенко, В. В. Никитин	Концепция модификации магистральных грузовых тепловозов для работы по газодизельному циклу	36
А. Н. Галахов, И. И. Лакин, Д. Д. Скворцов	Моделирование технического обслуживания и ремонта высокоскоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики	52
М. П. Бадер, А. А. Куликов	Расчет параметров мобильного механизированного комплекса, выполняющего монтаж воздушной линии, находящейся под влиянием контактной сети переменного тока	68
Т. З. Талахадзе, Н. В. Гребенников, И. В. Больших	Улучшение тягово-энергетических характеристик автономных локомотивов за счет применения модульного исполнения элементов тяговой системы	78
К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, А. П. Бадецкий	Логистический подход к стратегическому планированию эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий	90
К. С. Кривошлыков	Синергетический подход к преодолению ограничений инфраструктуры транспортно-логистического комплекса	103
А. А. Комайданов, А. Н. Смирнов, М. В. Зверев	Проблематика оценки ресурса и усталостной прочности при постановке на производство инновационного подвижного состава	112

Н. А. Журавлева, В. М. Шавшуков, Л. М. Чеченова	Систематизация и уточнение индексов эффективности логистики в управлении цепями поставок	124
Д. П. Кононов, Ю. В. Гомонец	Определение оптимальных режимов резания при обточке железнодорожных колес	137
В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, К. В. Шаряков, В. А. Лебедева	Построение системы увеличенного автономного хода с ограничением потребляемого тока из контактной сети	146
В. В. Костенко, В. А. Голубцов	Модель региональной транспортной сети для построения рациональных мультимодальных маршрутов пассажирских перевозок	158

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Ю. В. Егоров	Оценка возможности использования механизма ship-or-pay для финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона	173
--------------	---	-----

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Т. Л. Риполь-Сарагоси, А. А. Воробьев, А. А. Соболев, А. Н. Цыбульский	Исследование возможностей снижения энергоемкости адсорбционных процессов при высоких требованиях к влагосодержанию сжатого воздуха	187
---	---	-----

Contents

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

A. V. Agunov, I. A. Terekhin, R. A. Shcherbakov, Ye. G. Abishov, I. A. Baranov	Evaluating the Possibility of Automatic Determination of the Spark Gap Condition	13
A. F. Kolos, D. V. Serebryakov, K. E. Dyomin, D. S. Chebotaev, S. V. Isakov, N. A. Evan	A Study of Physical and Mechanical Properties of the Ballast Section Materials for Higher-Speed and High-Speed Railways	25
M. A. Shrajber	Investigation of Fatigue Aging of Insulation of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives Under Cyclic Load	34
D. I. Prokhor, V. V. Lysenko, V. V. Nikitin	An Approach to Converting Mainline Freight Diesel Locomotives to Operation on a Gas-Diesel Cycle	49
A. N. Galakhov, I. I. Lakin, D. D. Skvortsov	High-Speed Electric Trains Maintenance and Repair Simulation Using Data from On-board Diagnostic Systems	65
M. P. Bader, A. A. Kulikov	Calculation of the Parameters of a Mobile Mechanized Complex Performing the Installation of an Overhead Line under the Influence of an AC Contact Network	75
T. Z. Talakhadze, N. V. Grebennikov, I. V. Bolshih	Improving the Traction and Energy Characteristics of Self-Contained Locomotives Through the Use of Modular Design of the Traction System Elements	87
K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin, A. P. Badetsky	A Logistics Approach to Strategic Planning for the Operation of Low-Intensity Railway lines	101
K. S. Krivoshlykov	A Synergistic Approach to Overcoming the Limitations of the Transport and Logistics Complex Infrastructure	110
A. A. Komaidanov, A. N. Smirnov, M. V. Zverev	The Problems of Assessing the Resource and Fatigue Strength during the Production of Innovative Rolling Stock	121

N. A. Zhuravleva, V. M. Shavshukov, L. M. Chechenova	Systematization and Refinement of Logistics Efficiency Indices in Supply Chain Management	134
D. P. Kononov, Yu. V. Homonets	Determination of Optimal Cutting Modes when Turning Railway Wheels	143
V. A. Sharyakov, O. L. Sharyakova, K. V. Sharyakov, V. A. Lebedeva	Construction of a System of Increased Autonomous Travel with Limitation of Current Consumption from the Contact Network	156
V. V. Kostenko, V. A. Golubtsov	A Model of the Regional Transport Network for Constructing Rational Multimodal Passenger Traffic Routes	170

ECONOMICS AND MANAGEMENT

Yu. V. Egorov	Assessment of the Possibility of Using the “Ship-or-Pay” Mechanism to Finance Substage 3.1 of the Modernization of the Eastern Polygon	184
---------------	--	-----

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

T. L. Ripoll-Saragosi, A. A. Vorobyev, A. A. Sobolev, A. N. Tsybulsky	Study of the Possibilities of Reducing the Energy Intensity of Adsorption Processes with High Requirements for the Moisture Content of Compressed Air	197
--	---	-----

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.316.99

Оценка возможности автоматического определения состояния искрового промежутка

А. В. Агунов¹, И. А. Терехин¹, Р. А. Щербаков², Е. Г. Абишов¹, И. А. Баранов¹

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

²АО «Ленгипротранс», Российская Федерация, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 143

Для цитирования: Агунов А. В., Терехин И. А., Щербаков Р. А., Абишов Е. Г., Баранов И. А. Оценка возможности автоматического определения состояния искрового промежутка // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 7-14. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-7-14

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о возможности автоматического определения состояния искрового промежутка (ИП). **Методы:** В статье приведен анализ устройств и методов автоматического контроля состояния искрового промежутка, а также представлены их особенности и недостатки, относительно которых сделаны выводы касательно удобства эксплуатации на производстве, качества обеспечения контроля состояния искровых промежутков, возможности использования системы в системах автоматического контроля. **Результаты:** Предложена новая модернизация искрового промежутка, которая позволит не только организовать автоматический контроль их состояния, но и внедрить автоматический контроль состояния искровых промежутков в систему контроля железнодорожной инфраструктуры с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которая в настоящий момент является предметом особого внимания со стороны холдинга ОАО «Российские железные дороги». Даны пояснения выбора в пользу именно такой новой модернизации, такие как минимальные капиталовложения при сохранении необходимой и достаточной эффективности контроля состояния искрового промежутка, а также возможность внедрения в уже существующую систему мониторинга с применением беспилотных летательных аппаратов. **Практическая значимость:** Показана возможность автоматического определения состояния искрового промежутка, которая соответствует приоритетному направлению цифровизации железнодорожного транспорта и железнодорожной инфраструктуры холдинга ОАО «Российские железные дороги», указанному в стратегиях развития холдинга до 2030 года и на перспективу до 2035 года.

Ключевые слова: Искровой промежуток, автоматический контроль, пробой, беспилотные летательные аппараты, цифровая железная дорога.

Переход к цифровой железной дороге требует более высокой степени автоматизации контроля элементов ее инфраструктуры, чем была необходима ранее. Это связано с тем, что цифровые технологии требуют высокой точности и надежности в передаче данных и управлении процессами. Небольшая ошибка в работе одного элемента может привести к сбоям в работе всей системы. Автоматический контроль позволяет предотвращать сбои и быстро реагировать на возможные проблемы. С помощью датчиков и систем мониторинга можно точно контролировать параметры работы элементов инфраструктуры. Если возникают неполадки, система может быстро произвести диагностику и оповестить персонал о необходимости устранения неисправности. Также автоматический контроль позволяет увеличить безопасность движения поездов. Системы контроля могут распознавать определенные ситуации на пути следования поезда и предотвращать возможные аварии. Наконец, автоматический контроль элементов инфраструктуры позволяет увеличить эффективность работы железных дорог. Системы мониторинга и контроля могут в режиме реального времени сообщать операторам о состоянии различных элементов, что позволяет мгновенно реагировать на возможные проблемы и ускорять процесс обслуживания пассажиров.

Искровые промежутки применяются для того, чтобы защитить металлические части опор и фундаментов от воздействия блуждающих токов, а также для протекания тока в рельсовую цепь при аварийном режиме работы контактной сети и высоковольтных линий продольного электроснабжения, находящихся на опорах контактной сети. ИП используются в качестве защиты от электрокоррозии, возникающей ввиду токов, стекающих с рельсов по линии заземления и арматурной сетки фундаментов в землю, в соответствии с потенциалами рельс — земля и сопротивлениями, которые зависят в основном от тягового тока и имеют различные зоны вдоль пути (с катодной зоной вблизи подстанции). Величина тока, стекающего с опоры, зависит от сопротивления рельс — земля.

В нормальных условиях ИП крепят в разрыв заземляющего спуска, тем самым изолируя опоры от рельсов. Когда на опору попадает высокое напряжение (более 800 В), происходит пробой ИП и наступает глухое заземление на рельс. После чего пробитый ИП требует замены. В результате для обеспечения нормальной работы системы заземления ее обслуживание требует периодического обхода в соответствии с [1] обслуживаемого участка с проверкой каждого искрового промежутка, что требует не только определенных трудозатрат, но и не исключает человеческого фактора, а также не может обеспечить оперативность выявления факта выхода из строя искрового промежутка, что напрямую влияет на безопасность железнодорожного транспорта и его инфраструктуры.

Поэтому вопрос автоматического контроля состояния искрового промежутка на сегодняшний день в рамках цифровой железной дороги является актуальным.

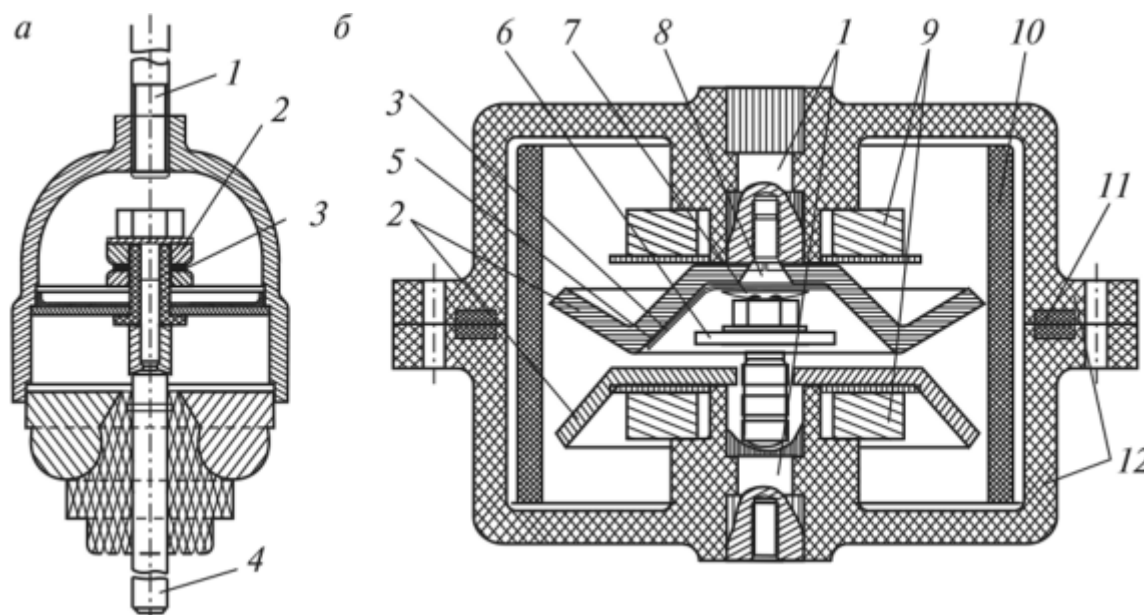


Рис. 1. *а* — искровой промежуток ИПМ-62М; *б* — искровой промежуток ИПВ-ЦНИИ-62: 1, 4 — токопроводы; 2 — электроды; 3 — слюдяная прокладка; 5 — поджигающий электрод; 6 — варистор СН2-2А; 7 — пружинная шайба; 8 — миканитовая прокладка; 9 — кольцевые магниты; 10 — дугостойкая втулка; 11 — уплотнительное кольцо; 12 — крышка

На сегодняшний день существует множество вариаций исполнения искровых промежутков с разнообразными характеристиками, однако в общем случае искровой промежуток представляет собой искусственный разрыв цепи заземления, который под действием определенного напряжения около 1000 В пробивается, при этом загорается электрическая дуга между электродами до момента срабатывания релейной защиты. В качестве примера на рис. 1, *а* приведен ИПМ-62М, на рис. 1, *б* — ИПВ-ЦНИИ-62

Выход из строя искрового промежутка сопровождается протеканием электрического тока через него, что, в свою очередь, ведет к выделению тепла. Таким образом, для контроля исправности ИП мы можем применять методы, основанные на обнаружении электрических и (или) тепловых изменений. Даже в случае разгерметизации корпуса ИП (еще одного вида неисправности, кроме пробоя) и попадании туда влаги конечным результатом будет протекание тока через ИП.

В существующих реалиях проверка ИП производится вольтметром соответствующего рода тока или прибором ПК-2. Для измерений шкалу вольтметра градуируют от 20 В до 100 В. В случае когда стрелка вольтметра отклоняется, то ИП считается исправным, если же стрелка вольтметра не отклоняется, то ИП не исправен (пробит). Если осуществляется проверка за счет устройства, состоящего из вольтметра, подключенного к выводам ИП и при прохождении электроподвижного состава (ЭПС), к ИП прикладывается вызванный тяговым током потенциал рельса, который и вызывает отклонение стрелки вольтметра при исправном ИП.

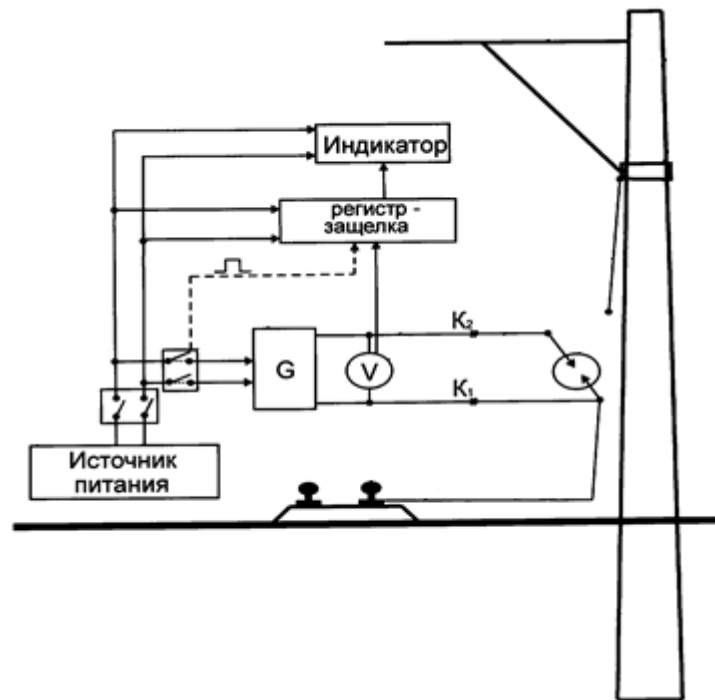


Рис. 2. Способ контроля состояния искрового промежутка, установленного в цепи защиты железобетонных опор контактной сети

В случае низкого сопротивления ИП (означающем его неисправность), т. е. в случае, когда контакты ИП замкнуты, стрелка вольтметра остается неподвижна, тогда ИП подлежит замене на новый. Результаты проверки и замены неисправных ИП заносят в специальный журнал, который ведется в каждом районе контактной сети.

Ввиду невозможности измерить величину электрического пробоя ИП, который следует заменять в случае, если напряжение пробоя менее 1500 В, а потенциал рельса в подавляющем большинстве случаев составляет порядка до 100 В, т. е. выполняется условие: напряжение рельса много меньше напряжения пробоя, а также данный способ возможен только при прохождении ЭПС, что затрудняет проверку при большом межпоездном интервале и приводит к значительным затратам времени на выявление неисправных ИП.

Существуют и иные способы контроля ИП, которые приведены в табл. 1.

Так как промежуточные значения состояния ИП не рассматриваются ни одним из способов и при проверке ИП интересны только 2 состояния: исправен или не исправен, то целесообразнее фиксировать именно параметры разрушения или частичного разрушения элементов ИП. Например, способ контроля искрового промежутка, который заключается в приклеивании RFID-метки. RFID-метку приклеивают на плоскую внешнюю поверхность основания ИП таким образом, чтобы RFID-метка, которая содержит индивидуальный код, маркирующий ИП, располагалась, перекрывая сквозные отверстия, расположенные в основании ИП. Тогда в случае пробоя изоляции, при выходе раскаленного сильно ионизированного газа

ТАБЛИЦА 1. Способы контроля искрового промежутка

№ п/п	Способ	Недостатки
1	Устройство контроля состояния ИП «Импульс» [2]	<ul style="list-style-type: none"> • высокая погрешность измерения напряжения; • большое количество технологических операций; • значительные затраты времени на выполнение
2	Устройство контроля состояния ИП [3]	<ul style="list-style-type: none"> • необходимость выполнения измерений на отсоединенном от металлических спусков ИП; • затраты времени на сбор цепи проверки; • высокая погрешность измерений напряжения; • большая масса необходимого оборудования
3	Способ контроля состояния искрового промежутка, установленного в цепи защиты железобетонных опор контактной сети (рис. 2) [4]	<ul style="list-style-type: none"> • при подключении необходимо предварительно один вывод искрового промежутка отсоединить от спуска; • затраты времени на сбор цепи проверки; • трудоемкость процесса проверки; • большая масса необходимого оборудования; • опасность поражения персонала электрическим током

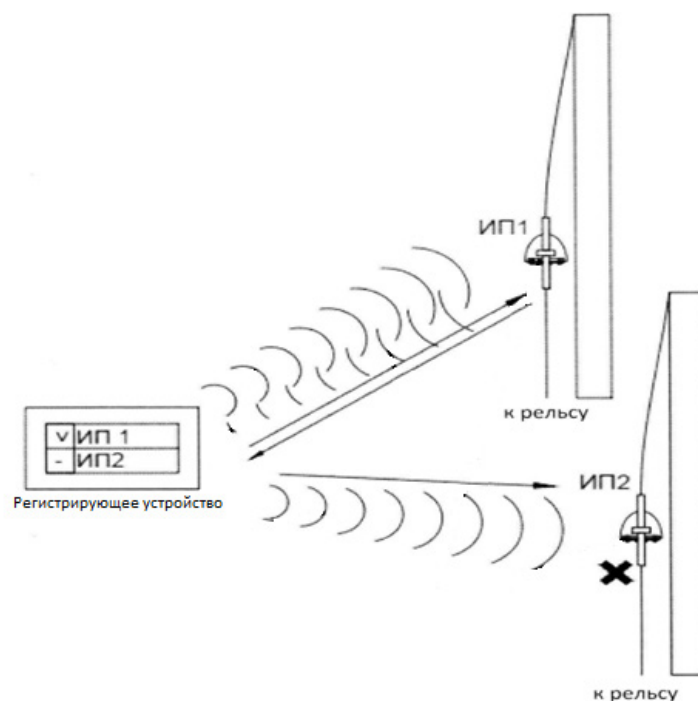


Рис. 3. Способ контроля искрового промежутка, состоящий из прикрепления индикатора в виде RFID-метки

через отверстия основания ИП, возникающего при горении электрической дуги, разрушает RFID-метку, что свидетельствует о пробое ИП. А затем фиксируется стационарным или переносным регистрирующим устройством (рис. 3). Аналогично работает система контроля искрового промежутка, где RFID-метка выполнена в виде наклейки, изготовленной по форме плоской наружной поверхности основания ИП. При этом поверхность наклейки разрезана и выполнена внахлест для надежного наклеивания на плоскую наружную поверхность основания ИП,



Рис. 4. Принцип работы индикации модернизированного ИП

причем количество чипов соответствует количеству сквозных отверстий основания искрового промежутка [5].

Описанные выше способы можно интегрировать в работу беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые уже применяются для контроля контактной подвески [6], задавая маршрут со снижением к ИП и оснатив БЛА считывателем RFID-метки. Однако факт того, что RFID-метка крепится клеем, а ИП устанавливается на высоте, доступной сторонним людям, возникает риск проявления хулиганства и уничтожения метки, а также утяжеления БПЛА считывателем.

Учитывая все вышесказанное, предлагается усовершенствовать принцип работы способа с RFID-меткой, заменив ее на окраску ИП термочувствительной краской. Тогда при пробое ИП из-за нагрева он будет изменять цвет (рис. 4), что можно фиксировать видеодатчиками, которыми БПЛА уже оснащен.

Организация автоматического определения состояния искрового промежутка в настоящее время представляется возможной, однако наиболее точные методы решения данной задачи требуют высоких капиталовложений, как и применение стационарных устройств, потому для дальнейшего развития требуется технико-экономическая оценка целесообразности каждого рассмотренного варианта, а также пригодность их интеграции в условия цифровой железной дороги, исходя из поставленных целей реализации таковой.

Библиографический список

1. Распоряжение ОАО «РЖД» от 25 апреля 2016 г. № 753р «Правила технического содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи 1812р».
2. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети (К-146-2002), МПС РФ, департамент электрификации и электроснабжения; руководство по эксплуатации прибора «Импульс».
3. К-146-2002 «Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети», МПС РФ. — М.: Трансиздат, 2003. — С. 12.
4. Патент № RU 69462 U1 Российская Федерация, МПК В60М 5/00, G01R 27/18. Устройство контроля состояния искрового промежутка, установленного в цепи защиты железобетонных

опор контактной сети: № 2007128856/22: заявл. 25.07.2007: опубл. 27.12.2007 / А. В. Дементьев, В. А. Дементьев, Е. А. Лазарев и др.; заявитель общество с ограниченной ответственностью «Электродиагност-Железнодорожник».

5. Патент № RU 2769631 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08, H02H 9/06, G06K 7/0095. Способ контроля искрового промежутка и система для его осуществления: № 2021114989: заявл. 25.05.2021: опубл.: 04.04.2022 / Т. А. Несенюк, И. А. Пятецкий; заявитель общество с ограниченной ответственностью «Уральский центр диагностики оборудования».

6. Использование беспилотников помогает снизить расходы на мониторинг железнодорожной инфраструктуры и повысить качество получаемых данных. — URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/opinions/ispolzovanie-bespilotnikov-pomogaet-snizit-raskhody-na-monitoring-zheleznodorozhnoy-infrastruktury-i/> (дата обращения: 24.07.2023).

Дата поступления: 28.08.2023

Решение о публикации: 02.10.2023

Контактная информация:

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

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

ЩЕРБАКОВ Роман Александрович — инженер 3 категории; mrz@yandex.ru

АБИШОВ Ербол Гайдарович — аспирант; abishov@pgups.ru

БАРАНОВ Иван Александрович — аспирант; baranov@pgups.ru

Evaluating the Possibility of Automatic Determination of the Spark Gap Condition

A. V. Agunov¹, I. A. Terekhin¹, R. A. Shcherbakov², Ye. G. Abishov¹, I. A. Baranov¹

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

²JSC “Lengiprotrans”, 143, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

For citation: Agunov A. V., Terekhin I. A., Shcherbakov R. A., Abishov E. G., Baranov I. A. Evaluating the Possibility of Automatic Determination of the Spark Gap Condition. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 7-14. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-7-14

Summary

Purpose: To consider the possibility of automatic determination of the spark gap condition. **Methods:** The article analyzes devices and methods of automatic control of the spark gap condition. It also presents their features and disadvantages, based on which conclusions are made concerning the convenience of operation in production, the quality of the spark gap condition monitoring, the possibility of using the system in automatic control systems. **Results:** A new modernization of spark gaps is proposed, which will allow not only to organize automatic monitoring of their condition, but also to introduce automatic monitoring of spark gaps condition into the system of railway infrastructure monitoring using unmanned aerial vehicles, which is

currently the subject of special attention from the holding company JSC “Russian Railways”. The justifications for choosing this particular new modernization include minimal capital investments, while maintaining the necessary and sufficient efficiency of spark gap monitoring. Also, there is the possibility of integration into the existing monitoring system with the use of unmanned aerial vehicles. **Practical significance:** The possibility of automatic determination of the spark gap condition is shown, which corresponds to the priority direction of digitalization of railway transport and railway infrastructure of the holding company JSC “Russian Railways”, specified in the holding company’s development strategies up to 2030 and in the perspective up to 2035.

Keywords: Spark gap, automatic control, sparkover, unmanned aerial vehicles, digital railroad.

References

1. *Rasporyazhenie OAO “RZHD” ot 25 aprelja 2016 g. № 753r “Pravila tekhnicheskogo sodержaniya kontaktnoj seti, pitayushchih linij, otsasyvayushchih linij, shuntiruyushchih linij i linij elektroperedachi 1812r”* [Order of JSCo “Russian Railways” № 753r dated April 25, 2016 “Rules for the technical maintenance of the contact network, feeder lines, suction lines, shunt lines and power lines 1812r”]. (In Russian)

2. *Ukazaniya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu opornyh konstrukcij kontaktnoj seti (K-146-2002), MPS RF, departament jelektrifikacii i jelektronsabzheniya; rukovodstvo po jekspluatacii pribora “Impul’s”* [Instructions for the maintenance and repair of supporting structures of the contact network (K-146-2002), Ministry of Railways of the Russian Federation, Department of Electrification and Power Supply; Operating instructions for the Impulse device]. (In Russian)

3. *K-146-2002 “Ukazaniya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu opornyh konstrukcij kontaktnoj seti”* [K-146-2002 “Guidelines for maintenance and repair of contact network support structures”], MPS RF. Moscow: Transizdat Publ., 2003, p. 12. (In Russian)

4. Dement’ev A. V., Dement’ev V. A., Lazarev E. A. et al. *Ustrojstvo kontrolja sostojanija iskrovogo promezhnutka, ustanovlennogo v cepi zashhity zhelezobetonnyh opor kontaktnoj seti* [Device for monitoring the state of the spark gap installed in the protection circuit of reinforced concrete supports of the contact network]. Patent RF, no. 69462. (In Russian)

5. Nesenjuk T. A., Pjateckij I. A. *Sposob kontrolja iskrovogo promezhnutka i sistema dlja ego osushhestvleniya* [Method for monitoring the spark gap and system for its implementation]. Patent RF, no. 2769631. (In Russian)

6. *Ispol’zovanie bespilotnikov pomogaet snizit’ raskhody na monitoring zheleznodorozhnoj infrastruktury i povysit’ kachestvo poluchaemyh dannyh* [The use of drones helps to reduce the cost of monitoring the railroad infrastructure and improve the quality of the obtained data]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/opinions/ispolzovanie-bespilotnikov-pomogaet-snizit-raskhody-na-monitoring-zheleznodorozhnoj-infrastruktury-i/> (accessed: July 24, 2023)

Received: August 28, 2023

Accepted: October 02, 2023

Author’s information:

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

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

Roman A. SHCHERBAKOV — 3rd Category Engineer; mrz@yandex.ru

Erbol G. ABISHOV — Postgraduate Student; abishov@pgups.ru

Ivan A. BARANOV — Postgraduate Student; baranov@pgups.ru

УДК 625.072

Исследование физико-механических свойств материалов балластной призмы для скоростного и высокоскоростного движения

А. Ф. Колос, Д. В. Серебряков, К. Е. Демин, Д. С. Чеботаев, С. В. Исаков, Н. А. Эван

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

Для цитирования: Колос А. Ф., Серебряков Д. В., Демин К. Е., Чеботаев Д. С., Исаков С. В., Эван Н. А. Исследование физико-механических свойств материалов балластной призмы для скоростного и высокоскоростного движения // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 15-26. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-15-26

Аннотация

Цель: Обосновать актуальность проведения исследований свойств балластных материалов. Описать методику проведения лабораторных испытаний и представить результаты исследования физико-механических свойств материалов балластной призмы для скоростного и высокоскоростного движения поездов. Предложить конструкцию балластной призмы с применением бывших в употреблении автомобильных шин. **Методы:** Проведение лабораторных испытаний проб щебня из базальта, гранита и габбро-диабазы на истираемость в полочном барабане и на сопротивление удару в копре ПМ. **Результаты:** Определена потеря массы после испытаний на истираемость в полочном барабане и после испытаний на ударную прочность на копре. Наименьшая потеря массы зафиксирована у пробы из базальта, промежуточная потеря массы — у пробы из габбро-диабазы, наибольшая — у гранитного щебня. **Практическая значимость:** Базальтовые горные породы имеют наименьшую потерю массы как во время испытаний на истирание в полочном барабане, так и на ударную прочность, по сравнению с габбро-диабазом и гранитом. Авторами предложен вариант конструкции балластной призмы и экспериментально обоснован выбор балластного материала для этой конструкции. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования выбора балластного материала при проектировании и строительстве и при моделировании работы балласта в пути.

Ключевые слова: Балласт, железнодорожный путь, истираемость, сопротивление удару, полочный барабан, копер, физико-механические свойства.

Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года установлены перспективные направления развития железных дорог, в числе которых повышение скоростей движения пассажирских поездов. По мере увеличения скоростей движения поездов процессы износа щебеночного балласта приобрели особую значимость из-за сокращения межремонтных периодов, вызванных быстрой засоряемостью и загрязнением щебня его продуктами дробления и истирания. Из опыта отечественных и зарубежных железных дорог и результатов многочисленных исследований [1–3] известно, что балластный слой должен обладать достаточной прочностью и деформативностью, чтобы обеспечивать стабильность рельсовой колеи в течение нормативного межремонтного

периода. Эта стабильность определяется ограничением остаточных деформаций балластного слоя при движении поездов установленной массы и скорости при оптимальных затратах на техническое обслуживание железнодорожного пути.

В последние десятилетия геосинтетические материалы, такие как георешетка и геоячейки, широко использовались для улучшения работы балласта в пути [3–7]. Основным принципом армирования георешеткой заключается в обеспечении хорошей стабилизации частиц балласта, то есть ограничении бокового перемещения частиц. Георешетка может укладываться на основную площадку земляного полотна или размещаться в балластной призме вне зоны работы путевых машин, снижая колебания в подшпальном основании [4]. Применение геоячеек может обеспечить дополнительное внутреннее уплотняющее воздействие и армирование в слое щебня, снизить затраты на техническое обслуживание и улучшить долговечность пути [4, 8]. Однако геоячейки создают затруднения при текущем содержании пути. Для устранения препятствий работе путевых машин предлагается размещать геоячейки в нижней части балластного слоя. Прошлые исследования показали, что применение геоячеек значительно повышает прочность и жесткость балласта [4], однако отсутствие утвержденной методики проектирования подобных конструкций препятствует их применению на действующих линиях.

В качестве альтернативы геоячейкам авторы предлагают применять бывшие в употреблении автомобильные шины. Повторное использование отслуживших шин будет способствовать снижению вредного воздействия на окружающую среду. Вариант конструкции пути с применением автомобильных шин приведен на рис. 1.

Шины используются для минимизации деформации пути и повышения его несущей способности. В предлагаемой конструкции пути используются шины с удаленной боковиной, заполненные щебнем и размещенные на основной площадке. Шины выполняют функцию стабилизации частиц щебня, повышают жесткость балластного слоя и таким образом, снижают деформации балласта. При этом существенное влияние на стабильность и долговечность балластного слоя будут оказывать минеральный состав щебеночного балласта, который влияет на его способность сопротивляться удару и истиранию, зерновой состав, морозостойкость, уровень загрязнения и засорения [9] и т. д.

Настоящая публикация посвящена исследованию свойств материалов балластного слоя, которые в последующем будут применены в лабораторных исследованиях предлагаемой конструкции, и моделированию ее работы в пути.

Сопrotивление истиранию и ударам являются важными характеристиками щебеночного балласта. Истирание зерен, вызванное разрушением балласта, сопровождается появлением более мелких фракций и уменьшением объема пор. Это может привести к увеличению плотности, снижению его фильтрационных свойств щебня и дополнительным деформациям пути.

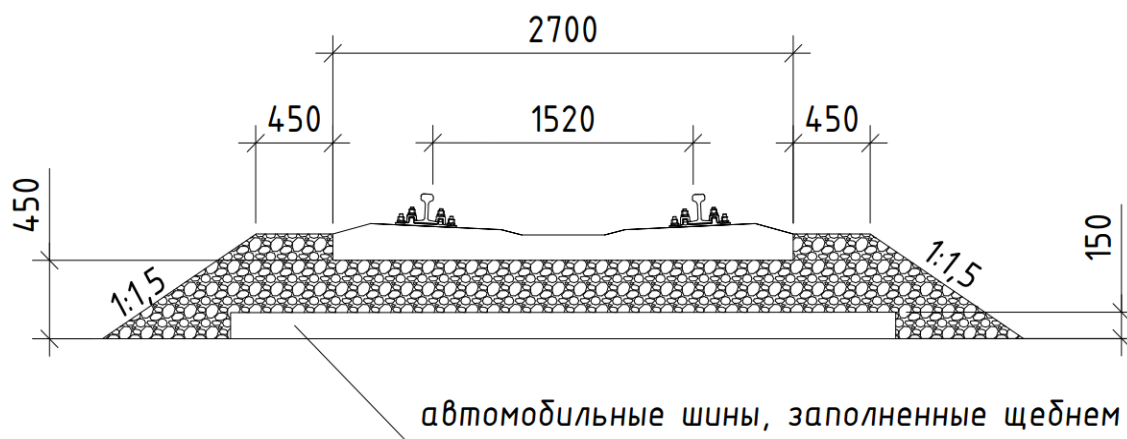


Рис. 1

Известны различные методы оценки сопротивления щебня истиранию. За рубежом используются:

- метод барабанной мельницы (Mill abrasion test, MA), заключающийся во вращении цилиндрической емкости — барабанной мельницы, заполненной щебнем, с добавлением воды. Вращение мельницы вызывает перемещение контактирующих частиц щебня и их истирание;

- метод микро-Деваль (micro-Dewal abrasion test, MDA), выполняемый по сходному принципу, но отличающийся от MDA-теста некоторыми параметрами испытаний;

- метод Лос-Анджелес (Los-Angeles abrasion test, LAA), выполняемый на абразивной машине, идентичной полочному барабану, применяемому в Российской Федерации. Испытание проводится с использованием металлических шаров и нормируется российским стандартом ГОСТ 7392—2014.

Метод барабанной мельницы используется только в странах Северной Америки, в то время как методы микро-Деваль и Лос-Анджелес (или аналогичные им) используются по всему миру. Испытания по методу Лос-Анджелес проводятся только на сухих образцах, в то время как метод микро-Деваль предполагает использование сухих или предварительно замоченных в воде частиц щебня.

Проведение испытаний по определению сопротивления истиранию щебня в полочном барабане

Для определения наиболее подходящей горной породы для щебеночного балласта конструкции железнодорожных путей проводились испытания на трех разных горных породах: базальте, габбро-диабазе и граните. Габбро-диабаз и гранит относятся к плутоническим породам среднего и кислого отряда соответственно. Базальт является вулканической породой основного отряда.

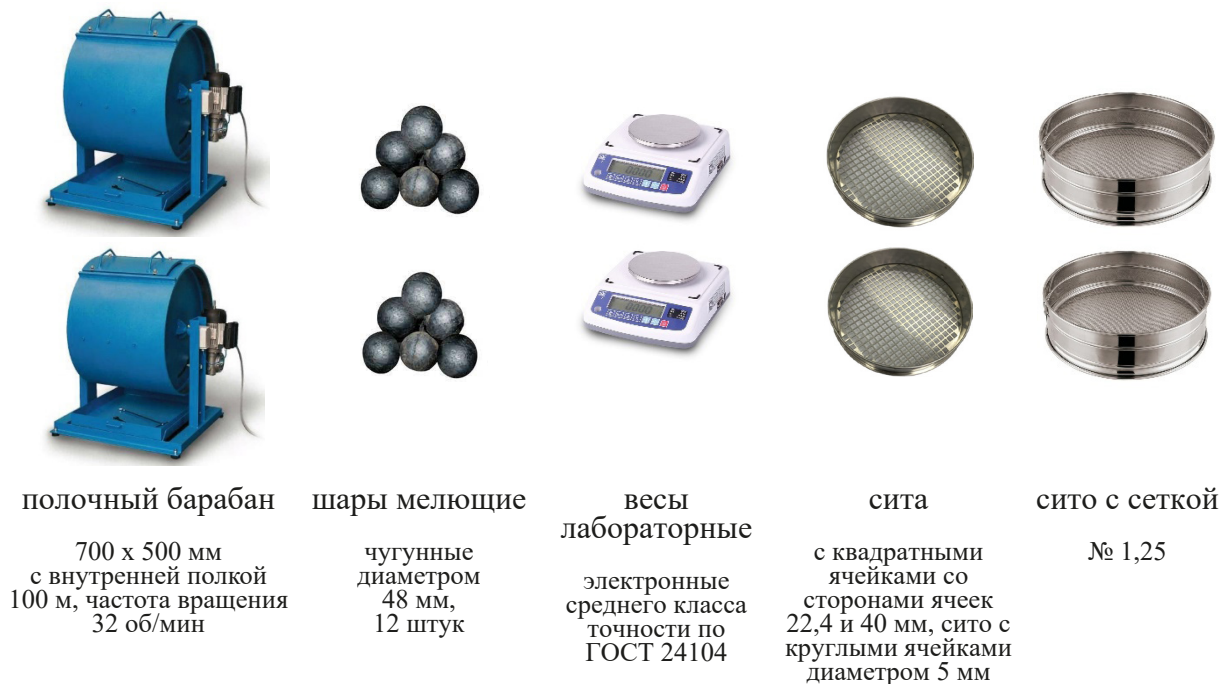


Рис. 2. Перечень оборудования, применяемого при испытаниях по определению сопротивления истиранию щебня в полочном барабане

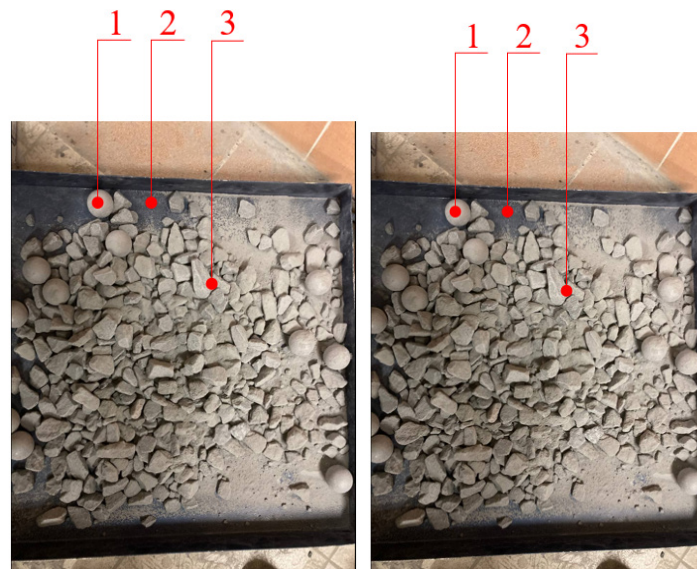


Рис. 3. Внешний вид образца после испытания:
1 — чугунные шары; 2 — лоток; 3 — испытанный щебень

Величина потери массы после испытаний на истираемость в полочном барабане определялась мерой разрушения зерен, для этого проводилось сравнение зернового состава пробы щебня до и после испытания.

Для данного метода применялись средства контроля и вспомогательное оборудование, приведенные на рис. 2.

Для проведения испытания была взята лабораторная проба щебня весом 50 кг, перемешанная и выровненная на металлическом листе. Для отсева от подготовленной пробы было отобрано 30 кг щебня. Отобранный щебень отсеивался на двух ситах с ячейками со сторонами 22,4 и 40 мм. После отсева аналитическая проба массой 20 кг была получена из остатков на сите с ячейками 22,4 мм. Если необходимая масса аналитической пробы не была достигнута после отсева, то дополнительно отбирался и просеивался щебень из исходной лабораторной пробы в соответствии с данной процедурой.

Аналитическая проба щебня массой 20 кг была разделена на две части по 10 кг. Одна из частей пробы помещалась в барабан вместе с 12 чугунными шарами и обрабатывалась в течение 1000 оборотов при частоте 32 об/мин. Вид пробы щебня после испытания представлен на рис. 3. Проба просеивалась через круглое сито с ячейками диаметром 5 мм и сито с сеткой № 1,25. Взвешенные остатки сит составили общую массу остатков для данной испытываемой пробы.

Величину потери массы щебня для каждой навески $\Delta M_{и}$, в % общей массы, после испытаний на истираемость в полочном барабане определяли по формуле:

$$M_{и} = \frac{m - m_{и}}{m} 100,$$

где m — масса испытываемого щебня, г;

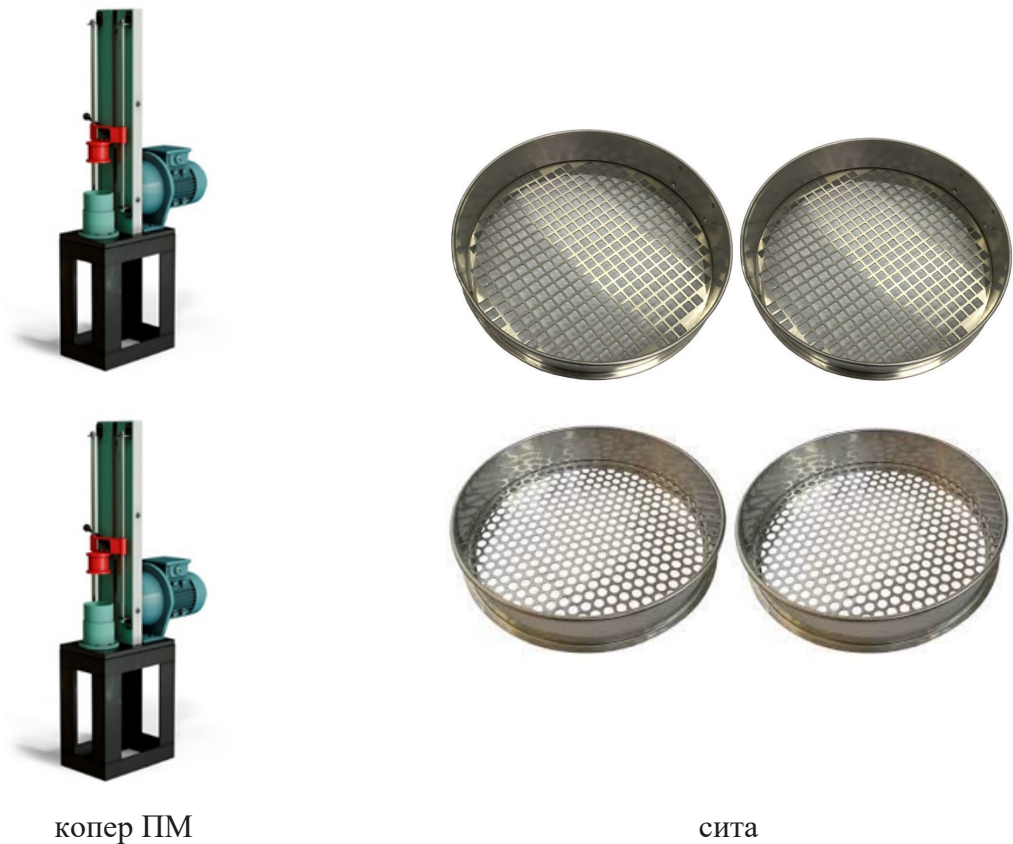
$m_{и}$ — суммарная масса остатков на сите с круглыми ячейками диаметром 5 мм и сите с сеткой № 1,25, г.

Результаты двух испытаний аналитической пробы были усреднены для получения итогового значения.

Проведение испытаний по определению сопротивлению удару

Потеря массы после испытаний на сопротивление удару на копре определялась по степени разрушения зерен щебня в пробе. Для проведения этого испытания использовалось оборудование, показанное на рис. 4.

При испытаниях использовалась лабораторная проба массой 30 кг. Аналитическая проба массой 4,5 кг отбиралась из остатков на сите 22,4 мм. Полученная проба щебня была разделена на три равные навески, которые были промыты и высушены до постоянной массы. Для испытания каждой навески щебня ее высыпали в ступку, удалив при этом лишний щебень, выровняв ее края, и взвешивали ступку с щебнем. Ступку устанавливали на копер и подвергали 40 ударам бойка, после каждого из которых ступка автоматически поворачивалась на 45 градусов. После этого содержимое ступки помещалось на поддон, в том числе мелкие частицы, прилипшие к ступке. Затем щебень, прошедший через сито диаметром



копер ПМ
с стальной ступкой (внутренний диаметр 105 мм, высота 58 мм)

сита
с квадратными ячейками со сторонами ячеек 22,4 и 40 мм, сито с круглыми ячейками диаметром 5 мм

Рис. 4. Перечень оборудования, применяемого при испытаниях щебня на сопротивление удару на копре

5 мм, взвешивался с точностью до 0,1 г. В результате ударного воздействия бойка содержимое ступки разрушалось, что приводило к разрушению щебня. Внешний вид образцов до и после испытаний представлен на рис. 5 и 6 соответственно.

Величину потери массы щебня ΔM_y , в % общей массы, после испытаний на сопротивление щебня удару на копре определяли по формуле:

$$M_y = \frac{M_{-5}}{M} 100,$$

где M — масса испытываемого щебня, г;

M_{-5} — масса щебня, прошедшего через сито с круглыми ячейками диаметром 5 мм после проведения испытания, г.

Для получения результата испытания использовалось среднеарифметическое значение результатов трех последовательных навесок аналитической пробы.



Рис. 5. Внешний вид образца до испытания



Рис. 6. Внешний вид образца после испытания

Обработка результатов определения физико-механических свойств щебеночного балласта

Определение потери массы проб щебня после испытаний в полочном барабане представлено в табл. 1.

Путем анализа данных, показывающих потерю массы горных пород во время испытаний на износ в полочном барабане, были получены результаты, которые представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 1. Результаты испытаний по определению потери массы после испытаний на истираемость в полочном барабане

№	Наименование материала	Масса пробы до испытания, кг	Остаток на ситах, кг		Величина потери массы, %	Среднее значение
			5 мм	1,25 мм		
1	Базальт	10	9,46	0,038	5,02	5,24
		10	9,42	0,034	5,46	
2	Базальт	10	9,34	0,031	6,29	5,82
		10	9,43	0,036	5,34	
3	Базальт	10	9,39	0,037	5,73	5,56
		10	9,42	0,042	5,38	
4	Гранит	10	8,74	0,06	12	11,85
		10	8,79	0,04	11,7	
5	Гранит	10	8,71	0,057	12,33	12,72
		10	8,62	0,048	13,12	
6	Гранит	10	8,75	0,058	11,92	12,26
		10	9,7	0,039	12,61	
7	Габбро-диабаз	10	9,18	0,06	7,6	8,04
		10	9,08	0,072	8,48	
8	Габбро-диабаз	10	9,09	0,051	8,59	8,44
		10	9,12	0,052	8,28	
9	Габбро-диабаз	10	9,16	0,064	7,76	8,17
		10	9,08	0,062	8,58	

ТАБЛИЦА 2. Результаты обработки данных испытаний по потери массы после испытания на истираемость в полочном барабане

Горная порода	Базальт	Габбро-диабаз	Гранит
Потеря массы после испытания на истираемость в полочном барабане, масс. %	5,54	8,22	12,28

Из табл. 2 видно, что базальт обладает лучшим показателем по потере массы после испытаний на истирание в полочном барабане — 5,54 масс. %.

На основе протоколов испытаний сформирована сводная таблица результатов испытаний по определению величины потери массы на сопротивление удару на копре, которая представлена в табл. 3.

В результате обработки данных испытаний по определению средней потери массы после испытаний на сопротивление удару на копре сформирована табл. 4.

Из табл. 4 видно, что базальт обладает лучшим показателем по потере массы после испытаний на ударную прочность на копре — 2,61 %.

ТАБЛИЦА 3. Результаты испытаний по определению величины потери массы на сопротивление удару

№	Наименование материала	Масса пробы до испытания, кг	Масса щебня, прошедшего через сито 5 мм, кг	Величина потери массы, %	Среднее значение, %
1	Базальт	1,065	0,033	3,1	2,65
		1,049	0,027	2,6	
		1,042	0,023	2,24	
2	Базальт	1,06	0,031	2,92	2,55
		1,041	0,024	2,32	
		1,043	0,025	2,4	
3	Базальт	1,052	0,031	2,97	2,62
		1,02	0,023	2,26	
		1,034	0,027	2,63	
4	Гранит	1,008	0,041	4,11	3,97
		1,036	0,042	4	
		1,024	0,039	3,79	
5	Гранит	1,016	0,042	4,16	4,12
		1,038	0,044	4,25	
		1,01	0,040	3,94	
6	Гранит	1,052	0,050	4,72	4,39
		1,028	0,043	4,19	
		1,018	0,043	4,25	
7	Габбро-диабаз	1,09	0,034	3,13	2,84
		1,15	0,032	2,8	
		1,126	0,029	2,58	
8	Габбро-диабаз	1,056	0,031	2,9	2,68
		1,116	0,028	2,51	
		1,104	0,029	2,62	
9	Габбро-диабаз	1,098	0,031	2,84	2,88
		1,144	0,036	3,13	
		1,128	0,030	2,66	

ТАБЛИЦА 4. Результаты обработки данных по потере массы после испытаний на ударную прочность на копре

Горная порода	Базальт	Габбро-диабаз	Гранит
Потеря массы после испытания на ударную прочность на копре, масс. %	2,61	2,80	4,16

Коллектив авторов провел испытания различных горных пород щебня для определения физико-механических характеристик щебня. В результате исследования было установлено, что базальтовые горные породы имеют наименьшую потерю массы как во время испытаний на истирание в полочном барабане, так и на ударную прочность, по сравнению с габбро-диабазом и гранитом. Авторами предложен вариант конструкции балластной призмы и экспериментально обоснован выбор балластного материала для этой конструкции. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании работы балласта в пути.

Настоящая статья (работа) опубликована (выполнена) при поддержке федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

Библиографический список

1. Liu Zh. Coupling Train-Track Models with the Discrete Element Method for a More Realistic Simulation of Ballasted Track Dynamic Behavior / Zh. Liu, B. Feng, E. Tutumluer // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. — 2023. — DOI: 10.1177/03611981231156933.
2. Ren D. Resilient and Permanent Axial Strain of Crusher-Run Materials under The Effect of Principal Stress Axes Rotation / D. Ren, T. Ishikawa, T. Tokoro. — 2022.
3. Arivalagan J. Effectiveness of Geosynthetics at Preventing Subgrade Instability under Cyclic Loading / J. Arivalagan, Ch. Rujikiatkamjorn, B. Indraratna et al. — 2023. — Pp. 427–437. — DOI: 10.1061/9780784484685.043.
4. Konon A. Influence of geosynthetics on the oscillations amplitude of railway subgrade / A. Konon, A. Petriaev // *11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018*: 11, Seoul, September 16–21, 2018. — Seoul, 2018. — Vol. 2. — Pp. 990–998.
5. Petriaev A. The Effect of Elastic Pads and Mats on the Stress–Strain State of Railway Subgrade / A. Petriaev, A. Konon, V. Egorov // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2022. — Vol. 165. — Pp. 279–286. — DOI: 10.1007/978-3-030-77234-5_23.
6. Abrashitov A. A. Creation of a Two-Layer Ballast Prism of a Railroad Track from Granite Rubble Using Plastic Flat Geogrids and Rubber Crumb of Recycled Automobile Tires / A. A. Abrashitov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference “FarEastCon 2019”*, Vladivostok, Russky Island, October 01–04, 2019. Vol. 753, 3, Chapter 2. — Vladivostok, Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. — P. 032016. — DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032016.
7. Abrashitov A. Construction and Current Maintenance of the Reinforced Ballast Layer of the Railway Track / A. Abrashitov, A. Sidrakov, A. Zaitsev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, January 10–12, 2022*. — Virtual, Online, 2022. — P. 022045. — DOI: 10.1088/1755-1315/988/2/022045.

8. Zikria R. Effect of Geocell Inclusion on Railway Ballast Stability / R. Zikria, U. S. Neyamat // Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. — Sydney, 2021.

9. Колос А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути / А. Ф. Колос // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — Т. 19. — № 3. — С. 558–575.

Дата поступления: 31.09.2023

Решение о публикации: 21.11.2023

Контактная информация:

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц.; sdtk@pgups.ru

СЕРЕБРЯКОВ Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, доц.; sdtk@pgups.ru

ДЕМИН Кирилл Евгеньевич — студент; bymrballis@mail.ru

ЧЕБОТАЕВ Данил Сергеевич — студент; danil.chebotaev@mail.ru

ИСАКОВ Сергей Владимирович — студент; art.213@gmail.com

ЭВАН Николай Александрович — студент; evan.kolya@mail.ru

A Study of Physical and Mechanical Properties of the Ballast Section Materials for Higher-Speed and High-Speed Railways

A. F. Kolos, D. V. Serebryakov, K. E. Dyomin, D. S. Chebotaev, S. V. Isakov, N. A. Evan

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

For citation: Kolos A. F., Serebryakov D. V., Dyomin K. E., Chebotaev D. S., Isakov S. V., Evan N. A. A Study of Physical and Mechanical Properties of the Ballast Section Materials for Higher-Speed and High-Speed Railways. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 15-26. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-15-26

Summary

Purpose: To substantiate the relevance of conducting research on the properties of ballast materials. To describe the methodology for conducting laboratory tests and present the results of a study of the physical and mechanical properties of ballast materials for higher-speed and high-speed train traffic. To propose the design of a ballast section using used car tires. **Methods:** Carrying out laboratory tests of samples of gravel from basalt, granite and gabbro-diabase for abrasion in an abrasion-tester and for impact resistance in a PM drop-testing machine. **Results:** The weight loss has been determined after tests for abrasion in an abrasion-tester and after tests for impact strength on a drop-testing machine. The lowest weight loss has been recorded for a sample of basalt, an intermediate weight loss has been observed for a sample of gabbro-diabase, and the highest - for crushed granite. **Practical significance:** Basalt rocks have the lowest mass loss in both abrasion-tester and impact tests compared to gabbro-diabase and granite. The authors have proposed a variant of the ballast section design and experimentally substantiated the choice of ballast material for this design. The results obtained can be used to substantiate the choice of ballast material in the design and construction and in modeling the performance of ballast in the track.

Keywords: Ballast, railway track, abrasion, impact resistance, abrasion-tester, drop-testing machine, physical and mechanical properties.

References

1. Liu Zh., Feng B., Tutumluer E. Coupling Train-Track Models with the Discrete Element Method for a More Realistic Simulation of Ballasted Track Dynamic. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2023. DOI: 10.1177/03611981231156933.
2. Ren D., Ishikawa T., Tokoro T. Resilient and Permanent Axial Strain of Crusher-Run Materials under The Effect of Principal Stress Axes Rotation, 2022.
3. Arivalagan J., Rujikiatkamjorn Ch., Indraratna B. et al. Effectiveness of Geosynthetics at Preventing Subgrade Instability under Cyclic Loading, 2023, pp. 427–437. DOI: 10.1061/9780784484685.043.
4. Konon A., Petriaev A. Influence of geosynthetics on the oscillations amplitude of railway subgrade. 11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018: 11, Seoul, September 16–21, 2018, Seoul, 2018, vol. 2, pp. 990–998.
5. Petriaev A., Konon A., Egorov V. The Effect of Elastic Pads and Mats on the Stress–Strain State of Railway Subgrade. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, vol. 165, pp. 279–286. DOI: 10.1007/978-3-030-77234-5_23.
6. Abrashitov A. A. Creation of a Two-Layer Ballast Prism of a Railroad Track from Granite Rubble Using Plastic Flat Geogrids and Rubber Crumb of Recycled Automobile Tires. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference “FarEastCon 2019”*, Vladivostok, Russky Island, October 01–04, 2019, vol. 753, 3, Chapter 2, Vladivostok, Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020, p. 032016. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032016.
7. Abrashitov A., Sidrakov A., Zaitsev A. Construction and Current Maintenance of the Reinforced Ballast Layer of the Railway Track. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Virtual, Online, January 10–12, 2022. Virtual, Online, 2022, p. 022045. DOI: 10.1088/1755-1315/988/2/022045.
8. Zikria R., Neyamat U. S. Effect of Geocell Inclusion on Railway Ballast Stability. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Sydney, 2021.
9. Kolos A. F. Zasorenie i zagryaznenie shchebenochnogo ballasta pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti [Clogging and contamination of crushed stone ballast during the operation of railway tracks]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, vol. 19, Iss. 3, pp. 558–575. (In Russian)

Received: September 31, 2023

Accepted: November 21, 2023

Author’s information:

Alexey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; sdtk@pgups.ru

Dmitrii V. SEREBRIAKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; sdtk@pgups.ru

Kirill E. DYOMIN — Student; bymrballis@mail.ru

Danil S. CHEBOTAEV — Student; danil.chebotaev@mail.ru

Sergey V. ISAKOV — Student; art.213@gmail.com

Nikolai A. EVAN — Student; evan.kolya@mail.ru

УДК 621.313

Исследование усталостного старения изоляции тяговых электродвигателей тепловозов при циклической нагрузке

М. А. Шрайбер

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

Для цитирования: Шрайбер М. А. Исследование усталостного старения изоляции тяговых электродвигателей тепловозов при циклической нагрузке // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 27-35. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-27-35

Аннотация

Цель: Выполнить анализ процессов усталостного старения изоляции тяговых электрических машин локомотивов при действии циклических нагрузок в эксплуатации. **Методы:** При решении типовых задач усталостной прочности изоляционных материалов электрических машин локомотивов в исследовании используются периодические циклы нагружения. **Результаты:** Анализ процессов усталостного старения материалов изоляции электрических машин показывает, что основными параметрами, увеличивающими интенсивность старения, являются частота и амплитуда цикла нагревания, а термомеханические напряжения возрастают при увеличении скорости нагрева и амплитуды температуры. **Практическая значимость:** Определение усталостных характеристик материала изоляции имеет очень важное значение при моделировании его повреждений, что позволит повышать надежность электрических машин современных локомотивов на стадиях проектирования, изготовления, модернизации и эксплуатации.

Ключевые слова: Тяговый электродвигатель тепловоза, изоляция электрических машин локомотивов.

Введение

Решение проблемы повышения надежности электрических машин и электрооборудования является одним из приоритетных направлений исследований специалистов и исследователей в XXI веке [1–4]. Известно, что усталостные процессы — это основная причина разрушения конструкций, в том числе электрических машин, при циклическом нагружении. Большое количество работ было посвящено повышению надежности монолитных материалов (металлы и их сплавы). В итоге развился значительный прогресс в создании материалов, способных сопротивляться усталостным процессам, а также появились современные методы прогнозирования срока службы подобных материалов.

Известно, что усталость материала является результатом циклической пластической деформации. Незначительная пластическая деформация материала, возникшая всего один раз, не вызовет каких-либо существенных изменений в структуре изоляционного материала электрической машины, но многократное повторение подобных малых пластических деформаций приведет в итоге к

кумулятивному повреждению и как результат к усталостным разрушениям материала изоляции.

Анализ усталости композитных материалов и последующее прогнозирование срока их службы являются достаточно трудными задачами, так как свойства материалов, составляющих композит, могут быть совершенно различными. На усталостное поведение одного компонента может существенно влиять наличие других компонентов и межфазных областей между волокнами и пропиточным составом. На данный момент поведение компонентов композита при усталостной нагрузке еще далеко не полностью изучено.

Предполагается, что материал изоляции — это стеклоткань, пропитанная специальным лаком или компаундом. Связь между этими двумя компонентами обычно слабая, но можно полагаться на их взаимодействие, так как они остаются в фрикционном контакте и после расслоения. Часто этот фактор не учитывается при выборе компонентов. Однако несоответствие теплового расширения на границе раздела двух различных по структуре материалов (между волокном и пропиточным составом, пропиточным составом и медью проводника либо пропиточным составом и сталью сердечника) создает сжимающее нормальное напряжение. Также наличие фрикционного скольжения на границе раздела материалов формирует основной необратимый механизм, вызывающий их усталостное разрушение [5].

Виды циклического нагружения

Известны три характерных цикла напряжений, согласно которым к изучаемому компоненту могут быть приложены нагрузки. Классифицируют следующие циклы испытаний: циклические испытания на сжатие-сжатие, циклические испытания на растяжение-сжатие и циклические испытания на растяжение-растяжение (рис. 1).

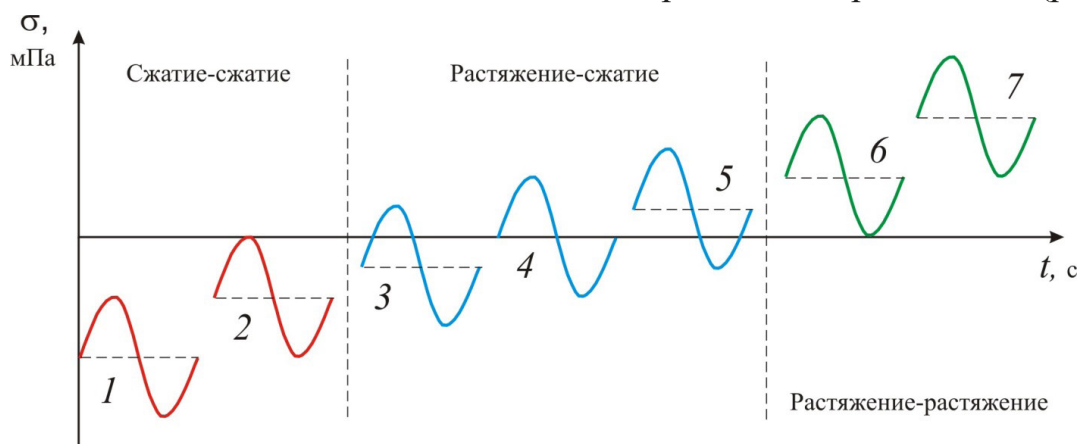


Рис. 1. Классификация циклических нагружений:
 1, 2 — повторяющийся цикл сжатие-сжатие; 3, 5 — ассиметричный цикл растяжение-сжатие; 4 — реверсивный цикл растяжение-сжатие;
 6, 7 — повторяющийся цикл растяжение-растяжение

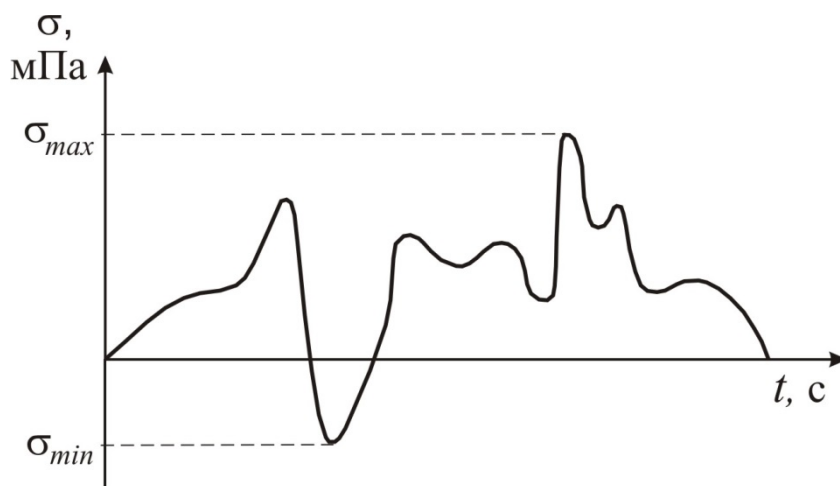


Рис. 2. Случайный цикл нагружения

Наиболее простым является реверсивный цикл напряжения, а именно растяжение-сжатие (зависимость 4). Это синусоида, где максимальное и минимальное напряжения равны между собой, но отличаются знаком. Пример подобного типа цикла напряжения: любая ось, в которой каждые пол-оборота или полпериода напряжение изменяется на противоположное.

Более распространен вид цикла, когда максимальное и минимальное напряжения цикла асимметричны. При этом максимальное напряжение и минимальное напряжение не равны и не противоположны друг другу. Этот тип нагружения называется повторяющимся циклом (зависимости 1, 2, 6, 7).

Описанные выше два типа циклического нагружения представляют собой идеализацию переменных нагрузок, действующих на изучаемые конструкции.

Наиболее приближенным к эксплуатационным условиям является случайный цикл нагружения. В этом случае напряжение, частота и длительность его изменяются случайным образом (рис. 2). Но такое протекание процесса вызывает существенные трудности при математическом описании напряженно-деформированного состояния и моделировании усталостных повреждений.

При решении типовых задач усталостной прочности металлов или их сплавов обычно применяются периодические циклы нагружения, при этом исследователи оперируют с миллионами циклов. Для изучения температурного усталостного разрушения материала изоляции тягового электродвигателя используют режимы со сравнительно небольшим числом циклов нагружения и при сравнительно небольших напряжениях. В этом случае приходится иметь дело с десятками, сотнями, самое большее — с тысячами циклов. Однако для оценки работоспособности материала изоляции при циклическом нагружении к настоящему времени не имеется достаточного количества объективных данных.

Несмотря на то, что усталостное разрушение материала изоляции электрических машин подвижного состава трудно предсказать точно, методика

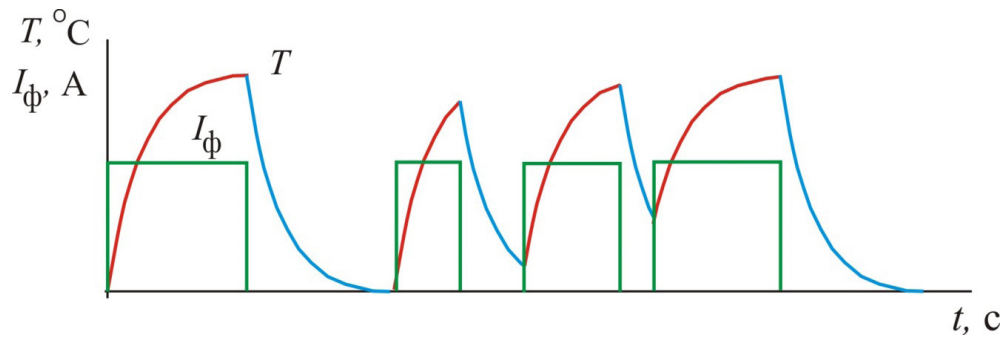


Рис. 3. Изменение температуры обмотки T при изменении фазного тока I_{ϕ} тягового электродвигателя тепловоза

прогнозирования и предотвращения усталостного разрушения необходима при проектировании современных и перспективных тяговых электрических машин.

С целью прогнозирования срока службы изоляции тягового электродвигателя необходимо учитывать циклические параметры изменения температуры. Например, при движении локомотива с составом тепловой цикл создается каждый раз, когда происходит включение или отключение напряжения питания тяговых электродвигателей [6]. С учетом зависимостей нагревания-охлаждения тяговых электрических машин этот процесс будет выглядеть таким, как показано на рис. 3.

При включении и отключении электрической нагрузки последняя оказывает термомеханическое воздействие на все элементы конструкции электрической машины. В результате возникает повышение температуры меди обмотки, что заставляет ее расширяться преимущественно в осевом направлении. Считается, что один цикл соответствует одному процессу нагрева, за которым следует один процесс охлаждения.

Из-за разницы коэффициентов теплового расширения меди и материала изоляции один или оба компонента также испытывают дополнительные нагрузки, и изоляция подвергается большему воздействию, чем все остальные элементы. Такие периоды переменных напряжений повторяются до того момента, пока один из компонентов изоляции не выйдет из строя. В результате электрические свойства изоляции становятся достаточно слабыми, что препятствует выполнению ее функций. Потому изоляция паза должна иметь необходимую прочность на сжатие и сдвиг, чтобы предотвратить ее повреждение.

Подобные процессы особенно заметны в условиях Крайнего Севера и Сибири, когда температура окружающей среды может опускаться ниже минус 45°C зимой и достигать 35°C летом. При длительном движении локомотива на холостом ходу температура обмоток часто приближается к температуре окружающей среды, в то время как рабочая температура обмоток тяговых электродвигателей под нагрузкой может составлять $130\text{--}150^{\circ}\text{C}$ и выше. Вот поэтому следует для прогнозирования срока службы материала изоляции электрических машин локомотивов учитывать циклические диапазоны изменения температур.

Усталостные изменения в структуре материала изоляции

Результаты исследований [7–9] показывают, что изменения жесткости слоистого материала влияют на усталостную долговечность и могут использоваться в качестве индикатора старения изоляции тяговых электрических машин. Слоистые материалы претерпевают явные изменения жесткости K , разделенные на три стадии, как показано на рис. 4.

На первом этапе (зона I) происходит быстрое снижение нормированной жесткости (2–5 %), вызванное первичными трещинами, и некоторое ограниченное разрушение волокна соответствует его 10–15 % срока службы. По мере продолжения циклического нагружения первичные и вторичные трещины приводят к непрерывному, медленному и линейному снижению нормализованной жесткости на 1–8 % (зона II), в течение которой достигается 85–95 % усталостной долговечности. Наконец, в конце срока службы наблюдается резкое снижение нормированной жесткости, характеризующееся расслоением и окончательным разрушением материала изоляции (зона III).

При исследовании систем изоляции специалисты пытаются ускорить процесс старения, чтобы иметь возможность оценить материалы и методы испытаний в течение приемлемо короткого времени. Таким образом, ускоренные испытания являются наиболее подходящим средством исследовать характеристики старения, при которых применяемые ограничения окружающей среды или электрические нагрузки сильнее, чем в номинальных условиях эксплуатации. Следовательно, для заданного уровня надежности продолжительность испытаний при ускоренных методах исследования значительно сокращается. Испытания на старение не могут проводиться систематически на реальном оборудовании по очевидным причинам продолжительности и стоимости. Вместо этого должны использоваться опытные образцы, представляющие системы изоляции электрической машины.

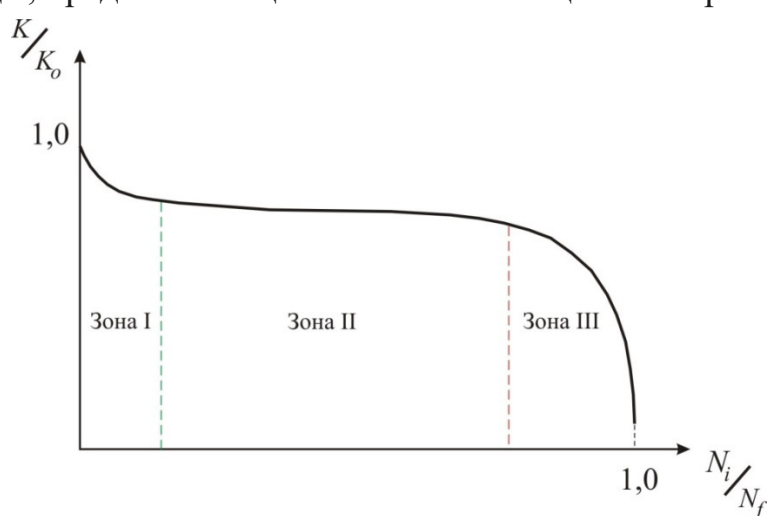


Рис. 4. Стадии усталостного изменения жесткости слоистого материала

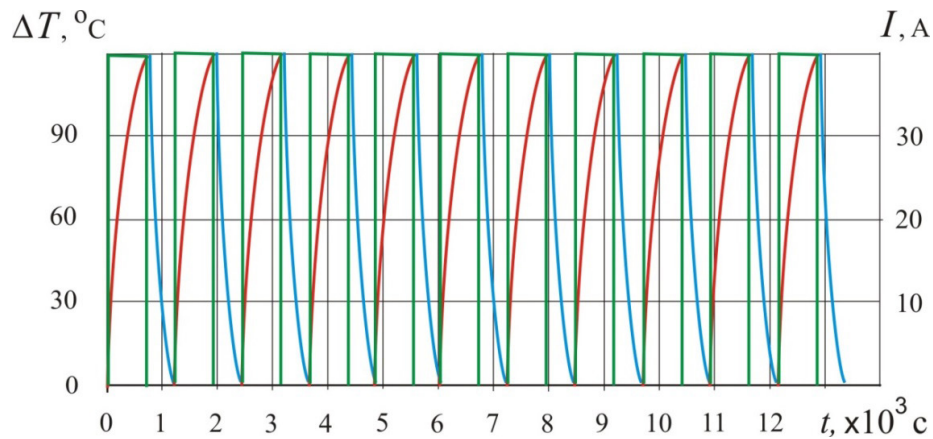


Рис. 5. Основные параметры нагрева обмотки при исследовании старения изоляции

Оценка способности изоляционной системы сопротивляться разрушению под действием электрического напряжения регулируется стандартами, установленными Международной электротехнической комиссией (МЭК). Хотя отдельные параметры, такие как испытательное напряжение и частота или тип образца, могут различаться в зависимости от применения, но при проведении испытаний на ускоренное старение необходимо соблюдать некоторые общие правила.

Ускоренное старение может быть реализовано за счет увеличения электрических нагрузок (уровень напряжения, частота, величина, рабочий цикл, скорость нарастания и т. д.), воздействий окружающей среды (влажность, давление, температура, механическое напряжение) или любого другого уровня ограничений. Коэффициент ускорения не должен быть слишком высоким, чтобы обеспечить единый механизм старения и не создавать дополнительных явлений, которых не было бы при номинальной работе. Чем выше ускорение и уровни напряжения, тем больше неопределенность модели срока службы. С другой стороны, выбор уровней нагрузки, слишком низких или слишком близких к условиям эксплуатации, может привести к неоправданно длительным испытаниям с очень низким числом отказов. Таким образом, подход заключается в поиске компромисса между продолжительностью испытаний и точностью модели для точной оценки срока службы изоляционных систем в реальных условиях.

В данном исследовании используется повторение процессов нагрева-охлаждения до получения конечного результата (рис. 5).

С одной стороны, такой цикл нагрузки в определенной степени отображает процессы работы материала изоляции, а с другой — такой интенсивности процесса нагружения нет в условиях реальной эксплуатации ТЭД. Старение, выполненное при таком напряжении, не может быть непосредственно экстраполировано на реальную среду, но гарантирует, что срок службы реальной системы существенно превосходит срок службы, полученный при ускоренном старении, поскольку он представляет собой наихудший возможный случай.

Упрощенное описание ускоренного старения заключается в том, что эффект, похожий на естественное старение, возникает за более короткое время. Реализм ускорения зависит, по крайней мере, от того, чтобы фактор ускорения не был настолько высоким, чтобы модифицировать доминирующий механизм старения; например, это может произойти, если ускоренное напряжение приведет к аномально высокой температуре или нагрузкам, которых никогда не было бы при нормальной работе.

Стандарты избегают заявлений о прямом сходстве с эффектами эксплуатации, излагая только метод, с помощью которого можно сравнивать различные группы объектов испытаний, таких как установленная и экспериментальная система изоляции. Подразумевается, что ускоренные методы испытаний дадут результаты, коррелирующие с теми, которые можно было бы увидеть в реальной эксплуатации

Выводы

Необратимые изменения, которые постепенно происходят в изоляционной системе из-за рабочих нагрузок и воздействия окружающей среды, могут продолжаться многие годы. Механизмы старения изменяют характеристики компонентов материала изоляции и снижают их электроизоляционные свойства. Исследованиями было показано, что вредные факторы могут действовать на материал изоляции по отдельности, но в большинстве случаев в различном их сочетании.

Основными параметрами термоциклирования, которые ускоряют старение системы электрической изоляции тяговых электрических машин тепловоза, являются частота и амплитуда цикла нагревания. При этом термомеханические напряжения будут больше при увеличении скорости нагрева и амплитуды температуры.

Использование методов ускоренного старения также может быть полезно для оценки новых методов диагностики и установления критериев интерпретации результатов. В этих ситуациях использование реальных систем изоляции в естественных условиях эксплуатации имеет несколько проблем. Одним из них является замедление изменений из-за старения, хотя это не так критично, поскольку измерения можно производить на широком диапазоне возрастов существующих электрических машин.

Библиографический список

1. Pedersen K. B. Dynamic modeling method of electro-thermo-mechanical degradation in IGBT modules / K. B. Pedersen, K. Pedersen // IEEE Trans. Power Electron. — 2016. — Iss. 31. — Pp. 975–986.
2. Chen W. Thermal stress in bonded joints / W. Chen, C. Nelson // IBM Journal of Research and Development. — 1979. — Vol. 23. — Iss. 2. — Pp. 179–188.

3. Kokko Voitto I. J. Ageing Due to Thermal Cycling by Start and Stop Cycles in Lifetime Estimation of Hydroelectric Generator Stator Windings / Voitto I. J. Kokko // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). — 2011.

4. Dakin T. W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon / T. W. Dakin // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. — 1998. — Vol. 67. — Iss. 1. — Pp. 113–122.

5. Grachev V. V. Thermomechanical voltages in the insulation of traction electric machines of locomotive / V. V. Grachev, M. A. Shrajber // Journal of Physics: Conference Series. “Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ИТММ 2021 — Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres” 2021. — P. 042087.

6. Grishchenko A. V. Experimental studies of the thermal state of the TED collector / A. V. Grishchenko, V. V. Grachev, F. Yu. Bazilevsky et al. // In the collection: Locomotives. Electric transport. XXI Century.

7. Grishchenko A. V. Simulation of thermal processes in asynchronous traction electric motor of a locomotive / A. V. Grishchenko, M. A. Shrajber // Journal of Physics: Conference Series. “Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ИТММ 2021 — Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres” 2021. — P. 042088.

8. Grachev V. V. A model of stator-winding heat flow for an induction traction electric motor / V. V. Grachev, A. V. Grishchenko, I. G. Kiselev et al. // Russian Electrical Engineering. — 2022. — Vol. 93. — Iss. 2. — Pp. 95–97.

9. Grishchenko A. V. Thermomechanical stresses in the insulation of traction electric machines of diesel locomotives / A. V. Grishchenko, M. A. Shrajber // In the collection: III Betancourt International Engineering Forum. Collection of works in two volumes. — St. Petersburg, 2021. — Pp. 107–109.

Дата поступления: 18.09.2023

Решение о публикации: 10.11.2023

Контактная информация:

ШРАЙБЕР Марина Александровна — канд. техн. наук, доц.; goshapti4ka@yandex.ru

Investigation of Fatigue Aging of Insulation of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives Under Cyclic Load

M. A. Shrajber

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

For citation: Shrajber M. A. Investigation of Fatigue Aging of Insulation of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives Under Cyclic Load. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 27–35. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-27-35

Summary

Purpose: To analyze the processes of fatigue aging of the insulation of traction electric machines of locomotives under cyclic loads in operation. **Methods:** When solving typical problems of fatigue strength of insulating

materials of electric locomotives, periodic loading cycles are used in the study. **Results:** The analysis of the processes of fatigue aging of insulation materials of electrical machines shows that the main parameters that increase the intensity of aging are the frequency and amplitude of the heating cycle. Thermomechanical stresses increase with rise of heating speed and temperature amplitude. **Practical significance:** Determination of the fatigue characteristics of the insulation material is very important when modeling its damage, which will increase the reliability of electric machines of modern locomotives at the stages of design, manufacture, modernization and operation.

Keywords: Traction electric motor of a diesel locomotive, insulation of electric machines of locomotives.

References

1. Pedersen K. B., Pedersen K. Dynamic modeling method of electro-thermo-mechanical degradation in IGBT modules. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, Iss. 31, pp. 975–986.
2. Chen W., Nelson C. Thermal stress in bonded joints. *IBM Journal of Research and Development*, 1979, vol. 23, Iss. 2, pp. 179–188.
3. Kokko Voitto I. J. Ageing Due to Thermal Cycling by Start and Stop Cycles in Lifetime Estimation of Hydroelectric Generator Stator Windings. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011.
4. Dakin T. W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1998, vol. 67, Iss. 1, pp. 113–122.
5. Grachev V. V., Shrajber M. A. Thermomechanical voltages in the insulation of traction electric machines of locomotive. *Journal of Physics: Conference Series*. “Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, IITMM 2021 — Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres” 2021, p. 042087.
6. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Bazilevsky F. Yu. et al. Experimental studies of the thermal state of the TED collector. In the collection: *Locomotives. Electric transport. XXI Century*.
7. Grishchenko A. V., Shrajber M. A. Simulation of thermal processes in asynchronous traction electric motor of a locomotive. *Journal of Physics: Conference Series*. Ser. “Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, IITMM 2021 — Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres” 2021, p. 042088.
8. Grachev V. V., Grishchenko A. V., Kiselev I. G. et al. A model of stator-winding heat flow for an induction traction electric motor. *Russian Electrical Engineering*, 2022, vol. 93, Iss. 2, pp. 95–97.
9. Grishchenko A. V., Shraiber M. A. Thermomechanical stresses in the insulation of traction electric machines of diesel locomotives. In the collection: *III Betancourt International Engineering Forum. Collection of works in two volumes*. St. Petersburg, 2021, pp. 107–109.

Received: September 18, 2023

Accepted: November 10, 2023

Author's information:

Marina A. SCHRAJBER — PhD in Engineering, Associate Professor; goshapti4ka@yandex.ru

УДК 629.426(045)

Концепция модификации магистральных грузовых тепловозов для работы по газодизельному циклу

Д. И. Прохор¹, В. В. Лысенко¹, В. В. Никитин²

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

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

Для цитирования: Прохор Д. И., Лысенко В. В., Никитин В. В. Концепция модификации магистральных грузовых тепловозов для работы по газодизельному циклу // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 36-51. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-36-51

Аннотация

Цель: Разработка концепции модификации части парка автономных магистральных грузовых локомотивов для снижения стоимости их жизненного цикла и вредного влияния на окружающую среду.

Методы: Авторами выполнен анализ потребительских и эксплуатационных свойств, компоновочная и проектно-конструкторская проработка изменения конструкции магистральных грузовых тепловозов при их модификации для работы по газодизельному циклу. На основе опыта эксплуатации газомоторных локомотивов предложена унификация видов и оптимизация криогенногазового оборудования, вводимого в конструкцию модифицируемых тепловозов. Определены критерии и условия для проведения модификации, а также технические решения, направленные на минимизацию изменений конструктива штатного тепловоза. **Результаты:** Сформулированы задачи повышения экономичности и экологических показателей тепловозов, обоснован выбор конструкционного решения для модификации парка автономных локомотивов, выполнен анализ энергетической и экономической эффективности газодизельных локомотивов, предложены критерии отбора тепловозов для модификации, предложены конструктивные изменения при модификации тепловозов для работы по газодизельному циклу.

Практическая значимость: Предлагаемая концепция модификации автономных локомотивов позволит сократить стоимость их жизненного цикла, уменьшить выбросы продуктов сгорания топлива и минимизировать длительность и стоимость этапа переоборудования штатных дизельных локомотивов для работы по газодизельному циклу.

Ключевые слова: Автономный локомотив, тепловой двигатель, дизельное топливо, сжиженный природный газ.

Введение

Лидерство на внутреннем рынке транспортных услуг и высокая конкурентоспособность на глобальном уровне во многом обеспечиваются продуманной, результативной и эффективной стратегией научно-технологического и инновационного развития отрасли. ОАО «РЖД» сохраняет лидирующие позиции по энергоэффективности и экологичности грузовых и пассажирских перевозок среди всех видов транспорта.

Перевод парка автономных локомотивов на использование в качестве топлива природного газа позволит снизить стоимость жизненного цикла газомоторных локомотивов по сравнению с дизельными тепловозами на 8,5 % и сократить выбросы вредных веществ в атмосферу в 6 раз [1–3].

Выбросы вредных веществ и углеродный след автономного подвижного состава являются физическими характеристиками одного процесса — горения топлива. Содержание вредных веществ в отработавших газах от автономного подвижного состава жестко регламентируется законодательством, стандартами и системой сертификации. Кроме того, как и любая транспортно-эксплуатирующая организация, ОАО «РЖД» стремится снизить свои эксплуатационные расходы [4].

Решение текущих задач повышения экологичности и экономичности магистральных грузовых тепловозов

Сопутствующими задачами при использовании альтернативного топлива (природного газа) является минимизация технических и экономических затрат, а также обеспечение:

- уменьшения нагрузки на окружающую среду и снижения стоимости потребляемых топливно-энергетических ресурсов;
- минимизации длительности этапа внедрения разработки;
- минимизации стоимости переоборудования действующих тепловозов с определением минимально необходимых изменений их конструкции;
- минимизации последствий административно-логистических сбоев поставки и экипировки альтернативным топливом — сохранение возможности эксплуатации в дизельном режиме.



Рис. 1. Решение задач снижения экологической нагрузки, эксплуатационных расходов и минимизации сопутствующих затрат тепловозов

С учетом этих задач на начальном этапе массового внедрения газомоторного топлива оптимальным решением будет являться выполнение модификации магистральных тепловозов для работы по газодизельному циклу [5]. Пути решения проблемы представлены на рис. 1.

Выбор оптимального конструкционного решения

В настоящее время газомоторные локомотивы могут быть представлены следующими типами: газотурбовоз, газопоршневой тепловоз, газодизельный тепловоз.

Преимущества и недостатки разных типов газомоторных локомотивов представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Преимущества и недостатки разных типов газомоторных локомотивов

Тип газомоторного локомотива	Преимущества	Недостатки
Газотурбовоз	Высокая удельная мощность, поэтому одна силовая установка заменяет 3 дизеля. Низкие выбросы вредных веществ. Снижение затрат на топливо. Меньшая трудоемкость при текущих ремонтах	Относительно большой удельный выброс парниковых газов (CO_2) вследствие низкого КПД. Высокая стоимость силового блока. Высокое потребление топлива на малых мощностях силовой установки. Модификация или модернизация из штатного локомотива практически невыполнима
Газопоршневой тепловоз	Низкие выбросы вредных веществ. Самые низкие затраты на топливо из газомоторных локомотивов. Преимущество конструкции для эксплуатирующего и обслуживающего персонала	Необходима тендерная секция и ее обслуживание. Требуется проектирование и постройка на производство новых двигателей или новых локомотивов. Модификация (модернизация) из штатного возможна только при перепроектировании или полной замене двигателя на газовый
Газодизельный тепловоз	Наименьшие сроки разработки. Наименьшая стоимость разработки. Наименьшее изменение штатной конструкции тяговых секций. Низкие выбросы вредных веществ. Возможность использования только дизельного топлива. Низкие затраты на топливо. Преимущество конструкции для эксплуатирующего и обслуживающего персонала. Возможность модификации (модернизации) с собственным двигателем	Необходима тендерная секция и ее обслуживание. Сервисное обслуживание двух топливных систем. На малых позициях контроллера зачастую используется только дизельное топливо, что снижает экономическую эффективность двигателя относительно газопоршневого варианта

Вопросы экологии

За последние несколько лет требования к выбросам вредных веществ значительно ужесточились. В табл. 2 представлена динамика изменения требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами автономного тягового подвижного состава.

После достижения выброса оксидов азота с отработавшими газами уровня от 9 до 12 г/кВт · ч дальнейшее снижение выбросов оксидов азота без увеличения расхода топлива только за счет рабочего процесса дизельного двигателя стало труднодостижимым. Однако применение природного газа позволяет улучшить этот показатель. ОАО «РЖД» располагает положительным опытом эксплуатации газотурбовозов ГТ1h-001, ГТ1h-002, ТЭМ19-001 на полигоне Свердловской ж. д. [6]. Экологические показатели российских газомоторных локомотивов в сравнении с аналогичными по мощности дизельными локомотивами приведены в табл. 3.

Как было зафиксировано в условиях эксплуатации, применение газомоторной техники позволяет снизить выбросы оксидов азота NO_x на 76–95 %, дымность на 60–86 %, монооксида углерода на 11–27 %.

Также следует отметить, что эксплуатация газомоторных локомотивов подтвердила:

- экономию эксплуатационных расходов по опыту эксплуатации газомоторных локомотивов — до 40 %;
- увеличение ресурса двигателя;
- сокращение времени технического обслуживания ввиду меньшего износа двигателя.

ТАБЛИЦА 2. Динамика изменения требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами автономного тягового подвижного состава

Параметр	ГОСТ 24585—81	ГОСТ 51249—99 до 2000 г.	ГОСТ 51249—99 с 2000 г.	ГОСТ 33574—2016 с 2025 г.	ГОСТ 33574—2016 с 2035 г.
Оксиды азота NO_x , г/кВт · ч	29	18	12	7,4	3,81
Монооксид углерода CO, г/кВт · ч	10	6	3	3,5	3,50

ТАБЛИЦА 3. Экологические показатели российских газомоторных локомотивов в сравнении с дизельными локомотивами

Параметр	ЗТЭ116У	ГТ1h	Снижение	ТЭМ18ДМ	ТЭМ19	Снижение
Оксиды азота NO_x , г/кВт · ч	12,0	1,9	На 84 %	12,0	2,90	На 76,0 %
Монооксид углерода CO, г/кВт · ч	1,1	0,8	На 27 %	3,5	3,20	На 8,5 %
Дымность, %	6,5	0,9	На 86 %	4,7	0,19	На 96,0 %

В случае с газодизельным локомотивом уменьшение выбросов вредных веществ относительно базового двигателя будет пропорционально среднеэксплуатационному замещению дизельного топлива.

Энергетическая и экономическая эффективность

Выполненный технико-экономический анализ, учитывающий результаты работы по сети штатных и газомоторных локомотивов [7, 8], позволил определить удельную стоимость на измеритель перевозочной работы для различных видов тяги и топлива с учетом стоимости топлива и КПД локомотивов. Результаты приведены в табл. 4. Электровозная тяга в табл. 4 приведена справочно, для общего сравнения.

Результаты, приведенные в табл. 4, определялись при следующих условиях:

- стоимость сжиженного природного газа составляет 50 % стоимости дизельного топлива по сети железных дорог;
- расчеты показателей тепловозов выполнены для участка Коротчаево — Войновка — Коротчаево с поездами 6300 т [7, 8];
- показатели использования при газотурбовозной тяге приняты по результатам опытных поездок на участках Сургут — Войновка, Войновка — Сургут, Лимбей — Сургут и Сургут — Коротчаево с поездами весом 8445–9220 тонн;
- газопоршневой режим принят равным по мощности дизельному режиму;
- среднеэксплуатационный режим замещения дизельного топлива природным газом для газодизельной тяги составляет 80 % [9];
- единицы измерения удельного расхода топлива к единице выполненной работы локомотивов, принятой на железнодорожном транспорте — «на измеритель» 10^4 ткм-бр, пересчитаны в стоимость удельного расхода топлива с учетом стоимости топлива.

ТАБЛИЦА 4. Энергетическая и экономическая эффективность различных видов тяги и топлива

Вид тяги	Стоимость 1 кг топлива, руб.	Стоимость количества топлива, энергетически равного 1 кВт · ч электрической энергии, руб.	Удельная стоимость затраченного топлива на измеритель, руб/ 10^4 , ткм-бр
Дизельная	74,50	6,28	1140
Газотурбинная	37,25	2,73	1026
Газодизельная (среднеэксплуатационный режим)	47,17	3,33	769
Газопоршневая	37,25	2,73	617
Электровозная тяга (справочно)	—	4,03	461

Представленные результаты расчетов показали, что в случае газодизельного локомотива результирующий эффект от экономии на топливно-энергетических ресурсах может составить до 32 % по отношению к аналогичному дизельному тепловозу, а при газопоршневом — до 45 %.

Основные отличия природного газа от дизельного топлива, влияющие на конструкторские исполнения локомотивов

Несмотря на явные преимущества, применение природного газа на транспорте несколько осложнено его специфическими физико-химическими свойствами по сравнению с дизельным топливом, а именно: энергоемкостью (МДж/кг) и плотностью (кг/м³) [10].

Сравнение физических свойств природного газа и дизельного топлива показано в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Сравнение физико-химических свойств природного газа и дизельного топлива

Топливо	Энергоемкость, МДж/кг	Плотность, кг/м ³	Энергоемкость, МДж/м ³	Объем относительный при равной энергоемкости, ед.
СПГ	49,0 (45,4–52,6)	420	20 580	1,78
ДТ	42,7	860 (840–860)	36 722	1,00

Минимальная теплота сгорания природного газа марки «Б» по ГОСТ 56021 для двигателей внутреннего сгорания допускает значения 45,4–52,6 МДж/кг. Анализ АО «ВНИКТИ» за 2014–2020 гг. поставщиков СПГ из четырех различных регионов показал устойчивое значение 49,0 МДж/кг, что и принято при выполнении расчетов. Аналогичный параметр для дизельного топлива составляет 42,7 МДж/кг, т. е. газ обладает энергоемкостью, большей на 12 %.

Следует заметить, что данное преимущество природного газа сопряжено с рядом проблем:

- большей термической нагрузкой для деталей и узлов двигателя;
- необходимостью повышения эффективности системы охлаждения относительно базовой;
- для размещения на борту локомотива природного газа требуется почти в два раза больше объема, чем дизельного топлива при аналогичном запасе хода.

Приведенные выше отличия оказывают существенное влияние на конструкторские решения при модификации тепловозов.

Критерии отбора тепловозов для модификации

Выполненный технико-экономический анализ определил критерии отбора магистральных тепловозов для модификации на газодизельный цикл [5, 11, 12]:



Рис. 2. Общий вид магистрального газотепловоза

- остаточный срок службы после модернизации должен быть более срока окупаемости модификации;
- наличие микропроцессорной системы управления;
- наличие двух и более тяговых секций;
- возможность сохранения полноценной работы в дизельном режиме.

При этом значительному изменению будет подвергнута микропроцессорная система управления локомотива в части программного обеспечения по обработке значений параметров нового оборудования и изменения алгоритмов управления [13]. Переход от дизельного к газодизельному режиму и обратно будет выполняться автоматически по ряду критериев работы локомотива и системы диагностики, при этом возможен принудительный переход в дизельный режим.

Общий вид газотепловоза показан на рис. 2.

Тендерная секция

Работа в газодизельном цикле определяет больший расход СПГ при его меньшей плотности, чем у дизельного топлива, по этой причине магистральный газотепловоз должен иметь запас газа вне тяговых секций, на отдельной тендерной секции. Тендерная секция может быть выполнена на базе любой подходящей по длине ходовой части вагона, платформы или локомотива. Для упрощения конструкции и обслуживания тендерную секцию целесообразно выполнять необмоторенной.

Поскольку наличие тендерной секции на газотепловозе обязательно, то при проектировании должна быть использована возможность размещения на этой секции максимального количества нового оборудования, тем самым уменьшая его количество в тяговых секциях и снижая необходимость изменений в их конструкции.

От криогенной емкости с запасом СПГ в обоих направлениях должны быть расположены одинаковые комплекты криогенно-газового оборудования регазификации и понижения давления, от которых регазифицированный газ под пониженным давлением должен подаваться в тяговые секции.

Для общей безопасности и минимизации затрат указанное оборудование целесообразно располагать на открытом воздухе, так как природный газ значительно легче атмосферного воздуха и в случае утечки он будет улетучиваться в атмосферу, не создавая взрывоопасных концентраций (5–15 %). Если же криогенно-газовое оборудование тендерной секции располагать в закрытых отсеках, то их необходимо

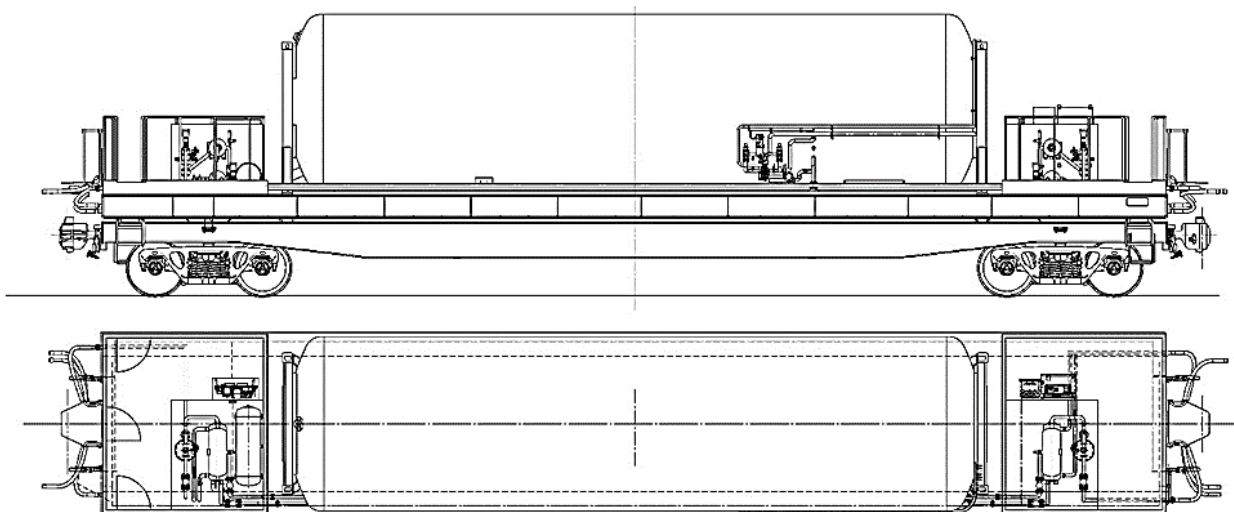


Рис. 3. Универсальная открытая тендерная секция газотепловоза

будет оборудовать системой контроля загазованности, системой пожаротушения и аварийной вентиляции, что усложнит конструкцию и увеличит ее стоимость.

Общий вид открытой тендерной секции представлен на рис. 3.

На тендерной секции целесообразно расположить:

- криогенную емкость с запасом СПГ, которая будет иметь горловины заправки и выдачи СПГ, запорно-предохранительную арматуру, устройство сброса давления в газовой подушке емкости;
- продуктовый теплообменник — для регазификации СПГ в газообразное агрегатное состояние;
- ресивер;
- фильтр газа;
- редуктор;
- запорно-предохранительную арматуру и трубопроводы, а также электроуправляемые отсечные клапаны;
- контрольно-измерительные элементы (датчики температуры и давления).

Представленный вариант газоподготовки является результатом продолжительной технической проработки, направленной на упрощение конструкции системы хранения и выдачи СПГ, увеличение ее надежности за счет отказа от сложного технического оборудования, что упростит ее техническое обслуживание и ремонт, сделает ее более универсальной и наименее затратной из возможных вариантов, а также универсальной практически для всех газотепловозов.

Дополнительное оборудование тяговых секций

Из вновь устанавливаемого оборудования непосредственно в тяговой секции требуется расположить:

- дополнительный антифризный контур отбора тепла для регазификации газа в продуктовом теплообменнике;
- дополнительные межкузовные шланговые соединения по газу и антифризу, поскольку конструктивно и технологически на тяговую секцию проще передавать уже регазифицированный газ низкого давления, а продуктовый теплообменник в этом случае целесообразно располагать на тендерной секции;
- отсечной электроуправляемый клапан;
- безопасное дренажное устройство на основе предохранительного клапана и электроуправляемого клапана, аналогичного отсечному;
- датчики обнаружения метана и устройства аварийной вентиляции (необходимая безопасность для закрытых помещений, в данном случае — машинного отделения);
- систему управления подачей топлива в двигатель с комплектом устройств подачи топлива.

Антифризный контур

Регазификация в продуктовом теплообменнике тендерной секции осуществляется за счет подвода к нему по гибким межкузовным соединениям подогретого антифриза. Поскольку СПГ в продуктовом теплообменнике имеет отрицательную температуру, необходимо использовать соответствующий теплоноситель, например антифриз, а не воду из охлаждающей системы дизеля. Антифриз должен подогреваться через отдельный небольшой теплообменник от охлаждающей жидкости дизеля. В данном случае антифризный контур гидравлически не связан с системой охлаждения тепловоза и при расцепе секций или утечках система охлаждения тепловоза не пострадает.

Система управления подачей топлива в двигатель с комплектом устройств подачи топлива

Система управления может иметь произвольную конфигурацию, но неизменную функцию: подавать в двигатель оба вида топлива в соответствии с командами системы управления высшего уровня локомотива и осуществлять диагностику и контроль рабочих параметров двигателя. Конструктивно проще подавать регазифицированный газ в цилиндры дизеля вместе с впускным воздухом, не затрагивая конструкцию самих цилиндров (крышек цилиндров). Система управления может иметь произвольную конфигурацию, но неизменную функцию: подавать в двигатель оба вида топлива в соответствии с командами системы управления высшего уровня локомотива. Ее основными элементами являются: электронный блок обработки данных и управления подачей топлива; насосы и электроуправляемые

газовые клапаны, подающие газ из газового коллектора в цилиндры или впускной воздух цилиндров; газовый коллектор, принимающий газ от системы газоподготовки; преобразователи и измерители давления впускного воздуха, масла, газа, температуры воды, выхлопных газов, измерители фазной метки распределительного газа, измерители частоты вращения.

Замещение дизельного топлива природным газом без изменения конструкции охлаждающих и выпускных устройств тепловоза

Принцип замещения дизельного топлива природным газом без изменения конструкции охлаждающих и выпускных устройств тепловоза более наглядно показан на рис. 4.

Для эффективного применения природного газа необходимо добиться максимального замещения им дизельного топлива, т. е. дизельное топливо должно расходоваться только на воспламенение газозелдушной смеси.

В зависимости от базовой конструкции дизельного двигателя возможно организовать подачу газа уже с нулевой позиции контроллера. Если для этого требуется изменять конструктив и вводить дополнительные управляемые дроссельные устройства, то целесообразнее оставить конструкцию без изменений и подачу газа осуществлять со второй или третьей позиции.

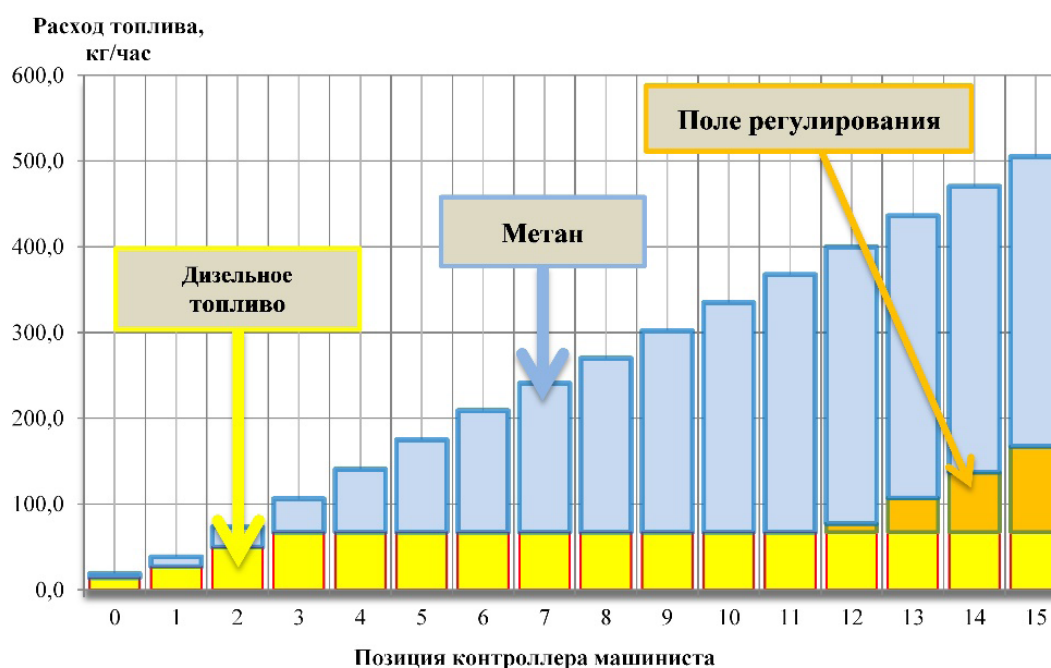


Рис. 4. Диаграмма замещения дизельного топлива (желтый цвет) природным газом (голубой цвет) с зоной регулирования (оранжевый цвет) на различных позициях контроллера машиниста

Поле регулирования замещения

В его пределах может использоваться как дизельное топливо, так и газ с различным их долевым количеством. Если на начальных и средних позициях контроллера машиниста термической прочности узлов тепловоза достаточно, то на высоких позициях имеющегося запаса может не хватать, в связи с чем можно либо изменить конструкцию системы охлаждения и выпускных устройств в сторону больших нагрузок, что концептуально неприемлемо, либо, используя систему управления, контроля и диагностики локомотива, систему управления подачи топливом и исходя из реальных условий, на которые в том числе влияют и климатические факторы, изменять процентное отношение подаваемого газа и дизельного топлива по алгоритму, обеспечивающему недостижение критических для силовой установки локомотива значений температуры и давления. Диапазон контролируемого изменения процента замещения является полем регулирования. Именно этот принцип позволит сохранить базовую конструкцию тепловоза без изменений и, согласно расчетам, получить среднеэксплуатационный коэффициент замещения дизельного топлива на уровне 80 % даже при подаче газа только с третьей позиции контроллера машиниста [9].

Среднеэксплуатационное замещение дизельного топлива магистрального газодизельного тепловоза в зависимости от веса поезда

Как показано на рис. 4, на разных позициях контроллера машиниста доля замещения дизельного топлива будет различна и значение среднеэксплуатационного замещения будет зависеть от веса поезда и профиля пути.

Тяговые расчеты, выполненные для полигонов будущей эксплуатации модифицированных газодизельных магистральных грузовых тепловозов 2ТЭ116У — Северного широтного хода и Свердловской ж. д., с поездами от 1700 до 6300 тонн в различных направлениях — показали возможность среднеэксплуатационного замещения на уровне 80 % [9]. Эта величина зависит от загрузки тепловоза и возрастает по мере увеличения веса поезда. В общем случае данная характеристика будет меняться также и при изменении профиля пути. На рис. 5 отображено изменение среднеэксплуатационного замещения дизельного топлива в зависимости от веса поезда.

Расчет кратности экипировок и изменения запаса хода

С учетом фактического запаса топлива и выполненных расчетов определена кратность экипировок сжиженным природным газом и дизельным топливом

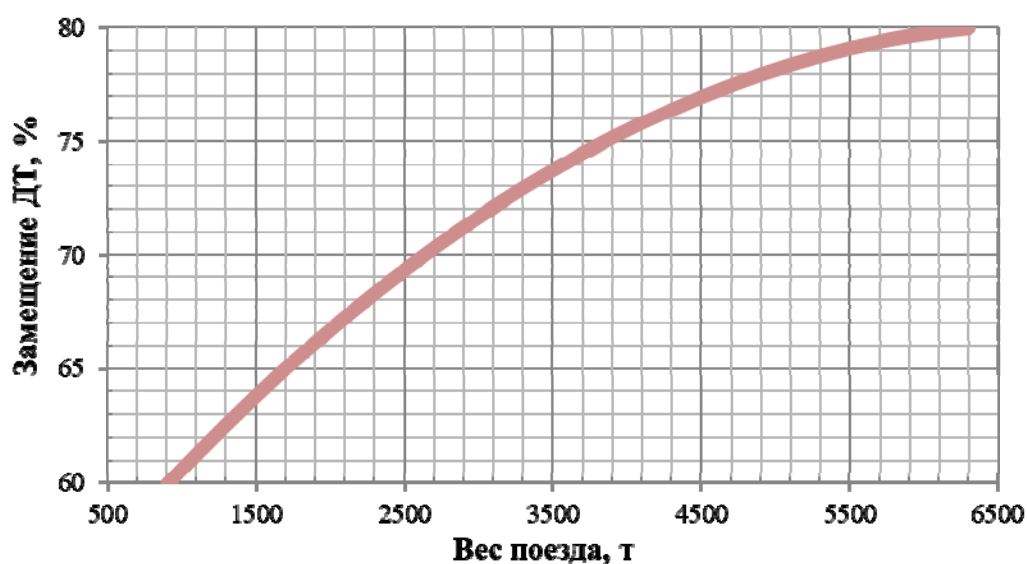


Рис. 5. Среднеэксплуатационное замещение дизельного топлива магистрального газодизельного тепловоза в зависимости от веса поезда

на примере модифицированного магистрального газодизельного тепловоза 2ТЭ116У [9, 14]. Результаты представлены в табл. 6.

Из табл. 6 следует, что в диапазоне загрузки рассматриваемого газодизельного локомотива поездами весом от 3500 до 6300 т локомотив стабильно будет иметь две экипировки природным газом на одну экипировку дизельным топливом, а при весе поездов менее 3500 т экипировки обоими видами топлива могут производиться одновременно. Данные о кратности экипировки по видам топлива позволят оптимизировать вариативность организационных и логистических мероприятий.

ТАБЛИЦА 6. Кратность экипировок топливом и увеличение запаса хода

Замещение эксплуатационное ДТ на СПГ, %	Вес поезда, т	Расход ДТ при выработке бортового запаса СПГ, т (справочно)	Количество экипировок СПГ за одну экипировку ДТ	Остаток ДТ перед экипировкой ДТ, кг	Остаток СПГ перед экипировкой ДТ, кг	Увеличение запаса хода на одной экипировке ДТ
80 : 74	6300 : 3500	4625 : 6581	2	4112 : 700	3059	в 3,8 раза
73 : 60	3500 : 900	6851 : 12349	1	6511 : 1013	1529	в 2,4 раза

Кроме того, при использовании запаса сжиженного природного газа газодизельный локомотив получает увеличение запаса хода относительно штатного дизельного локомотива. Запас хода по истощению одного бортового запаса дизельного топлива и одного запаса природного газа по отношению к базовому варианту тепловоза в среднем может быть увеличен в 1,54 раза, а с промежуточной экипировкой сжиженным газом (до истощения дизельного бака) — в 3,8 раза.

Заключение

Повышение энергетической эффективности и экологических показателей автономных грузовых локомотивов возможно при их модификации для работы по газодизельному циклу. При таком изменении конструкции можно ожидать сокращения стоимости жизненного цикла локомотивов за счет более низкой стоимости топлива, сокращения эксплуатационных расходов, увеличения ресурса двигателя и сокращения времени технического обслуживания. Замещение дизельного топлива природным газом позволит существенно снизить вредные выбросы в атмосферу, возникающие при сгорании топлива. Кроме этого, предложенная концепция переоборудования штатных дизельных локомотивов для работы как на дизельном топливе, так и на сжиженном природном газе позволит обеспечить минимальные сроки и стоимость модификации за счет сохранения преемственности основных узлов конструкции локомотива, а также простоты освоения модифицированных локомотивов эксплуатирующим и обслуживающим персоналом.

Библиографический список

1. Заручейский А. В. Использование природного газа на автономных локомотивах / А. В. Заручейский // Транспорт Российской Федерации. — 2008. — № 5. — С. 56–58.
2. Бабков Ю. В. Газомоторное топливо для подвижного состава / Ю. В. Бабков, Д. И. Прохор // Neftegaz.RU. — 2021. — № 9. — С. 33–37.
3. Фофанов Г. А. Природный газ — моторное топливо для тепловозов / Г. А. Фофанов // Железные дороги мира. — 2006. — № 7. — С. 43–48.
4. Магистральные грузовые локомотивы, работающие на природном газе. Технические требования. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12 марта 2020 г. № 545/р. — 2020. — 174 с.
5. Прохор Д. И. Модернизация тепловозов 2ТЭ116У и ТЭМ18ДМ для работы по газодизельному циклу / Д. И. Прохор, Д. В. Котяев, А. Г. Воронков // Техника железных дорог. — 2022. — № 1(57). — С. 44–49.
6. Бабков Ю. В. Газотурбинные двигатели как силовые установки тягового подвижного состава, работающего на сжиженном природном газе / Ю. В. Бабков, Д. И. Прохор, Д. В. Котяев и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2021. — № 3. — С. 55–65.
7. Актуализация технико-экономического обоснования на магистральный грузовой газотурбовоз ГТ1h-002 по результатам сравнительной эксплуатации с тепловозов 3ТЭ116У. Утверждено ОАО «РЖД» 27 марта 2018 г. №274/р. — 2018. — 214 с.
8. Разработка матрицы изменения технического состояния инновационного оборудования газомоторных локомотивов на основе исследования отказов за период эксплуатации на Свердловской ж. д. — Утверждено ОАО «РЖД» от 30 декабря 2022 г. № 2540. — 2021. — 168 с.

9. Разработка модификации магистрального тепловоза 2ТЭ116У по газодизельному циклу. Технический проект 26.Т.832.00.00.000. — Коломна. 2023. — 148 с.

10. ГОСТ Р 56021—2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2014. — 13 с.

11. ГОСТ Р 56878—2016. Локомотивы, работающие на сжиженном природном газе. Требования к организации эксплуатации. — М.: Стандартинформ, 2019. — 11 с.

12. ГОСТ Р 56287—2014. Газотурбовозы магистральные грузовые, работающие на сжиженном природном газе. Общие технические требования. — М.: Стандартинформ, 2015. — 24 с.

13. Григорович Д. Н. Микропроцессорная система управления газоподготовкой для опытного газотепловоза / Д. Н. Григорович, А. Г. Иоффе // Вестник ВНИИЖТ. — 2012. — № 4. — С. 34–37.

14. ГОСТ Р 59573—2021. Пункты экипировки локомотивов, работающих на сжиженном природном газе. Требования к техническому оснащению и выбору мест расположения. — М.: Стандартинформ, 2021. — 7 с.

Дата поступления: 25.10.2023

Решение о публикации: 17.11.2023

Контактная информация:

ПРОХОР Денис Иванович — канд. техн. наук, зав. отделом газового оборудования и газовых локомотивов; prohor-di@vnikti.com

ЛЫСЕНКО Валерий Владимирович — инженер I кат. отдела газового оборудования и газовых локомотивов; lysenko-vv@vnikti.com

НИКИТИН Виктор Валерьевич — д-р техн. наук, доц., профессор кафедры «Электротехника и теплоэнергетика»; pgups.emks@mail.ru

An Approach to Converting Mainline Freight Diesel Locomotives to Operation on a Gas-Diesel Cycle

D. I. Prokhor¹, V. V. Lysenko¹, V. V. Nikitin²

¹ JSC “Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock” (VNIKTI, JSC), 410, Ocyabrskoy Revolyutsii Str., Kolomna, Moscow region, 140402, Russian Federation

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

For citation: Prokhor D. I., Lysenko V. V., Nikitin V. V. An Approach to Converting Mainline Freight Diesel Locomotives for Operation on a Gas-Diesel Cycle. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 36-51. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-36-51

Abstract

Purpose: To develop an approach to upgrading parts of a self-contained mainline freight locomotives fleet in order to reduce their life cycle cost and harmful emissions levels. **Methods:** The authors reviewed consumer

and performance characteristics, investigated the potential for changes in the layout, drawings and design of mainline freight diesel locomotives projected for conversion to operate on a gas-diesel cycle. Based on the experience with operating gas-fueled locomotives, an introduction of cryogenic gas equipment has been proposed into the design of diesel locomotives due for conversion as well as a harmonization of the equipment types and its optimization. The upgrade criteria and conditions have been defined, and some solutions to minimize the number of changes to the conventional diesel locomotive design have been put forward. **Results:** The objectives of increased cost efficiency and improved environmental performance have been specified, the design solution proposed for the self-contained diesel locomotives fleet conversion has been justified, a study of gas-diesel locomotives' energy efficiency and cost effectiveness has been performed, the criteria for selecting specific diesel locomotives for the upgrade have been proposed as well as the engineering changes to enable the conversion of diesel locomotives to operation on a gas-diesel cycle. **Practical significance:** The suggested approach to upgrading self-contained locomotives will reduce their life cycle cost, hydrocarbon emissions and minimize the duration and cost of conventional diesel locomotives conversion to operation on a gas-diesel cycle.

Keywords: Self-contained locomotive, thermal engine, diesel fuel, liquefied natural gas.

References

1. Zarucheytsky A. V. Ispol'zovanie prirodnogo gaza na avtonomnykh lokomotivakh [Use of liquefied gas on self-contained locomotives]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2008, Iss. 5, pp. 56–58. (In Russian)
2. Babkov Yu. V., Prohov D. I. *Gazomotornoe toplivo dlya podvizhnogo sostava* [Gas engine fuel for rolling stock]. *Neftegaz.RU*, 2021, Iss. 9, pp. 33–37. (In Russian)
3. Fofanov G. A. Prirodnyy gaz — motornoe toplivo dlya teplovozov [Natural gas — an engine fuel for diesel locomotives]. *Zheleznye dorogi mira* [World Railways]. 2006, Iss. 7, pp. 43–48. (In Russian)
4. *Magistral'nye gruzovye lokomotivy, rabotayushchie na prirodnom gaze. Tekhnicheskie trebovaniya. Utverzhdeny rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 12 marta 2020 g. № 545/r* [Mainline freight locomotives running on natural gas. Technical requirements. Approved by the order of JSC Russian Railways dated March 12, 2020 № 545/r]. 2020, 174 p. (In Russian)
5. Prokhor D. I., Kotyaev D. V., Voronkov A. G. Modernizatsiya teplovozov 2TE116U i TEM18DM dlya raboty po gazodizel'nomu ciklu. [Upgrading 2TЭ116У and ТЭМ18ДМ locomotives for a gas-diesel cycle of operation]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Railway Equipment]. 2022, Iss. 1(57), pp. 44–49. (In Russian)
6. Babkov Yu. V., Prokhor D. I., Kotyaev D. V. et al. Gazoturbinnye dvigateli kak silovye ustanovki tyagovogo podvizhnogo sostava, rabotayushchego na szhizhennom prirodnom gaze [Gas turbine engines as liquefied natural gas-fueled traction rolling stock propulsion units]. *Bulletin of Scientific Research Results* [Bulletin of scientific research results]. 2021, Iss. 3, pp. 55–65. (In Russian)
7. *Aktualizatsiya tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya na magistr'al'nyy gruzovoy gazoturbovoz GT1h-002 po rezul'tatam sravnitel'noy ekspluatatsii s teplovozov 3TE116U. Utverzhdeno OAO "RZhD" 27 marta 2018 g. №274/r* [Updating the feasibility study for the main-line freight gas turbine locomotive GT1h-002 based on the results of comparative operation with 3TE116U diesel locomotives. Approved by JSC Russian Railways on March 27, 2018 № 274/r]. 2018, 214 p. (In Russian)
8. *Razrabotka matritsy izmeneniya tekhnicheskogo sostoyaniya innovatsionnogo oborudovaniya gazomotornykh lokomotivov na osnove issledovaniya otkazov za period ekspluatatsii na Sverdlovskoy*

zh. d. *Utverzhdeno OAO "RZhD" ot 30 dekabrya 2022 g. № 2540* [Development of a matrix for changes in the technical condition of innovative equipment of gas-engine locomotives based on a study of failures during the period of operation on the Sverdlovsk railway. d. Approved by JSC Russian Railways on December 30, 2022 № 2540]. 2021, 168 p. (In Russian)

9. *Razrabotka modifikacii magistral'nogo teplovoza 2TE116U po gazodizel'nomu ciklu. Tekhnicheskij proekt 26.T.832.00.00.000* [Development of a version of the mainline diesel locomotive 2TE116U using the gas-diesel cycle. Technical project 26.T.832.00.00.000]. Kolomna, 2023, 148 p. (In Russian)

10. *GOST R 56021—2014. Gaz goryuchij prirodnyj szhizhennyj. Toplivo dlya dvigatelej vnutrennego sgoraniya i energeticheskikh ustanovok. Tekhnicheskie usloviya* [GOST R 56021-2014. Liquefied natural fuel gas. Fuel for internal combustion engine and power generating unit. Specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2014, 13 p. (In Russian)

11. *GOST R 56878—2016. Lokomotivy, rabotayushchie na szhizhennom prirodnom gaze. Trebovaniya k organizacii ekspluatatsii* [GOST R 56878—2016. Liquefied natural gas fueled locomotives. Operation management requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2019, 11 p. (In Russian)

12. *GOST R 56287—2014. Gazoturbovozy magistral'nye gruzovye, rabotayushchie na szhizhennom prirodnom gaze. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [GOST R 56287—2014. Mainline freight liquefied natural gas turbine locomotives. General technical requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2015, 24 p. (In Russian)

13. Grigorovich D. N., Ioffe A. G. Mikroprocessornaya sistema upravleniya gazopodgotovkoj dlya opytnogo gazoteplovoza. [Microprocessor-based gas-conditioning control system for a gas-diesel locomotive prototype]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZHT]. 2012, Iss. 4, pp. 34–37. (In Russian)

14. *GOST R 59573—2021. Punkty ekipirovki lokomotivov, rabotayushchih na szhizhennom prirodnom gaze. Trebovaniya k tekhnicheskomu osnashcheniyu i vyboru mest raspolozheniya* [GOST R 59573—2021. Servicing depots for liquefied natural gas fueled locomotives. Requirements to technical facilities and locations]. Moscow: Standartinform Publ., 2021, 7 p. (In Russian)

Received: October 25, 2023

Accepted: November 17, 2023

Author's information:

Denis I. PROKHOR — PhD in Engineering, Head of Gas Equipment and Gas Engine Locomotives Unit; prohor-di@vnikti.com

Valeriy V. LYSENKO — Category I Engineer, Gas Equipment and Gas Engine Locomotives Unit; lysenko-vv@vnikti.com

Viktor V. NIKITIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department "Electrical and Thermal Power Engineering"; pgups.emks@mail.ru

УДК 629.423.25

Моделирование технического обслуживания и ремонта высокоскоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики

А. Н. Галахов, И. И. Лакин, Д. Д. Скворцов

АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта», Российская Федерация, 121205, Москва, Территория Сколково Инновационного Центра, Большой б-р, 5

Для цитирования: Галахов А. Н., Лакин И. И., Скворцов Д. Д. Моделирование технического обслуживания и ремонта высокоскоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 52-67. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-52-67

Аннотация

Цель: Высокоскоростные магистрали (ВСМ) — самое перспективное направление развития железнодорожного транспорта в XXI веке, повышающее мобильность населения на расстоянии до 1000 км, способствующее развитию городских конгломераций. Для функционирования ВСМ необходим надежный подвижной состав. В статье описывается выполненное математическое моделирование эксплуатации и системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) высокоскоростных электропоездов применительно к полигону Санкт-Петербург — Москва. Целью моделирования является обоснование требований к ТОиР, в том числе к назначению бортовых автоматизированных систем технического диагностирования. **Методы:** В основу положены принципы организации пассажирского движения, технические требования к отечественному высокоскоростному подвижному составу, методы теории массового обслуживания, а также вероятностные математические методы моделирования в среде MS Excel на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications. Разработано соответствующее программное обеспечение. **Результаты:** Разработаны математическая модель и программное обеспечение, выполнено многофакторное моделирование, определена степень влияния отказов на потребный парк высокоскоростных электропоездов. Предложены методы оптимизации технического обслуживания для сокращения парка. Определены требования к самой модели. Математическим моделированием выполнен факторный анализ эксплуатации и технического обслуживания. **Практическая значимость:** Гарантией безопасного и надежного высокоскоростного движения является создание современной системы технического обслуживания и ремонта подвижного состава. Исследование взаимодействия эксплуатации и ремонта важно при подготовке к запуску отечественного высокоскоростного движения.

Ключевые слова: Железные дороги, высокоскоростные магистрали, подвижной состав, техническое обслуживание и ремонт, математическое моделирование.

Введение

Высокоскоростные магистрали (ВСМ) — одно из основных направлений развития железнодорожного транспорта, обеспечивающее мобильность населения на расстоянии до 1000 км, способствующее развитию городских конгломераций. Лидером в развитии являются Китай, Япония, Франция, Германия, другие европейские страны. Во всех этих государствах отдельно решалась задача технического

обслуживания и ремонта (ТОиР) высокоскоростного тягового состава. Эта задача стоит и в РФ при создании отечественных ВСМ.

Надежность подвижного состава обеспечивается при соблюдении стратегии обслуживания и ремонта (ТОиР) [1] — «совокупность взаимосвязанных средств, документации ТОиР и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления эксплуатационных характеристик объектов» [2]. Основное место проведения ТОиР — сервисное депо или пункт технического обслуживания (ПТО). В мировой практике современный ТОиР строится с использованием бортовых автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) на базе микропроцессорных систем управления [3], которые выявляют пред-отказные состояния и сокращают время простоя на ТОиР. Информация АСТД по радиоканалу (в отдельных случаях с помощью flash-накопителей) передается на сервер АСУ ТОиР сервисного депо. Одновременно информация выводится на экран человеко-машинного интерфейса локомотивной бригады по запросу или автоматически при необходимости принять корректирующие воздействия на систему управления поезда.

При постановке поезда на ТОиР выполняется набор планово-предупредительного ТОиР с учетом данных АСТД. Таким образом, при организации современного ТОиР высокоскоростных поездов возникают две дополнительные задачи, требующие своего решения:

- получить от АСТД достоверную информацию о техническом состоянии оборудования электропоезда: электрического, пневматического, электронного, электрических машин и экипажной части;

- обеспечить процесс ТОиР необходимыми запасными частями и материалами для оперативного крупно-агрегатного ТОиР.

Задачи организации ТОиР с использованием данных АСТД подробно рассмотрены применительно к локомотивам в двух докторских диссертациях [3, 4] и ряде кандидатских [5–7]. Также рассмотрены особенности организации ТОиР при наличии данных АСТД [3, 8]. ТОиР высокоскоростных электропоездов отличается от ТОиР локомотивов. Для анализа процессов ТОиР авторами выполнено моделирование эксплуатации и выполнения ТОиР, для чего смоделированы:

- эксплуатация высокоскоростных электропоездов на замкнутом полигоне с расчетом пробега как фактора постановки на планово-предупредительный ремонт для полигона Санкт-Петербург — Москва;

- детерминированные процессы системы ТОиР;

- вероятностные процессы возникновения отказов в эксплуатации;

- вероятностная задержка поезда в поездке из-за отказа;

- вероятностное время непланового ремонта после отказа на линии;

- вероятностное время задержки планового ТОиР;

- уменьшение вероятности отказа за счет использования данных бортовых систем технического диагностирования.

Возможности пунктов технического обслуживания (ПТО) и депо (ТЧ) по осуществлению ТОиР ограничены числом ремонтных позиций $n \in N$, наличием i -того ЗИП $z_i \in Z$, трудовых и других j -тых ресурсов $r_j \in R_j$. Кроме того, время проведения ТОиР $t \in T$ ограничено выдачей составов «под нитки графика». Таким образом, организация ТОиР является типовой задачей теории массового обслуживания (теории очередей) [9] по статистике эксплуатации и ТОиР, которое характеризуется детерминированным и случайным поступлением заявок на обслуживание (поток заявок α с интенсивностью λ), ремонтными позициями $n \in N$, наличием очереди на обслуживание $t_{\text{ож}} \in T_{\text{ож}}$, а также временем исполнения заявки $t \in T$.

Разработка алгоритма модели

На рис. 1 приведен пример: 12 заявок ТОиР для ремонтных позиций $n \in N = 5$. Каждое обслуживание имеет продолжительность обслуживания $t_{\alpha} \in T$. Первые 7 заявок приняты в работу без ожиданий при различной продолжительности ТОиР, но не превышено допустимое время T_{MAX} . Для заявок $n = 8$ и $n = 12$ нет свободных ремонтных позиций, и возникло ожидание ТОиР $t_{\text{ож}8}$ и $t_{\text{ож}12}$. В результате появился риск превышения допустимого времени ТОиР T_{MAX} : $T_{\text{MAX}} < t_8 + t_{\text{ож}8}$, $T_{\text{MAX}} < t_{12} + t_{\text{ож}12}$. При ограниченном числе ремонтных позиций есть риск задержки выдачи поезда после ТОиР как по причине ожидания свободной ремонтной позиции ($t + t_{\text{ож}} > T_{\text{MAX}}$), так и при длительном обслуживании ($t > T_{\text{MAX}}$). Число ремонтных позиций N рассчитывается по ожидаемому потоку заявок на ТОиР и ожидаемой продолжительности обслуживания T :

$$\sum_{n=1}^N tn \leq N \cdot T_{\text{MAX}}. \quad (1)$$

Для анализа процессов ТОиР авторами разработана модель ТОиР в среде Excel на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications [10]. Для моделирования взяты планируемые параметры отечественных высокоскоростных поездов [11]. Проекты разработаны в Инжиниринговом центре железнодорожного транспорта [12].

Виды отказов [11] разделены на 5 категорий с допустимыми интенсивностями отказов λ . Категория A : невозможность дальнейшего движения поезда, $\lambda_A \leq 0,5$ отк/млн км. Категория B : опоздание свыше 20 минут, проведение непланового ремонта (НР), $\lambda_B \leq 3$ отк/млн км. Категория C : задержка до 20 минут и без НР с возможным увеличением времени планового ТОиР, $\lambda_C \leq 25$ отк/млн км. Категория K : ремонт на плановых ТОиР после отказа в салоне устройств комфорта, $\lambda_K \leq 8$ отк/млн км. Категория D : наличие сверхцикловых работ, $\lambda_D \leq 200$ отк/млн км. При моделировании обобщенные интенсивности, приводящие к неплановым ремонтам $\lambda_{\text{НР}}$ и увеличению продолжительности ТОиР $\lambda_{\text{ЦИ}}$:



Рис. 1. Пример простейшей очереди обслуживания на ТОиР

ТАБЛИЦА 1. Нормируемые простои на ТОиР при моделировании

Вид ТОиР	Пробег, км	Период	Период, ч	Простой, ч
L	8000 ± 10 %	1 неделя	168	1
N	20 000 ± 20 %	0,5 месяца	360	4
IS510	120 000 ± 20 %	3 месяца	2160	11
IS520	240 000 ± 20 %	6 месяцев	4380	23
IS530	480 000 ± 20 %	1 год	8760	35

$$\lambda_{\text{НР}} = \lambda_A + \lambda_B \leq 3,5 \text{ отк/млн км};$$

$$\lambda_{\text{СЦ}} = \lambda_C + \lambda_D + \lambda_K = 233 \text{ отк/млн км.}$$

Плановые ТОиР обеспечивают коэффициент технической готовности КГЭ $\geq 0,96$, установлены нормы простоя на ТОиР (табл. 1). ТОиР планируется выполнять в Депо для высокоскоростных поездов в Обухово или в уже существующем депо «Металлострой». Число ремонтных позиций следует определить с использованием теории очередей. Моделирование выполнено с помощью специально разработанной программы в среде MS Excel на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications (VBA) [10] (рис. 2), на которую получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [13].

Разработанная модель (рис. 2) после подготовки рабочих массивов и считывания исходных данных (блоки 2 и 3) за заданное число дней D (блок 4) на каждый час суток T_m (блок 5) все составы U (блок 6) проверяются на необходимость ТОиР по пробегу (блоки 6–11). При отсутствии свободных ремонтных позиций состав ставится в очередь (блок 9). Далее определяется наличие отправления поездов

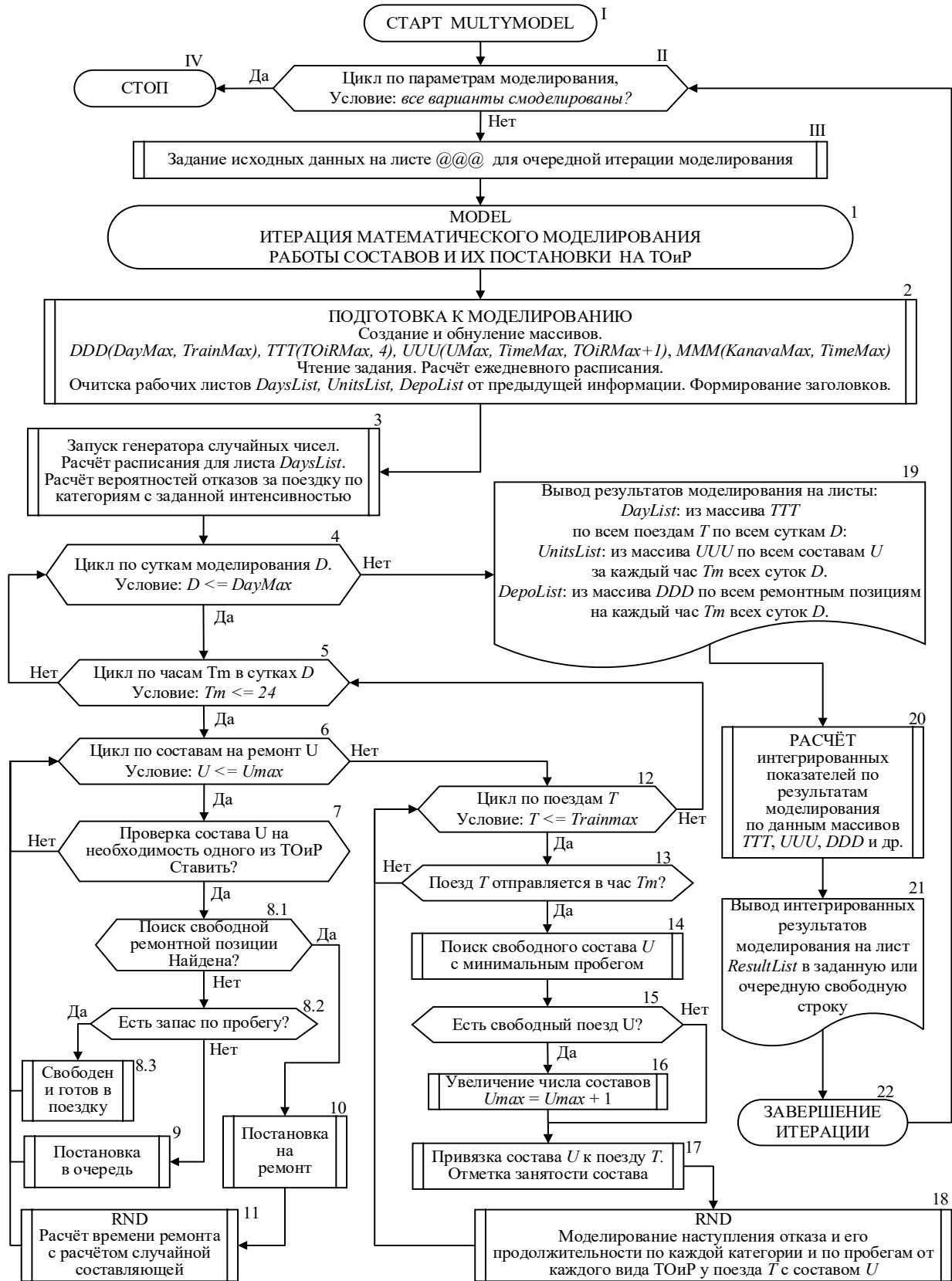


Рис. 2. Блок-схема алгоритма модели

T на текущий час T_m (блоки 12–18) и наличие свободных составов для подвязки (блоки 14–17). В случае необходимости число потребных составов U_{\max} увеличивается: $U_{\max} = U_{\max} + 1$ (блок 16). По окончании моделирования за заданные D_{\max} дней (блоки 4–18) информация из рабочих массивов выводится в рабочие листы Excel (блоки 19–21). В программе предусмотрена возможность многоитерационного моделирования (блоки I–IV).

Фиксировалось максимальное число реально использованных ремонтных позиций N_{\max} в сравнении с заданным N : если $N > N_{\max}$, значит, в задании задано избыточное число ремонтных позиций N . Аналогично определялась максимальная очередь Q . Если $Q = 0$ и $N = N_{\max}$, значит, условия моделирования заданы оптимально. Процент нахождения в очереди $Q_{\%}$ от общего времени нахождения на ТОиР определялось по формуле:

$$Q_{\%} = 100 \sum_{t=1}^{TimeMax} (MMM(0, t) / N), \quad (2)$$

где $MMM(0, i)$ — число составов в очереди на момент времени t .

По разработанной программе выполнен анализ свойств детерминированной модели применительно к полигону высокоскоростного движения Санкт-Петербург — Москва. Оборот поезда принят как происходящий за 5 часов с пробегом 1400 км. Число пар поездов: от 1 до 34 и число ремонтных позиций: от 3 до 7.

Полученные зависимости от числа пар поездов оказались неожиданно нелинейными (рис. 3) из-за возникновения очереди на «тяжелые» виды ТОиР: IS510, IS520, IS530. Одновременное начало эксплуатации всех составов приводит к их практически одновременной постановке на ТОиР, что на практике можно избежать. Программу моделирования доработали с учетом того, что: постановка на эти виды ремонта допускает разброс 20 %: для IS510 составит 48 тыс. км, для IS520 — 96 тыс. км, для IS530 — 192 тыс. км. Значит, составы при постановке на тяжелые ремонты можно искусственно разнести во времени. В программе введен запрет на одновременную постановку более двух составов на эти виды ремонта.

Дополнительно введена защита для ремонта объема L : если при пробеге 7999 км поезд будет отправлен в поездку, то его пробег составит $7999 + 1400 = 9399$ км, что превысит допуск $8000 + 3 \cdot 267 = 8800$ км. Поэтому проверка постановки на ремонт объема L осуществляется по пробегу $8000 - 3 \cdot 267 = 7200$ км. Результаты моделирования приведены на рис. 4. До 18 пар поездов процесс линейный. Далее наблюдаются флуктуации из-за очередей на ремонт. Оптимальными оказались параметры для 19, 22 и 25 пар поездов, при которых процент использования составов был выше 40 % (рис. 5). Дополнительное снижение эффективности использования составов связано с перерывом движения в ночное время с 22:00 до 6:00.



Рис. 3. Зависимость числа требуемых составов от числа пар поездов при $N = 5$ максимальном числе ремонтных позиций



Рис. 4. Результаты моделирования для семи ремонтных позиций

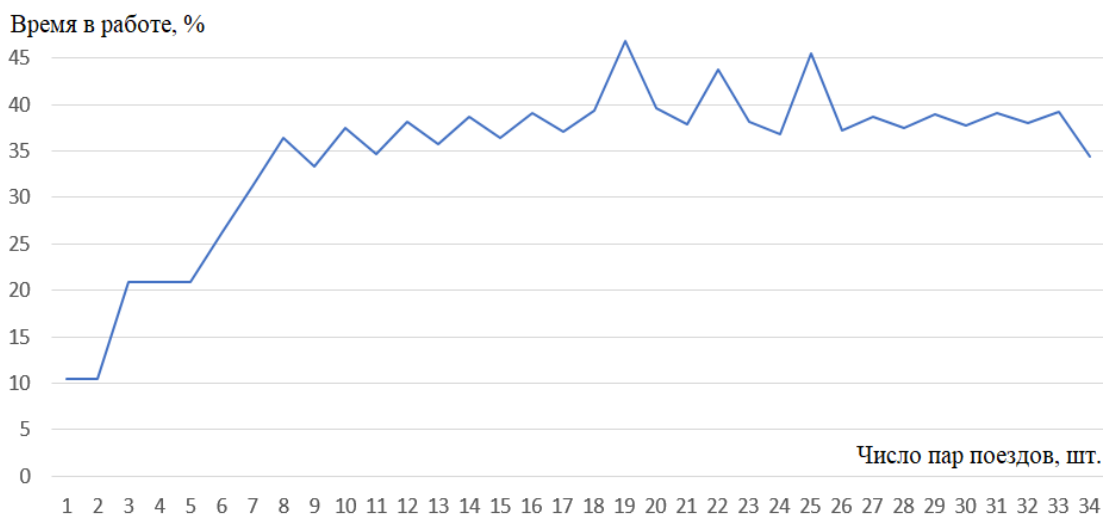


Рис. 5. Эффективность использования подвижного состава

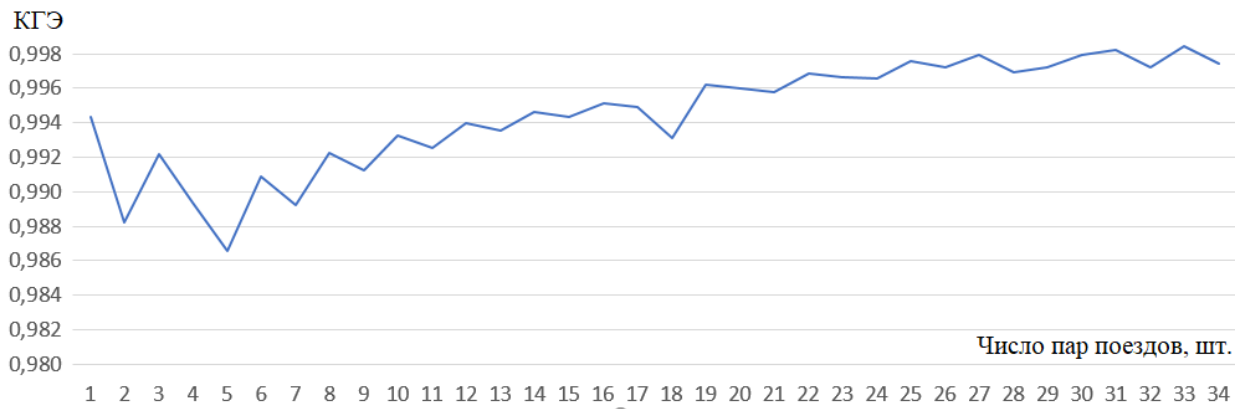


Рис. 6. Коэффициент готовности к эксплуатации

При отсутствии отказов и задержек на ТОиР коэффициент готовности к эксплуатации при числе пар поездов свыше 8 $КГЭ > 0,99$ (рис. 6) при установленном $КГЭ_{\text{норм}} \geq 0,96$ — есть резерв при появлении отказов. В результате детерминированного моделирования выбрано 22 пары поездов при 5 ремонтных позициях.

В VBA предусмотрена возможность работы со случайными числами, которая инициализируется командой *Randomize* [10]. Случайное число x вызывается командой *Rnd*: $x = Rnd$: в VBA есть достаточный набор функций для моделирования процессов ТОиР с вероятностным наступлением отказа и временем задержки поезда, продолжительностью восстановления после отказа на плановых и неплановых ТОиР. В блок-схеме по рис. 2 вероятностному моделированию соответствуют блоки 11 и 18.

Вероятность наступления отказа P определяется как интеграл по функции плотности экспоненциального закона распределения случайной величины λ от пробега L . После выбора состава под очередной поезд запускается генератор случайных чисел и рассчитывается теоретическая вероятность наступления отказа P_T : $0 \leq P_T \leq 1$. Вычисляется случайное число $R = Rnd$: $0 \leq R \leq 1$. Если $R \leq P_T$, то отказ считается наступившим. Для тестирования предложенной методики последовательно смоделировано 1 тыс. отказов для $\lambda = 3$ и пробега $L = 20$ тыс. км. Расчет повторен 10 тыс. раз. В результате средняя интенсивность отказов составила $\lambda_{\text{CP}} = 0,0582357$ отк/млн км при теоретическом значении $\lambda_T = 0,0582267$ отк/млн км. Разброс составил 0,015 % — предложенная методика допустима.

В модели предусмотрены несколько категорий отказов со своими интенсивностями отказов. На момент времени t вероятность отказа Q считается как вероятность отказов $Q_L, Q_N, Q_{510}, Q_{520}, Q_{530}$ по формуле:

$$Q = Q_L + \sum_{i=2}^6 (1 - Q_{\Sigma}) Q_i, \quad (3)$$

где Q_{Σ} — вероятность отказа по предыдущим пробегам.

Результаты вероятностного моделирования

Для 22 пар поездов в сутки, для полигона Санкт-Петербург — Москва («туда-обратно» в 1400 км за 5 часов) для 6 ремонтных позиций депо с показателями надежности и периодичности ТОиР согласно техническому заданию на ВСМ выполнено многоитерационное моделирование (см. блоки I–IV на рис. 2) для накопления статистики с расчетом математического ожидания M , среднеквадратичного отклонения σ и коэффициента вариации K_V параметров модели. Моделирование выполнено за 1095 дней (три года).

При моделировании для 50 итераций зафиксировано от 6 до 23 отказов категории A ($M = 15,54$, $\sigma = 3,97$, $K_V = 0,255$). За три года общий пробег составил 33,7 млн км: при заданной интенсивности отказов $\lambda_A = 0,5$ отк/млн км среднее число отказов должно было быть 16,86 отк/млн км. Таким образом, результаты моделирования сходятся с теоретическими. Отказы категории B ($M = 96,8$, $\sigma = 8,7$, $K_V = 0,09$) также сходятся с теоретическим 101,8 при $\lambda_B = 3$ отк/млн км. Аналогично и по другим категориям отказов.

Увеличение потребного парка составов составило от 13 до 15 ($M = 13,48$, $\sigma = 0,646$, $K_V = 0,048$). Несущественное увеличение парка можно объяснить высокой надежностью электропоездов ВСМ. Процент нахождения составов в работе упал с 35,3 до 34,1 % ($\sigma = 1,64$, $K_V = 0,048$). КГЭ остался в допуске, но упал с 0,971 до 0,966 ($\sigma = 0,002$, $K_V = 0,002$) за счет увеличения простоя на ремонте 2,93 до 3,36 % ($\sigma = 0,19$, $K_V = 0,056$).

Очередь на ТОиР хоть и достигала 4 составов ($M = 2,68$, $\sigma = 1,36$, $K_V = 0,508$), но составила очень небольшой процент в общем бюджете времени ($M = 0,038$ %, $\sigma = 0,028$). Высокий коэффициент вариации $K_V = 0,727$ показывает случайность возникновения очереди. Очередь можно уменьшить увеличением числа канав с 6 до 7, но это может быть нецелесообразно из-за и так низкого процента занятости канав ($M = 7,53$ %, $\sigma = 0,084$, $K_V = 0,011$).

Выполнен анализ процесса образования очереди. Например, из-за совпадения двух ремонтов N возникла потребность в 10 составе (180-й час), а на 181 часе — в 11 составе. При этом были заняты только 4 ремонтных позиции. А вот на 182 часе, из-за непланового ремонта, 7 составов оказалось на ремонте и возникла потребность в еще одном составе. А к 188 часу уже два состава оказались простаивающими в ожидании работы. В 56-й день моделирования (1336-й час) на ремонт возникла очередь на ТОиР (1 состав в очереди, 6 на ремонте). Таким образом, совпадение плановых ремонтов и возникновение неплановых ремонтов приводит к росту потребного парка составов. Также на увеличение парка влияет совпадение «тяжелых» ТОиР типа IS.

На рис. 7 приведены результаты итерационного моделирования для различных интенсивностей отказов категории A $0 \leq \lambda_A \leq 5$ при отсутствии других категорий. Число

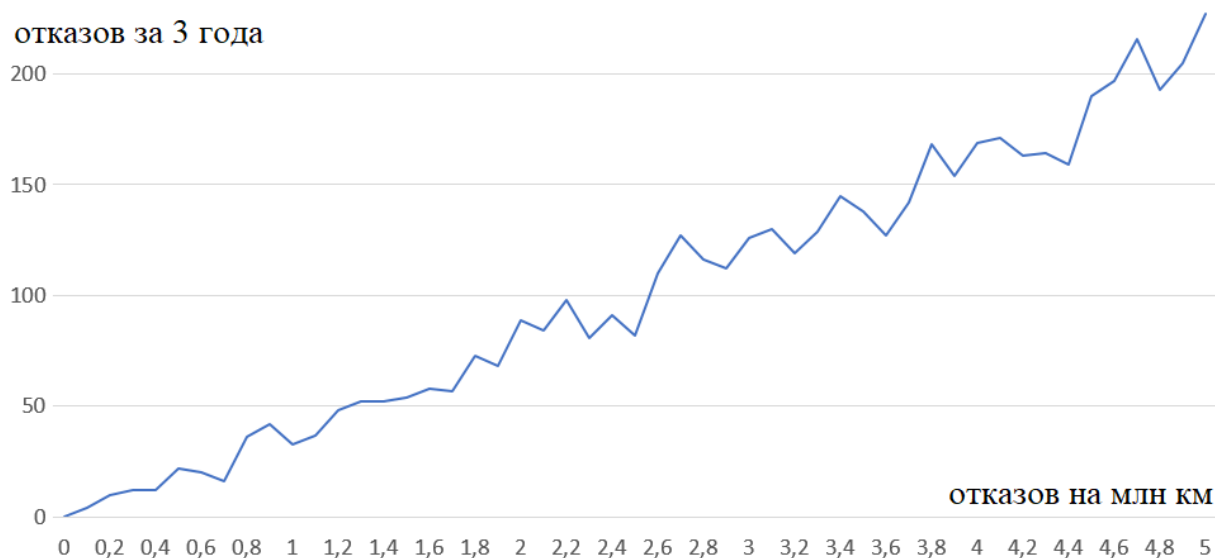


Рис. 7. Число отказов за 1095 дней при изменении их интенсивности

отказов увеличивалось нелинейно из-за использования вероятностного моделирования. Существенного влияния на параметры ТОиР рост отказов категории *A* не оказал.

Существенно влияние на результаты моделирования оказало увеличение времени оборота составов с 3 до 10 часов. КГЭ увеличивался с 0,947 до 0,975, но число потребных составов выросло с 8 до 47. Число отказов существенно увеличивалось. Например, категории *A* — с 9 до 183. Это объясняется расчетом вероятности отказа как интеграла по времени в пути.

Получен интересный результат зависимости параметров модели от увеличения полигона с 700 км до 12 тыс. км (например, за счет удлинения маршрута до Казани, Минск и дальше). Число отказов, как и в предыдущем примере, растет с 9 до 183. Но существенно вырастает процент нахождения составов в работе — с 23 до 82 %. Растет процент занятости канав с 2,7 до 35,5 %. Простой сокращается с 75 до 14 %. Таким образом, увеличение полигона эксплуатации составов положительно влияет на эффективность их использования. В качестве недостатка следует отметить падение КГЭ с 0,98 до 0,955.

Рассмотрено влияние числа пар поездов для полигона 1400 км от 7 до 30. При естественном росте потребного парка составов от 6 до 19 растет КГЭ от 0,974 до 0,968. Эффективнее используются ремонтные позиции от 2,6 до 10,0 %. Очередь начинает существенно расти после 25 пар поездов, что свидетельствует о необходимости пересмотра параметров депо при таком количестве поездов.

Существенное влияние оказывает увеличение межремонтного пробега (рис. 8) составов с 3000 до 31 500 км по ТОиР объема *L* с пропорциональным увеличением пробега до следующих ТОиР при неизменном полигоне (1400 км, 5 часов на оборот). Время в ремонте сокращается с 12,5 до 1,5 % с ростом КГЭ с 0,875 до 0,985. Однако для рассматриваемого полигона возрастает время простоя в ожидании ремонта с 52 до 66 %.

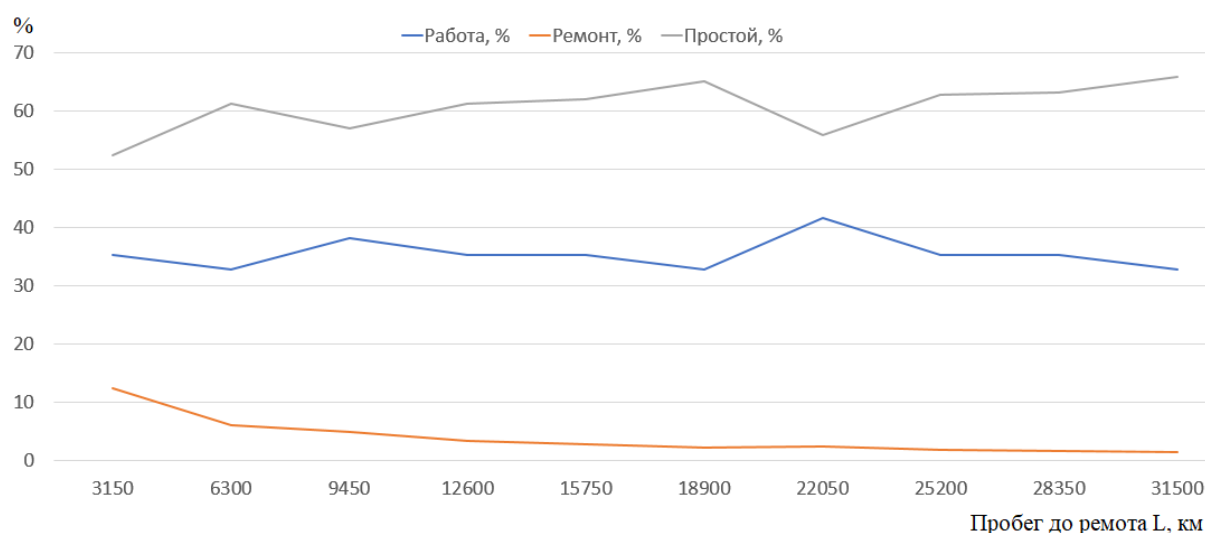


Рис. 8. Влияние увеличения межремонтного пробега

ТАБЛИЦА 2. Ожидаемые параметры ТОиР отечественных электропоездов

Цикл	Название цикла	Межремонтный пробег, км	Межремонтный интервал	Время простоя
IS100 (L)	Осмотр	12 500 ± 10 %	7 дней	1 час
IS200 (N)	Инспекция	25 000 ± 20 %	14 дней	4 часа
IS510	Обслуживание	75 000 ± 20 %	1,5 месяцев	6 часов
IS520	Обслуживание	150 000 ± 20 %	3 месяцев	9 часов
IS530	Обслуживание	300 000 ± 20 %	5 месяцев	19 часов
IS540	Обслуживание	600 000 ± 20 %	11 месяцев	28 часов
IS600	Ревизия	1 200 000 ± 20 %	21 месяц	8 дней
IS700	Ревизия	2 400 000 ± 20 %	42 месяц	12 дней

Существенное влияние межремонтного пробега на эффективность эксплуатации и ТОиР может показаться теоретическим: межремонтные пробеги задаются на этапе проектирования. Увеличение пробега возможно при использовании предиктивных методов ТОиР при использовании АСТД.

Также выполнено моделирование для параметров, предварительно определенных для отечественных электропоездов для проектируемой высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург (ВСЖМ-1), при условии среднегодового пробега 700 тыс. км (табл. 1). Число канав 8, две из которых под капитальные ремонты IS600 и IS700. Время оборота принято в 7 часов, которое вычисляется следующим образом: 40 мин — подготовка поезда, 2,5 ч — движение, 40 мин — подготовка, 2,5 ч — движение обратно, обслуживание санитарных модулей и наполнение баков ~1,5 ч (делается 1 раз в два оборота). Интенсивность отказов категории А $\lambda_A = 0,5$ отк/млн км. Чтобы пробег достиг капитальных

ТАБЛИЦА 3. Ожидаемые параметры ТОиР отечественных электропоездов

Параметр	М	СКО	K_v	min	max
Потребное число составов	23,08	0,52	0,023	22	25
В работе, %	40,5	0,91	0,022	37,3	42,4
Ожидание работы, %	56,0	1,01	0,018	53,7	59,3
Ремонт, %	3,49	0,12	0,033	3,30	3,84
КГЭ	0,965	0,001	0,001	0,961	0,967
Занятость канав, %	9,43	0,165	0,017	9,27	9,92
Очередь, составов	0,51	0,66	1,29	0	2
Очередь, %	0,009	0,023	2,57	0	0,121
Число отказов категории А	40,8	5,63	0,138	30	54
Интенсивность при моделировании, отк/млн км	0,492	0,068	0,138	0,362	0,651
Погрешность модели, %	1,6 %				

ремонт, число дней моделирования увеличено до 1850 (5 лет). Число пар поездов — 32. Результаты расчета для 100 итераций приведены в табл. 3.

Таким образом, предполагаемая технология ТОиР будет соответствовать заданному КГЭ $\geq 0,96$ при предполагаемых параметрах. Результаты многофакторного моделирования позволяют утверждать о избыточности заложенных параметров (запасе прочности).

Заключение

Для анализа процессов ТОиР и влияния надежности высокоскоростных электропоездов на качество их эксплуатации разработана математическая модель процесса их эксплуатации и ТОиР, которая реализована на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel. Получено авторское свидетельство на программу для ЭВМ [13].

Разработанная модель за заданное число дней на каждый час проверяет свободные составы на потребность постановки на один из ТОиР. При необходимости находит свободную ремонтную позицию, при ее отсутствии — ставит состав в очередь на ТОиР. Далее проверяется наличие на текущий час отправления поездов, к которым подвязываются свободные составы с минимальным пробегом, а при отсутствии число составов увеличивается: в результате определяется потребное число составов. Для составов в поездке случайным образом с использованием экспоненциального закона моделируется наступление отказа с заданной интенсивностью по всем категориям отказов. С использованием логнормального закона моделируется время задержки состава в пути и время простоя на ТОиР. Результаты моделирования выводятся в листы таблицы Excel. Предусмотрено

многоитерационное моделирование для получения статистически достоверных данных или для различных исходных данных.

Выполнено детерминированное моделирование с отладкой программы и определением наглядных параметров для вероятностного моделирования. Выбран полигон оборота составов 1400 км за 5 и 7 часов, 22 и 33 пары поездов в сутки с 6 утра до 22 часов вечера, 6 и 8 ремонтных позиций с параметрами надежности, периодичности и продолжительности ТОиР согласно техническому заданию на проектирование отечественного высокоскоростного электропоезда. В статье приведены статистические показатели для 50 итераций вероятностного моделирования за 1095 (3 года) и 1850 (5 лет) дней.

Выполнено итерационное вероятностное моделирование с изменением основных исходных данных: интенсивность отказов, размер полигона, время оборота на одном и том же полигоне, межремонтный пробег и др. Результаты приведены в статье. Также выполнено многоитерационное моделирование для предполагаемых параметров ТОиР, доказавшее их допустимость.

Повысить эффективность эксплуатации высокоскоростных составов возможно за счет включения в систему ТОиР комплексных бортовых автоматизированных систем технического диагностирования как источника информации о реальном техническом состоянии составов, наличии предотказных состояний, локализацией места отказа и прогнозированием остаточного ресурса, уменьшением интенсивности отказов до 30 %, сокращением простоя на ТОиР.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 27.102—2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2021. — 40 с.
2. ГОСТ 18322—2016. Система ТОиР техники. Термины и определения. — Стандартинформ, 2021. — 16 с.
3. Семенов А. П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования: дисс. д-ра техн. наук / А. П. Семенов. — М.: МИИТ, 2021. — 379 с.
4. Грачев В. В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов: дисс. ... д-ра техн. наук / В. В. Грачев. — СПб.: ПГУПС, 2020. — 434 с.
5. Лакин И. И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов: дисс. ... канд. техн. наук / И. И. Лакин. — М.: МИИТ, 2016. — 195 с.
6. Аболмасов А. А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания: дисс. ... канд. техн. наук / А. А. Аболмасов. — М.: МИИТ, 2017. — 180 с.

7. Мельников В. А. Совершенствование методов диагностирования тепловозов 2ТЭ116У с применением данных бортовых систем управления: дисс. ... канд. техн. наук / В. А. Мельников. — М.: РУТ, 2021. — 176 с.
8. Липа К. В. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К. В. Липа, В. Н. Пустовой, С. Л. Лянгасов и др. — М.: ООО «Локомотивные Технологии», 2015. — 212 с.
9. Плескунов М. А. Теория массового обслуживания / М. А. Плескунов — Екатеринбург: Ид-во Урал. ун-та, 2022. — 264 с.
10. Уокенбах Дж. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA. Пер. с англ. / Дж. Уокенбах. — М.: ООО «И. Д. Вильямс». 2014. — 944 с.
11. Денисов Ю. А. Депо для высокоскоростных электропоездов «Сапсан» / Ю. А. Денисов, Е. Г. Янченко, Г. И. Черномаз и др. — М.: Железные дороги мира, 2009. — С. 44–49.
12. Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта. Сайт ИЦ ЖТ.
13. Лакин И. И. Модель технического обслуживания и ремонта скоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663017 от 19 июня 2023 г. / Лакин И. И. — М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности.

Дата поступления: 20.08.2023

Решение о публикации: 08.10.2023

Контактная информация:

ГАЛАХОВ Андрей Николаевич — главный конструктор по подвижному составу; andrey.galakhov@ecrt.ru

ЛАКИН Игорь Игоревич — ведущий эксперт; igor.lakin@ecrt.ru

СКВОРЦОВ Дмитрий Дмитриевич — главный эксперт; dmitry.skvortsov@ecrt.ru

High-Speed Electric Trains Maintenance and Repair Simulation Using Data from On-board Diagnostic Systems

A. N. Galakhov, I. I. Lakin, D. D. Skvortsov

JSC “Engineering Center of Railway Transport”, 5, Bolshoi bulvar, the Territory of the Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russian Federation

For citation: Galakhov A. N., Lakin I. I., Skvortsov D. D. High-Speed Electric Trains Maintenance and Repair Simulation Using Data from On-board Diagnostic Systems. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 52-67. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-52-67

Summary

Purpose: High-speed railway lines (HSRL) are the most promising direction of railway transport development in the 21st century, increasing the mobility of the population at a distance of up to 1000 km, contributing to the development of urban conglomerations. Reliable rolling stock is necessary for the functioning of the HSRL.

The article describes the performed mathematical simulation of the operation and maintenance and repair system (MRS) of high-speed electric trains in relation to the St. Petersburg — Moscow landfill. The purpose of the simulation is to substantiate the requirements for MRS, including when using on-board automated systems for technical diagnostics. **Methods:** It is based on the principles of passenger traffic organization, technical requirements for domestic high-speed rolling stock, queue theory methods, as well as probabilistic mathematical modeling methods in MS Excel in the algorithmic language Visual Basic for Applications (VBA). The corresponding software has been developed. **Results:** A mathematical model and software have been developed, multifactor modeling has been performed, the degree of failure impact on the required fleet of high-speed electric trains has been determined. Methods of optimization of maintenance to reduce the required fleet are proposed. The requirements for the mathematical model itself are defined. A factor analysis of operation and maintenance has been performed by mathematical modeling. **Practical significance:** The guarantee of safe and reliable high-speed traffic is the creation of a modern system of maintenance and repair of rolling stock. The study of the interaction of operation and maintenance is very important in preparation for the launch of domestic high-speed traffic.

Keywords: railways, high-speed railway lines, rolling stock, maintenance and repair, mathematical modeling.

References

1. *GOST R 27.102—2021. Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob'ekta. Terminy i opredeleniya* [GOST R 27.102—2021. Reliability in technology. Reliability of the object. Terms and Definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2021, 40 p. (In Russian)
2. *GOST 18322—2016. Sistema TOiR tekhniki. Terminy i opredeleniya* [GOST 18322—2016. Equipment maintenance and repair system. Terms and Definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2021, 16 p. (In Russian)
3. Semenov A. P. *Model' upravleniya zhiznennym tsiklom lokomotivov s ispol'zovaniem sovremennykh metodov tekhnicheskogo diagnostirovaniya: diss. d-ra tekhn. nauk* [Model of locomotive life cycle management using modern methods of technical diagnostics: diss. Dr. Tech. Sciences]. Moscow: MIIT Publ., 2021, 379 p. (In Russian)
4. Grachev V. V. *Nauchnye osnovy primeneniya metodov intellektual'nogo analiza dannykh dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific principles of using data mining methods for monitoring the technical condition of locomotives: dissertation. ... Dr. Tech. Sciences]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2020, 434 p. (In Russian)
5. Lakin I. I. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po dannym bortovykh apparatno-programmnykh kompleksov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Monitoring the technical condition of locomotives according to data from on-board hardware and software systems: diss. ...cand. tech. Sciences]. Moscow: MIIT Publ., 2016, 195 p. (In Russian)
6. Abolmasov A. A. *Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem tyagovogo podvizhnogo sostava v usloviyakh servisnogo obsluzhivaniya: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Management of the technical condition of traction rolling stock under service conditions: diss. ...cand. tech. Sciences]. Moscow: MIIT Publ., 2017, 180 p. (In Russian)
7. Mel'nikov V. A. *Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya teplovozov 2TE116U s primeneniem dannykh bortovykh sistem upravleniya: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving methods

for diagnosing diesel locomotives 2TE116U using data from on-board control systems: diss. ...cand. tech. Sciences]. Moscow: RUT Publ., 2021, 176 p. (In Russian)

8. Lipa K. V., Pustovoy V. N., Lyangasov S. L. et al. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov. Teoriya i praktika* [Monitoring the technical condition and operating modes of locomotives. Theory and practice]. Moscow: OOO “Lokomotivnye Tekhnologii” Publ., 2015, 212 p. (In Russian)

9. Pleskunov M. A. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing theory]. Ekaterinburg: Ural. un-t Publ., 2022, 264 p. (In Russian)

10. Uokenbakh Dzh. *Excel 2010: professional'noe programmirovaniye na VBA. Per. s angl.* [Excel 2010: professional programming in VBA. Translation from English]. Moscow: OOO “I. D. Vil'yams” Publ., 2014, 944 p. (In Russian)

11. Denisov Yu. A., Yanchenko E. G., Chernomaz G. I. et al. *Depo dlya vysokoskorostnykh elektropoezdov “Sapsan”* [Depot for high-speed electric trains “Sapsan”]. Moscow: Zheleznye dorogi mira Publ., 2009, pp. 44–49. (In Russian)

12. *Inzhiniringovyy tsentr zheleznodorozhnogo transporta. Sayt ITs ZhT* [Engineering center for railway transport. IC ZhT website]. (In Russian)

13. Lakin I. I. *Model' tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta skorostnykh elektropoezdov s ispol'zovaniem dannykh bortovykh sistem diagnostiki. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2023663017 ot 19 iyunya 2023 g.* [Model of maintenance and repair of high-speed electric trains using data from on-board diagnostic systems. Certificate of state registration of a computer program № 2023663017 dated June 19, 2023]. Moscow: Federal'naya sluzhba po intellektual'noy sobstvennosti Publ. (In Russian)

Received: August 20, 2023

Accepted: October 08, 2023

Author's information:

Andrey N. GALAKHOV — Chief Rolling Stock Designer; andrey.galakhov@ecrt.ru

Igor I. LAKIN — Leading Expert; igor.lakin@ecrt.ru

Dmitriy D. SKVORTSOV — Leading Expert; dmitry.skvortsov@ecrt.ru

УДК 378:011.5

Расчет параметров мобильного механизированного комплекса, выполняющего монтаж воздушной линии, находящейся под влиянием контактной сети переменного тока

М. П. Бадер, А. А. Куликов

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

Для цитирования: Бадер М. П., Куликов А. А. Расчет параметров мобильного механизированного комплекса, выполняющего монтаж воздушной линии, находящейся под влиянием контактной сети переменного тока // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 68-77. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-68-77

Аннотация

Цель: Рассчитать параметры мобильного механизированного комплекса (ММК), выполняющего монтаж воздушной линии продольного электроснабжения, находящейся под влиянием контактной сети переменного тока. Несимметрия электрических параметров в воздушных линиях (ВЛ), вызванная электромагнитным влиянием контактной сети, приводит к снижению качества электроэнергии у потребителей. Это способствует снижению стабильности работы ВЛ. Наихудшим вариантом может стать возгорание жилого помещения, питание которого осуществляется от указанной ВЛ. Решает проблему несимметрии транспозиция нового типа, которая заключается в перекручивании проводов на 60° каждый пролет опор. При таком способе монтажа расстояние между проводами будет постоянно равномерное. Решается вопрос несимметрии электрических параметров, так как взаимное перемещение фазных проводов будет способствовать одинаковому воздействию электромагнитного поля на все три провода. Соответственно, будут выравниваться уровни наведенных напряжений обеих составляющих — электрической и магнитной. **Методы:** проводился анализ существующих способов монтажа ВЛ, профильных труб для крутильной машины, проводился расчет профиля для ММК, масса-габаритных характеристик, типов проводов и барабанов, под которые проектируется ММК. **Результаты:** В статье производился расчет параметров крутильной машины, которая состоит из подвижной и неподвижной частей. Были выбраны марки проводов для ВЛ, барабаны для монтажа и рассчитаны их параметры. Была построена зависимость нагрузок на каркас крутильной машины от длины профильной трубы в момент максимальной загрузки. Были выбраны размеры профильной трубы для каркаса крутильной машины и марка стали, а также проведена симуляция самой нагруженной опорной балки крепления барабана проводов для прогнозирования нагрузок и прогиба. **Практическая значимость:** показана необходимость использования ММК для монтажа ВЛ, так как только он способен выполнить монтаж с повышенной симметрией погонных параметров. ММК представляет собой крутильную машину с барабанами проводов, манипулятор для монтажа проводов, устройство закрепления и устройство натяжения проводов, систему управления и базу, на которую монтируется ММК. Обоснованы достоинства использования автоматизации в ММК.

Ключевые слова: Транспозиция, шестишаговая транспозиция, монтажный комплекс, электромагнитное влияние, несимметрия, воздушная линия, контактная сеть, крутильная машина.

Контактная сеть (КС) помимо питания подвижных составов включает в себя множество вторичных источников потребления электрической энергии: систему сигнализации и централизации, освещение, небольшие поселения, которые

расположены вдоль железной дороги, железнодорожные переезды и т. п. Все эти потребители должны получать качественную электрическую энергию, чтобы исключить повреждения или выход из строя, а также сохранять заложенную работоспособность. Поэтому важно сохранять высокие качественные показатели передаваемой энергии на всем промежутке времени эксплуатации того или иного участка железной дороги.

Питание указанных потребителей производится посредством воздушных линий (ВЛ) электропередач, расположенных вдоль железной дороги. Одной из проблем снижения качества передаваемой электроэнергии является нарушение симметрии погонных электрических параметров, возникающее по причине негативных электромагнитных влияний, причиной которых является контактная сеть. Единое электромагнитное поле, образующееся вокруг проводов контактной сети, индуцирует в смежной линии напряжения и токи, которые и вызывают несимметрию [1].

Для решения этой проблемы на сегодняшний день используется транспозиция проводов — взаимное перекручивание проводов ВЛ на опорах [2]. Но в этом методе присутствует существенный недостаток, не исключающий возникновения несимметрии. Транспозиция проводов ВЛ производится каждые 3 км пути, с полным шагом транспозиции 9 км [3]. Решить эту проблему способен другой тип перекрутки проводов ВЛ — шестишаговая транспозиция, когда местоположение каждого провода меняется на 60° в пространстве с частотой в каждую опору. Таким образом, полный цикл транспозиции ВЛ будет выполняться за 6 опор [4, 5].

Из-за небольшого поворота проводов ВЛ на каждой опоре натяжение будет сохраняться постоянным по всей длине. Провисание ВЛ будет стремиться к нулю, а равносторонний треугольник расстояний между фазными проводами будет сохраняться на всем протяжении линии. Но самое главное, что данное устройство транспозиции позволит сохранять одинаковое расстояние между каждым фазным проводом ВЛ и контактным проводом, благодаря чему будет решена проблема несимметрии электрических параметров от КС на ВЛ [6].

Другой проблемой является то, что на сегодняшний день монтаж ВЛ продольного электроснабжения осуществляется ручным (с привлечением техники) или полуавтоматическим способом. Для исключения ошибок человеческого фактора, повышения точности шестишаговой транспозиции, и в конечном итоге автоматизации всего процесса строительства ВЛ необходимо использовать устройство монтажа транспозиционной геометрии проводов, получившее название «мобильный механизированный комплекс» (ММК) [7]. ММК представляет собой крутильную машину с барабанами проводов, манипулятор для поднятия проводов к опоре, устройства натяжения и закрепления. Располагается ММК на передвижной платформе, в самом простом исполнении представляющей собой, по аналогии со

специальными машинами [8], полуприцеп, для перемещения которой необходим любой подходящий тягач.

Основой ММК является крутильная машина сигарного типа (рис. 1). Актуальной становится задача расчета параметров и характеристик ее частей, так как от этого напрямую зависит выбор электродвигателей, платформы для крепления ММК, барабанов с проводами, типов и моделей проводов и в итоге общая стоимость.

Как видно из рис. 1, крутильная машина состоит из подвижной и неподвижной частей и представляет собой пространственную раму. Пространственные рамы — это каркас, который выполняется из труб различного сечения и посредством сварки или болтов соединяется в единую конструкцию. Трубы для каркасов различаются по диаметру (малые, средние, большие), профилю поперечного сечения (круглые, профильные, переменного сечения), по способу изготовления (сварные и бесшовные), по толщине стенок (тонкостенные, толстостенные). Различный набор указанных характеристик формирует разную итоговую стоимость, которая в масштабах нескольких единиц произведенных ММК может отличаться в разы. Также на стоимость влияет наличие или отсутствие дополнительной обработки труб или каркаса, например цинкование трубы. Сварка такой трубы включает в себя дополнительные затраты на специалиста и материалы [9].

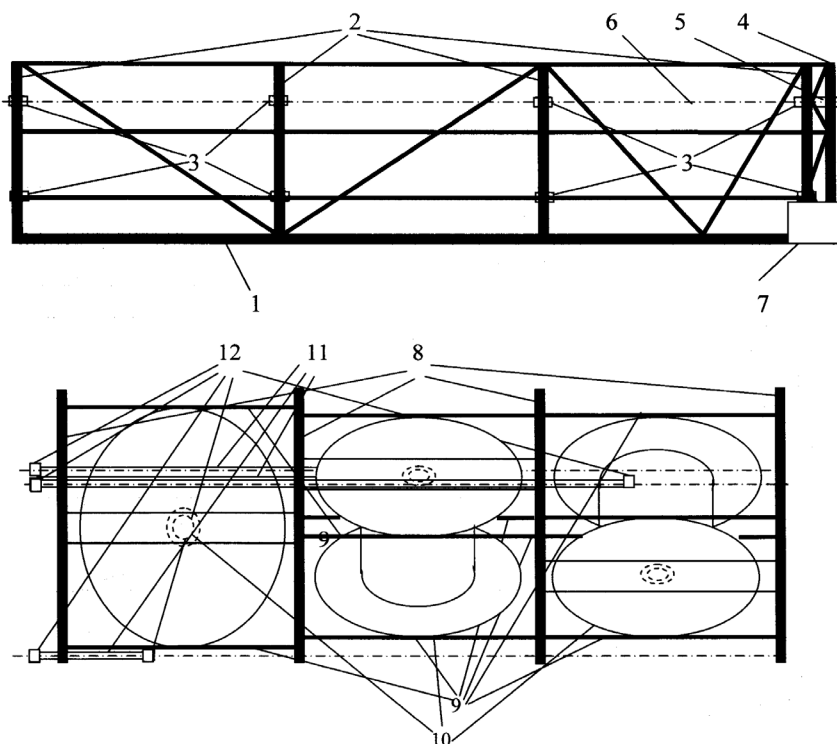


Рис. 1. Крутильная машина с неподвижной (сверху) и подвижной (снизу) частями:

- 1 — рама; 2 — опорные стойки; 3 — вращающиеся направляющие ролики;
- 4 — центральная опора; 5 — центра; 6 — ось всей конструкции; 7 — привод;
- 8 — опорные кольца; 9 — скрепляющие планки; 10 — центры вращения бухт;
- 11 — трубчатые направляющие; 12 — вращающиеся шкивы

Чтобы стоимость крутильной части ММК была оптимальной, необходимо выбрать трубу с достаточным набором характеристик. Достаточным будет считаться тот комплекс параметров, который будет обеспечивать безопасную и безотказную работу ММК на протяжении всего жизненного цикла. Безопасность и безотказность заключается в сохранении прочности конструкции, а следовательно, для начала необходимо определить рабочую нагрузку. Рабочая нагрузка крутильной машины ММК будет состоять из трех барабанов с проводами, которые вращаются в двух плоскостях.

Как показывает опыт эксплуатации, ВЛ ПЭ в основном выполняются проводами АС-25, АС-35 и АС-50 [10].

По ГОСТ 18690—2012 для указанных типов проводов подходят практически все типы барабанов. Для унификации посадочного места крутильной машины следует выбрать для сталеалюминевых проводов барабан типа 10, а для самонесущих проводов барабан типа 12, так как по ГОСТ 5151—79, табл. 1 длины шеек этих барабанов составляют $d = 500$ мм.

С учетом характеристик проводов АС-25, АС-35, АС-50 (ГОСТ 839—2019), СИП-3 1×35 , СИП-3 1×50 (ТУ 16-705.500—2006) был проведен расчет основных характеристик барабанов для использования в ММК.

По [11] полная длина кабеля в барабане будет высчитываться по формуле (1):

$$L_o = \frac{k\pi(D^2 - d^2)}{4W^2}, \quad (1)$$

где L_o — общая длина провода в барабане;

k — длина шейки барабана;

D — диаметр щеки барабана;

d — диаметр шейки барабана;

W — диаметр кабеля или провода.

Вес провода, намотанного на барабан, будет вычисляться по [11]:

$$G_{\Pi} = 1,02g_{\text{уд}} \frac{L_o}{1000}, \quad (2)$$

где G_{Π} — масса провода на барабане;

$g_{\text{уд}}$ — вес провода, необходимого для сооружения 1 км линии, кг;

1,02 — коэффициент, учитывающий потери.

Расчетные данные показали, что суммарный вес проводов АС-25, АС-35, АС-50, намотанных на барабан типа 10, находится в пределах 650 кг. При этом общая длина провода 5,7; 3,9 и 3 км соответственно. При выборе барабана типа 12 для провода АС-50 максимальная длина превышает 4 км, а суммарный вес — более

860 кг. Поэтому предпочтительнее с проводами типа АС использовать барабаны типа 10 для использования в крутильной машине ММК.

Провода СИП-3 имеют дополнительную изоляцию, поэтому их толщина существенно больше. На барабаны типа 10 СИП-3 1×35 максимально можно разместить 1,9 км, а СИП-3 1×50 — 1,6 км. Суммарный вес составит 322 и 365 кг. Для барабана типа 12 — 2,8 и 2,4 км соответственно, а суммарный вес составляет 466 и 518 кг.

Исходя из полученных данных следует вывод, что вес одного барабана с проводом для ВЛ 6-10 кВ необходимо учитывать равным 700 кг. При этом необходимо заложить запас прочности в виде 30 % от расчетного веса.

Для каркаса крутильной машины следует использовать профильную трубу прямоугольного сечения. Нагрузку необходимо прикладывать вдоль большей стороны. Для повышения прочностных характеристик на излом и скручивание необходимо, чтобы она была бесшовная холоднокатаная или горячекатаная.

Для окончательного выбора профильной трубы следует провести расчет длин и толщины стенок по ГОСТ 8645—68, ГОСТ 30245—2003 и [12]. Обозначение профильной трубы выглядит следующим образом:

$$A \times B \times C,$$

где A — высота трубы, B — ширина трубы, C — толщина стенок.

Материалом для труб является сталь 09Г2С. Всего на подвижную и неподвижные части крутильной машины понадобится около 100 метров трубы.

Необходимо учитывать, что барабан с проводами может находиться в трех основных положениях: в вертикальном, горизонтальном и промежуточном под углом в 45 градусов. Очевидно, что максимальная нагрузка будет возникать при горизонтальном положении барабана. Поэтому в ходе исследования были построены математические модели и зависимости основных характеристик для состояния, когда на боковую опору барабана действует максимальный расчетный вес $m = 900$ кг (рис. 2).

Расчет на прочность проводился для широкого ряда стандартных профильных труб квадратного и прямоугольного сечения. На рис. 2 вынесены зависимости основных стандартных размеров профилей: $sig1(L)$ — $40 \times 30 \times 4$; $sig2(L)$ — $60 \times 30 \times 5$; $sig3(L)$ — $60 \times 40 \times 5$; $sig4(L)$ — $60 \times 60 \times 6$; $sig5(L)$ — $80 \times 60 \times 5$. SIG_{pt} — предел текучести для стали 09Г2С, который составляет 294 МПа. Значение прочности рассчитывалось для длины балки крепления с длиной $l = 1200$ мм, с закрепление к опорному кольцу (рис. 1) с двух сторон и приложенной в центре максимальной нагрузкой. Как видно из рис. 2, профильная труба $40 \times 30 \times 4$ не подходит по причине разрушения при необходимой длине. Трубы с параметрами $60 \times 60 \times 6$ и $80 \times 60 \times 5$ обладают излишней прочностью, которая усложняет и удорожает производство. Подходящими под задачи производства крутильной

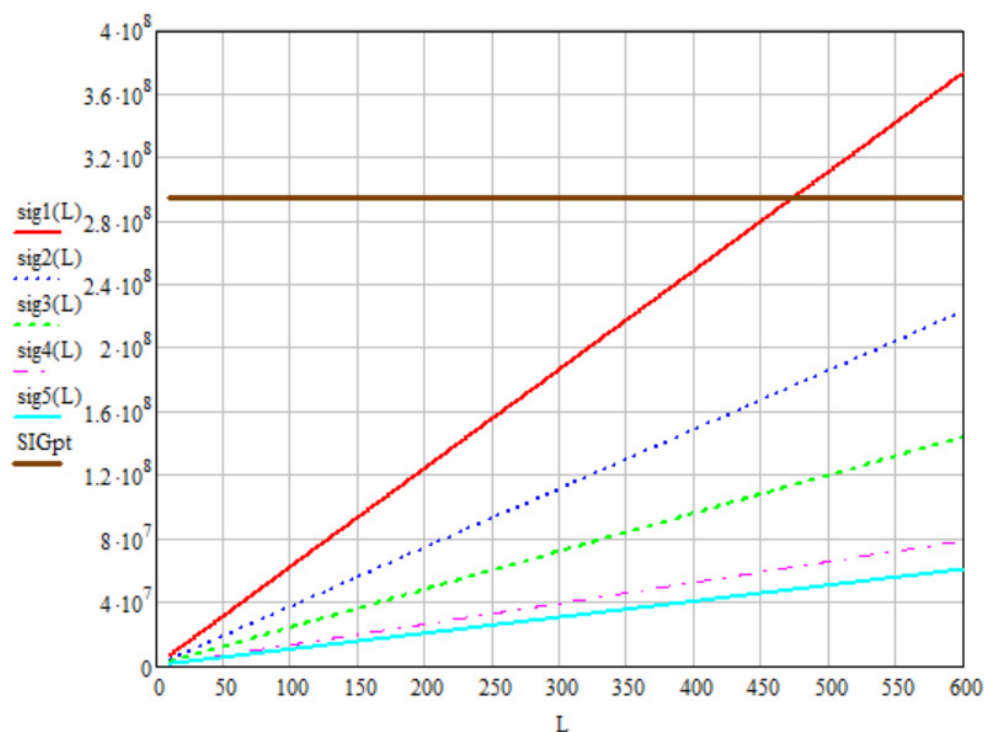


Рис. 2. Зависимости предельной нагрузки от длины ее приложения

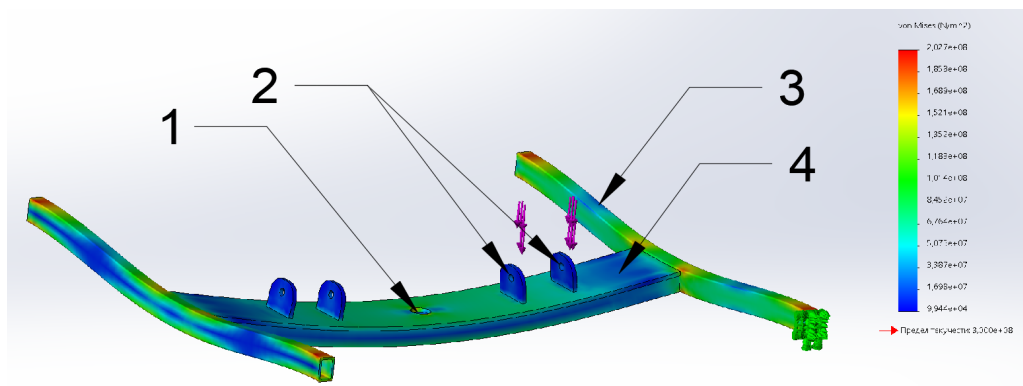


Рис. 3. Симуляция сборочной модели балки крепления и промежуточной профильной трубы из стали 09Г2С при горизонтальном положении барабана с проводами $m = 900$ кг:

- 1 — отверстие крепления вала барабана; 2 — место крепления роликов для опоры и вращения барабанов; 3 — профильная труба крепления опорной балки с опорным кольцом; 4 — опорная балка

машины сигарного типа ММК являются профильные трубы с характеристиками $60 \times 30 \times 5$ и $60 \times 40 \times 5$. Предпочтение отдается последней, так как ее стоимость на рынке ниже, а вес 100 метров трубы выше всего на 10 %.

Для балки крепления из профильной трубы $60 \times 40 \times 5$ из стали 09Г2С была построена модель в виртуальной среде проектирования, для которой проводилась симуляция максимальных нагрузок с целью выявления слабых мест (рис. 3). Прогиб балки для наглядности искажен в сторону деформации, которая не превышает

0,6 мм. Опорная балка 4 представляет собой лист металла толщиной 10 мм, усиленный ребрами жесткости с обратной стороны.

Как можно заметить из рис. 3, максимальные напряжения появляются в местах крепления опорной балки и профильной трубы, а также в местах крепления профильной трубы и опорного кольца, которое сделано из профиля той же марки с тем же параметрами, и не превышают 200 МПа. Так как расчет велся с запасом прочности, а предел текучести стали 09Г2С составляет 294 МПа, то можно подвести итог, что разрушения крутильной машины ММК в самом нагруженном состоянии происходить не будет.

Выводы

1. Решить проблему негативного электромагнитного влияния контактной сети на воздушную линию призвано устройство транспозиции с перекруткой 60° в каждую опору.
2. Шестишаговую транспозицию необходимо выполнять с помощью устройства монтажа транспозиции — ММК.
3. Пространственную раму крутильной машины необходимо выполнять из профильной трубы из стали 09Г2С.
4. Построен график зависимости нагрузок от длины опорной балки при максимальной нагрузке.
5. Структурный анализ показал максимальные нагрузки в местах крепления профильной трубы с другими элементами крутильной машины, которые не превышают допустимые пределы.

Библиографический список

1. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. — М.: УМК МПС РФ, 2002. — 637 с.
2. Зильберман С. М. Транспозиция линий электропередачи и ее неожиданный эффект / С. М. Зильберман, Т. Г. Красильникова, В. З. Манусов и др. // Электричество. — 2006. — № 5. — С. 11–16.
3. СП 226.1326000.2014. Электроснабжение неотяговых потребителей. Правила проектирования, строительства и реконструкции. — М., 2014.
4. Бадер М. П. Меры защиты воздушных линий от воздействия контактной сети переменного тока / М. П. Бадер, Е. Ю. Семенова, А. А. Куликов // Энергетические системы. — 2022. — № 1. — С. 38–45. — DOI: 10.34031/ES.2022.1.004.
5. Патент № 2460654 РФ. Устройство транспозиционной геометрии проводов воздушной высоковольтной линии электроснабжения с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии, находящейся в условиях интенсивного воздействия электромагнитного поля

контактной сети железных дорог, электрифицированных на переменном токе / Е. Ю. Семенова, Ю. В. Иодко, В. И. Карпенко и др. — 2012. — Бюл. № 25.

6. Бадер М. П. Автоматизация монтажа проводов высоковольтной линии тягового электроснабжения на переменном токе / М. П. Бадер, А. А. Куликов // *Электротехника*. — 2022. — № 9. — С. 2–7. — DOI: 10.53891/00135860_2022_9_2.

7. Патент № 2701601 РФ. Устройство монтажа транспозиционной геометрии проводов воздушной высоковольтной линии электроснабжения с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии, находящейся в условиях интенсивного воздействия электромагнитного поля контактной сети железных дорог, электрифицированных на переменном токе / Е. Ю. Семенова, Ю. В. Иодко, Д. В. Семенова и др. — 2019. — Бюл. № 28.

8. Механизация работ в хозяйстве электрификации и электроснабжения железных дорог. Методическое пособие по устройству, эксплуатации автотрис, автодрезин, специальных машин, механизмов и средств малой механизации, применяемых в хозяйстве электрификации и электроснабжения железных дорог Российской Федерации / Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «Российские железные дороги». — М.: Трансиздат, 2004. — 456 с.

9. Сиренко Е. Р. Сравнительный анализ технологий сварки оцинкованных труб водоснабжения / Е. Р. Сиренко // *Известия ТулГУ. Технические науки*. — 2020. — № 8.

10. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту устройств электроснабжения сигнализации, централизации, блокировки и связи на федеральном железнодорожном транспорте ЦЭ 881.

11. Короткевич М. А. Монтаж электрических сетей: учеб. пособие / М. А. Короткевич. — Минск: Высшая школа, 2012. — 512 с.

12. Кудишин Ю. И. Металлические конструкции. Общий курс / Ю. И. Кудишин, Е. И. Беленя, В. С. Игнатьева; под общ. ред. Ю. И. Кудишина. — М.: Академия, 2010. — 668 с.

Дата поступления: 20.10.2023

Решение о публикации: 23.11.2023

Контактная информация:

БАДЕР Михаил Петрович — д-р техн. наук, проф.; badjor@mail.ru

КУЛИКОВ Андрей Андреевич — аспирант; andrey.kulikov.1997@mail.ru

Calculation of the Parameters of a Mobile Mechanized Complex Performing the Installation of an Overhead Line under the Influence of an AC Contact Network

M. P. Bader, A. A. Kulikov

Russian University of Transport (MIIT), 9/9 Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Bader M. P., Kulikov A. A. Calculation of the Parameters of a Mobile Mechanized Complex Performing the Installation of an Overhead Line under the Influence of an AC Contact Network. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 68-77. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-68-77

Summary

Purpose: To calculate the parameters of a mobile mechanized complex (MMC) that performs the installation of an overhead line of longitudinal power supply under the influence of an AC contact network. The asymmetry of electrical parameters in overhead lines (OL) caused by the electromagnetic influence of the contact network leads to a decrease in the quality of electricity for consumers. This contributes to a decrease in the stability of the OL. The worst option may be the ignition of a dwelling, which is powered by the specified OL. A new type of transposition solves the problem of asymmetry, which consists in twisting the wires by 60° each span of the supports. With this method of installation, the distance between the wires will be constantly uniform. The problem of asymmetry of electrical parameters is solved, since the mutual movement of phase wires will contribute to the same effect of the electromagnetic field on all three wires. Accordingly, the levels of induced voltages of both components — electric and magnetic — will be leveled. **Methods:** The analysis of existing methods of installation of OL, profile pipes for the torsion machine, the calculation of the profile for MMC, mass-dimensional characteristics, types of wires and drums for which MMC is designed was carried out. **Results:** In the article, the parameters of the torsion machine, which consists of movable and fixed parts, were calculated. The brands of wires for OL, drums for installation were selected and their parameters were calculated. The dependence of the loads on the frame of the torsion machine on the length of the profile pipe at the time of maximum loading was constructed. The dimensions of the profile pipe for the frame of the torsion machine and the steel grade were selected, and the simulation of the most loaded support beam of the wire drum attachment was carried out to predict loads and deflection. **Practical significance:** The necessity of using MMC for OL installation is shown, since only it is able to perform installation with increased symmetry of linear parameters. MMC is a twisting machine with wire drums, a manipulator for mounting wires, a device for fixing and tensioning wires, a control system and a base on which the MMC is mounted. The advantages of using automation in MMC are substantiated.

Keywords: Transposition, six-step transposition, mechanized complex, electromagnetic influence, asymmetry, overhead line, contact network, torsion machine.

References

1. Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovmestimost'* [Electromagnetic compatibility]. Moscow: UMK MPS RF Publ., 2002, 637 p. (In Russian)
2. Zil'berman S. M., Krasil'nikova T. G., Manusov V. Z. et al. Transpozitsiya liniy elektroperedachi i ee neozhidannyi effekt [Transposition of power lines and its unexpected effect]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2006, Iss. 5, pp. 11–16. (In Russian)
3. SP 226.1326000.2014. *Elektrosnabzhenie netyagovykh potrebiteley. Pravila proektirovaniya, stroitel'stva i rekonstruktsii* [SP 226.1326000.2014. Power supply to non-traction consumers. Rules for design, construction and reconstruction]. Moscow, 2014. (In Russian)
4. Bader M. P., Semenova E. Yu., Kulikov A. A. Mery zashchity vozdushnykh liniy ot vozdeystviya kontaktnoy seti peremennogo toka [Measures to protect overhead lines from the influence of the AC contact network]. *Energeticheskie sistemy* [Energy systems]. 2022, Iss. 1, pp. 38–45. DOI: 10.34031/ES.2022.1.004. (In Russian)
5. Semenova E. Yu., Iodko Yu. V., Karpenko V. I. et al. *Ustroystvo transpozitsionnoy geometrii provodov vozdushnoy vysokovol'tnoy linii elektrosnabzheniya s povyshennoy simmetriey pogonnykh elektricheskikh parametrov linii, nakhodyashcheynya v usloviyakh intensivnogo vozdeystviya elektromagnitnogo polya kontaktnoy seti zheleznykh dorog, elektrifitsirovannykh na peremennom toke* [Design of transposition geometry of wires of an overhead high-voltage power supply line with increased symmetry of linear electrical parameters of the line, located under conditions of intense

influence of the electromagnetic field of the contact network of railways electrified with alternating current]. Patent RF, no. 2460654, 2012. (In Russian)

6. Bader M. P., Kulikov A. A. Avtomatizatsiya montazha provodov vysokovol'tnoy linii tyagovogo elektrosnabzheniya na peremennom toke [Automation of installation of wires of a high-voltage line of traction power supply on alternating current]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2022, Iss. 9, pp. 2–7. DOI: 10.53891/00135860_2022_9_2. (In Russian)

7. Semenova E. Yu., Iodko Yu. V., Semenova D. V. et al. *Ustroystvo montazha transpozitsionnoy geometrii provodov vozdushnoy vysokovol'tnoy linii elektrosnabzheniya s povyshennoy simmetriey pogonnykh elektricheskikh parametrov linii, nakhodyashcheyasya v usloviyakh intensivnogo vozdeystviya elektromagnitnogo polya kontaktnoy seti zheleznykh dorog, elektrifitsirovannykh na peremennom toke* [Device for mounting the transposition geometry of wires of an overhead high-voltage power supply line with increased symmetry of linear electrical parameters of the line, located under conditions of intense influence of the electromagnetic field of the contact network of railways electrified on alternating current]. Patent RF, no. 2701601, 2019. (In Russian)

8. *Mekhanizatsiya rabot v khozyaystve elektrifikatsii i elektrosnabzheniya zheleznykh dorog. Metodicheskoe posobie po ustroystvu, ekspluatatsii avtomotris, avtodrezin, spetsial'nykh mashin, mekhanizmov i sredstv maloy mekhanizatsii, primenyaemykh v khozyaystve elektrifikatsii i elektrosnabzheniya zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii. Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniya OAO "Rossiyskie zheleznye dorogi"* [Mechanization of work in the electrification and power supply of railways. Methodological manual on the design and operation of railcars, railcars, special machines, mechanisms and means of small-scale mechanization used in the electrification and power supply of railways of the Russian Federation]. Moscow: Transizdat Publ., 2004, 456 p. (In Russian)

9. Sirenko E. R. Sravnitel'nyy analiz tekhnologiy svarki otsinkovannykh trub vodosnabzheniya [Comparative analysis of technologies for welding galvanized water supply pipes]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical science]. 2020, Iss. 8. (In Russian)

10. *Instruktsiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu ustroystv elektrosnabzheniya signalizatsii, tsentralizatsii, blokirovki i svyazi na federal'nom zheleznodorozhnom transporte TsE 881* [Instructions for the maintenance and repair of power supply devices for signaling, centralization, blocking and communication on federal railway transport TsE 881]. (In Russian)

11. Korotkevich M. A. *Montazh elektricheskikh setey: ucheb. posobie* [Installation of electrical networks: textbook. allowance]. Minsk: Vysshaya shkola Publ., 2012, 512 p. (In Russian)

12. Kudishin Yu. I., Belenya E. I., Ignat'eva V. S.; under general ed. Yu. I. Kudishina. *Metallicheskie konstruksii. Obshchiy kurs* [Metal structures. General course]. Moscow: Akademiya Publ., 2010, 668 p. (In Russian)

Received: October 20, 2023

Accepted: November 23, 2023

Author's information:

Michail V. BADER — Dr. Sci. in Engineering, Professor; badjor@mail.ru

Andrey A. KULIKOV — Postgraduate Student; andrey.kulikov.1997@mail.ru

УДК 629.424 + 06

Улучшение тягово-энергетических характеристик автономных локомотивов за счет применения модульного исполнения элементов тяговой системы

Т. З. Талахадзе, Н. В. Гребенников, И. В. Больших

Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Талахадзе Т. З., Гребенников Н. В., Больших И. В. Улучшение тягово-энергетических характеристик автономных локомотивов за счет применения модульного исполнения элементов тяговой системы // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 78-89. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-78-89

Аннотация

Цель: Приоритетным направлением стратегических программ по развитию железнодорожного транспорта является проектирование и внедрение в эксплуатацию нового подвижного состава, отличающегося высокими технико-экономическими показателями. В связи с этим целью является сформулировать научно обоснованные технические решения, позволяющие сократить расходы на производство, обслуживание и ремонт тягового подвижного состава и улучшить его тягово-энергетические характеристики. **Методы:** Для решения поставленной цели применены методы: структурного анализа; статистической обработки больших массивов экспериментальных данных; имитационного компьютерного моделирования; теории локомотивной тяги. **Результаты:** Выделены приоритетные направления совершенствования тягового подвижного состава. Разработан комплекс научно обоснованных технических решений, позволяющих улучшить тягово-энергетические характеристики автономных локомотивов, которые могут позволить осуществить переход на единую платформу для тепловозов и электровозов. В результате будет достигнуто сокращение расходов на производство, обслуживание и ремонт тягового подвижного состава и улучшение тягово-энергетических характеристик локомотивов. **Практическая значимость:** Заключается в получении экономического эффекта за счет сокращения расходов на производство, обслуживание и ремонт тягового подвижного состава и расходов топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.

Ключевые слова: Тяговый подвижной состав, автономный локомотив, электровоз, тепловоз, единая платформа, модульная структура, тяговая система, силовая энергетическая установка, энергетическая эффективность, компьютерное моделирование.

Введение

Одним из ключевых направлений в деятельности ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») является повышение эффективности локомотивной тяги и перевозочного процесса в целом. На основе анализа «Стратегии развития холдинга ОАО «РЖД» на период до 2030 года» [1] и ряда других нормативных документов компании, а также государственных документов и законов [2–4] можно сделать вывод, что основной задачей развития и совершенствования железнодорожного

подвижного состава является разработка, производство и внедрение в эксплуатацию подвижного состава, обладающего высокими технико-экономическими показателями.

На основании этого можно выделить три приоритетных направления совершенствования эффективности локомотивной тяги:

- улучшение тяговых и энергетических характеристик тягового подвижного состава;
- снижение времени простоя подвижного состава при организации ремонта и технического обслуживания;
- увеличение нагрузки на ось.

Улучшение тяговых и энергетических характеристик тепловозов может быть достигнуто за счет модернизации дизель-генераторной установки путем применения новой конструкции и совершенствования ее отдельных составляющих [5, 6], а также применения поосного регулирования силы тяги и алгоритма дискретно-адаптивного управления тяговыми электрическими машинами в эксплуатации [7, 8].

Для электровозов актуальны мероприятия, касающиеся только тягового электропривода, поэтому в данной статье будет подробно рассмотрен и обоснован комплекс мероприятий, позволяющий решить задачу совершенствования эффективности локомотивной тяги применительно к автономному тяговому подвижному составу — тепловозам, в тяговую систему которых, помимо тягового электропривода, также входит силовая энергетическая установка.

1. Показатели энергетической эффективности основных элементов тягово-энергетической системы автономного грузового магистрального локомотива

Как показывает анализ эксплуатации автономных локомотивов, основной проблемой является недоиспользование их доступной мощности, что связано с неравномерной загрузкой и изменяющимся рельефом местности [9], что, в свою очередь, существенно влияет на энергетическую эффективность [10, 11]. В случае автономных локомотивов это выражается как в работе силовой энергетической установки в неустановившихся режимах, так и в недоиспользовании доступной мощности тяговых электродвигателей. Для проведения исследований показателей энергетической эффективности целесообразно рассматривать наиболее распространенную тягово-энергетическую систему автономного тягового подвижного состава на примере тепловоза 2ТЭ25КМ.

Дадим краткую характеристику данного тепловоза с описанием основных параметров, необходимых для проведения исследования. Тепловоз серии 2ТЭ25КМ является двухсекционным, тяговая система каждой секции которого включает: силовую энергетическую установку — дизель-генератор 18-9ДГ,

состоящую из дизельного двигателя Д49 (16ЧН26/26) мощностью 2650 кВт и тягового генератора ГС-501АУ2; тяговый преобразователь М-ТПП-3600М-1-У2, конструкция которого позволяет реализовать управление всеми шестью тяговыми электродвигателями типа ЭДУ-133Ц, мощность каждого из которых составляет 366 кВт в номинальном режиме.

Если использовать для характеристики конструкции тягово-энергетической системы тепловоза модульный принцип, то можно выделить два основных модуля: «силовая энергоустановка», представляющий собой дизель-генераторную установку, и «тяговый электропривод», включающий тяговый преобразователь и тяговые электродвигатели.

Характеристика процесса преобразования энергии при работе тягово-энергетической системы тепловоза состоит из трех этапов и двух уровней и подробно представлена в [12]. Отметим, что для автономного тягового подвижного состава задача повышения энергетической эффективности является двухуровневой [12] — на верхнем уровне (модуль «силовая энергоустановка») и на нижнем (модуль «тяговый электропривод»). В связи с чем анализ показателей энергетической эффективности целесообразно вести по уровням (модулям) в согласовании с этапами преобразования энергии.

В модуле «силовая энергоустановка», в первичном двигателе, химическая энергия топлива преобразуется сначала в тепловую энергию, а затем в механическую энергию на валу дизельного двигателя, в этом случае потребляемую мощность тепловоза через топливный эквивалент $P_{\text{потр}}$, кВт определим по формуле:

$$P_{\text{потр}} = g_{ei} Q_p^H, \quad (1)$$

где Q_p^H — удельная теплота сгорания дизельного топлива;

g_{ei} — расход топлива на соответствующей позиции контроллера машиниста в каждый конкретный момент работы, кг/с.

Затем в модуле «силовая энергоустановка» механическая энергия коленчатого вала дизеля преобразуется в электрическую энергию синхронного тягового генератора с двумя параллельными трехфазными обмотками, а электрическая мощность модуля «силовая энергоустановка» $P_{\text{СЭУ}}$, кВт будет определяться по формуле:

$$P_{\text{СЭУ}} = 2\sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{ф}} \cos \varphi, \quad (2)$$

где $I_{\text{ф}}$ — действующие значения фазного тока, А;

$U_{\text{л}}$ — действующее значение линейного напряжения, В;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности: при различных значениях напряжения находится в пределах 0,79–0,96; для номинального режима составляет 0,9.

В модуле «тяговый электропривод», в тяговом преобразователе, энергия, выработанная модулем «силовая энергоустановка», преобразуется и питает каждый из шести тяговых электродвигателей отдельно, которые, в свою очередь, преобразуют ее в механическую энергию вращения колесных пар и реализуют касательную силу тяги в контакте «колесо — рельс», совершая полезную механическую работу. Полезная мощность автономного тягового подвижного состава на тягу поезда P_T будет равна:

$$P_T = \frac{F_k V}{3,6}, \quad (5)$$

где V — скорость, км/ч; F_k — касательная сила тяги, кН.

Основным показателем энергетической эффективности является коэффициент полезного действия (КПД). Исходя из структуры тяговой системы тепловоза, его мгновенное значение КПД $\eta_{\text{АГМЛ}}$ будет определяться произведением КПД модуля «силовая энергоустановка» $\eta_{\text{СЭУ}}$, КПД модуля «тяговый электропривод» $\eta_{\text{ТЭП}}$ и КПД механического тягового привода $\eta_{\text{МЕХ}}$:

$$\eta_{\text{АГМЛ}} = \eta_{\text{СЭУ}} \eta_{\text{ТЭП}} \eta_{\text{МЕХ}}. \quad (6)$$

КПД модуля «силовая энергоустановка» можно определить как:

$$\eta_{\text{СЭУ}} = \frac{P_{\text{СЭУ}}}{P_{\text{потр}}}. \quad (7)$$

КПД модуля «тяговый электропривод» можно определить как:

$$\eta_{\text{ТЭП}} = \frac{P_T}{P_{\text{СЭУ}}}. \quad (8)$$

Также КПД автономного грузового магистрального локомотива можно определить отношением совершенной полезной работы модулем «тяговый электропривод» на тягу поезда $A_{\text{пол}}$, кВт · ч к полной потребленной энергии модулем «силовая энергоустановка» $E_{\text{потр}}$, кВт · ч:

$$\eta_{\text{АГМЛ}} = \frac{A_{\text{пол}}}{E_{\text{потр}}}. \quad (9)$$

Совершенная полезная работа модулем «тяговый электропривод» на тягу поезда равна интегралу по времени от полезной мощности P_T (5):

$$A_{\text{пол}} = \int P_T dt. \quad (10)$$

Полная потребленная энергия модулем «силовая энергоустановка» равна интегралу по времени от потребленной мощности $P_{\text{потр}}$ (1):

$$E_{\text{потр}} = \int P_{\text{потр}} dt. \quad (11)$$

Повышению энергетической эффективности модуля «тяговый электропривод» посвящено множество публикаций, выделим основные решения, которые позволяют решить данную задачу: переход на асинхронный тяговый привод [13], реализация поосного регулирования силы тяги и алгоритма дискретно-адаптивного управления тяговым приводом [7, 8].

Повышение энергетической эффективности модуля «силовая энергоустановка» обусловлено приведением условий ее работы в соответствие с номинальными параметрами, которые ориентированы на максимальные значения КПД [13]. Однако, как показывает опыт эксплуатации автономных локомотивов [14], данный модуль работает в переходных режимах и при частичной нагрузке, что приводит к снижению КПД с номинального значения на уровне 36–38 % до эксплуатационного значения порядка 20–25 % [15, 16].

2. Методы повышения энергетической эффективности тягово-энергетической системы магистральных тепловозов

Как было показано выше, задача повышения энергетической эффективности является двухуровневой: на нижнем уровне проводится оптимизация модуля «тяговый электропривод», а на верхнем уровне — оптимизация модуля «силовая энергоустановка». Применительно к модулю «силовая энергоустановка» добиться повышения эффективности при имеющейся моноблочной структуре невозможно. Следовательно, для приведения мощности модуля «тяговый электропривод» для обеспечения требуемой силы тяги необходимо обеспечить поступление мощности при минимальном потреблении дизельного топлива, что может быть достигнуто применением нескольких дизель-генераторных установок в составе модуля «силовая энергоустановка» (от двух до четырех на секцию). В предлагаемой конструкции модуля «силовая энергоустановка» предлагается применять высокооборотные дизельные двигатели, которые имеют лучшие массогабаритные показатели по сравнению со штатным дизелем [17], а в качестве генератора использовать реактивную индукторную машину, преимуществом которой является способность поддерживать номинальное значение КПД при частичных нагрузках в процессе эксплуатации [18].

Такая конструкция модуля «силовая энергоустановка» позволяет в процессе эксплуатации регулировать значение генерируемой мощности за счет ввода в работу и вывода из нее дизельных двигателей, работающих в номинальном режиме, а не за счет работы дизельного двигателя в режимах частичной (неполной) нагрузки, которые характеризуются низкими значениями энергетической эффективности (отличными от номинального режима).

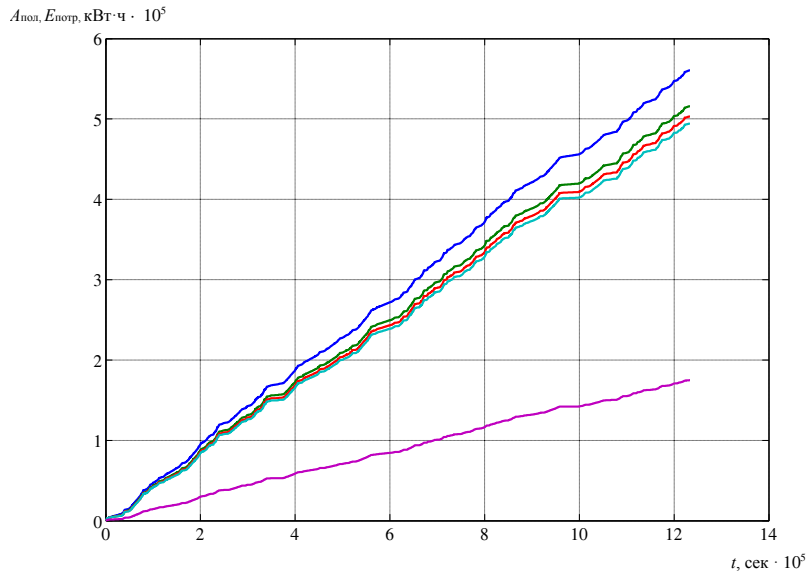
3. Анализ показателей энергетической эффективности тягово-энергетической системы грузовых тепловозов в эксплуатации на Южном полигоне

Для оценки эффективности предлагаемого метода повышения энергетической эффективности выполним сопоставление показателей энергетической эффективности тепловоза серии 2ТЭ25КМ со штатной дизель-генераторной установкой в реальных условиях эксплуатации на основе данных микропроцессорной системы управления тепловозом (МПСУ-ТП) и результатов компьютерного моделирования для автономного локомотива с модульной силовой установкой на базе нескольких высокооборотных дизельных двигателей.

Опираясь на методику, описанную во втором разделе, представим результаты анализа показателей энергетической эффективности.

Для анализа были взяты данные бортового регистратора о работе тепловоза серии 2ТЭ25КМ за один месяц с составами различной массы на Южном полигоне эксплуатации. Руководствуясь данными об управляемом движении реального локомотива и компьютерной моделью тепловоза с модульной силовой энергоустановкой, выполненной в среде программных комплексов «Универсальный механизм» и SimInTech, было выполнено моделирование работы автономного локомотива с составами различной массы (рис. 1). При этом было использовано три варианта конструкции модуля «силовая энергоустановка» — с двумя, тремя и четырьмя дизелями на секцию.

Потребленная энергия по топливному эквиваленту тепловозом 2ТЭ25КМ составила $5,604 \cdot 10^5$ кВт · ч (рисунок, синяя линия). Локомотив с модульной силовой энергоустановкой (2 дизеля на секцию) потребил $5,158 \cdot 10^5$ кВт · ч (рис. 1, зеленая линия). Тепловоз с модульной силовой энергоустановкой (3 дизеля на секцию) потребил $5,03 \cdot 10^5$ кВт · ч (рисунок, красная линия). Тепловоз с модульной силовой энергоустановкой (4 дизеля на секцию) потребил $4,934 \cdot 10^5$ кВт · ч (рис. 1, салатная линия). Совершенная полезная работа (работа на тягу поезда) одинакова для тепловоза 2ТЭ25КМ и тепловоза с модульной силовой энергоустановкой и равна $1,748 \cdot 10^5$ кВт · ч (рисунок, сиреневая линия). Эксплуатационный КПД тепловоза 2ТЭ25КМ составил 0,312. Тепловоз с модульной силовой энергоустановкой имеет КПД, равный 0,339, 0,348 и 0,354 для модулей, состоящих из двух, трех и четырех дизелей соответственно.



Сравнение энергетических показателей работы тепловоза.

Следовательно, при работе на Южном полигоне эксплуатации модульная конструкция силовой энергоустановки позволяет улучшить энергетическую эффективность локомотива, при этом стоит отметить, что конструкция модуля «силовая энергоустановка», включающая четыре дизельных двигателя, позволяет добиться наибольшего увеличения КПД.

Заключение. Основные выводы

Представленный комплекс научно обоснованных технических решений, улучшающих тягово-энергетические характеристики автономных локомотивов, может позволить осуществить переход на единую платформу для тепловозов и электровозов. Модульный принцип построения тяговой системы локомотива позволяет сократить расходы на обслуживание и ремонт тягового подвижного состава путем уменьшения времени простоев. Применение в составе модуля «силовая энергоустановка» высокооборотных дизельных двигателей дает возможность значительно уменьшить массу силовой установки и обеспечить переход на двухосные тележки, что позволит перейти на единую платформу для тепловозов и электровозов (использование унифицированной экипажной части), исключением будут являться только колесно-моторные блоки, что даст возможность сократить расходы на производство, обслуживание и ремонт тягового подвижного состава. Предлагаемая конструкция модуля «силовая энергоустановка» с четырьмя дизельными двигателями на секцию обеспечивает улучшение энергетической эффективности локомотива в процессе эксплуатации во всем диапазоне нагрузок — на 4,2 % по сравнению с магистральными грузовыми тепловозами серии 2ТЭ25КМ, что снижает затраты на топливно-энергетические ресурсы.

Библиографический список

1. Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на период до 2015 года и на период до 2030 года. — М.: ОАО «РЖД», 2011. — 97 с.
2. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников и др.; под ред. В. А. Гапановича. — М.: Изд. дом МИСиС, 2012. — 620 с.
3. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ (ред. от 29 июля 2017 г.) (с изм. и доп., вступ. в силу с 26 июля 2019 г.). «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
4. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на период до 2030 года (Белая книга). — М.: ОАО «РЖД», 2015. — 128 с.
5. Зарифьян А. А. Модульная силовая энергетическая установка современного тепловоза / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе и др. // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России». Т. 1. Технические науки. — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2018. — С. 191–195.
6. Зарифьян А. А. Повышение энергетической эффективности тепловозов за счет применения модульной силовой установки / А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2018. — С. 100–104.
7. Гребенников Н. В. Метод снижения потерь электроэнергии в тяговых двигателях автономного локомотива за счет применения дискретно-адаптивного управления / Н. В. Гребенников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2023. — № 1(89). — С. 234–240. — DOI: 10.46973/0201-727X_2023_1_234.
8. Зарифьян А. А. (мл.) Дискретно-адаптивное управление тяговым приводом грузового электровоза при работе с неполной нагрузкой / А. А. Зарифьян (мл.) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 1. — С. 49–59.
9. Зарифьян А. А. Определение полезной работы, совершаемой локомотивом при тяге поезда / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 1(69). — С. 40–49.
10. Зарифьян А. А. О возможности повышения энергетической эффективности локомотивов при работе с частичной нагрузкой / Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Т. 2. Технические науки. — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения 2016. — С. 74–76.
11. Зарифьян А. А. Анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности грузовых тепловозов / А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 3(71). — С. 46–53.

12. Талахадзе Т. З. Повышение энергетической эффективности магистральных тепловозов за счет перехода к модульным силовым установкам: дисс. ... канд. техн. наук / Т. З. Талахадзе. — 2019. — 164 с.
13. Андриющенко А. А. Асинхронный тяговый привод локомотивов / А. А. Андриющенко, Ю. В. Бабков и др. — М.: УМЦ ЖДТ, 2013. — 413 с.
14. Гребенников Н. В. Анализ эксплуатационного потребления топлива грузовыми тепловозами / Н. В. Гребенников, Ю. В. Сердюков, А. Н. Шульгин // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 18–21 апреля 2017 года. Т. 1. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. — С. 115–118.
15. Гребенников Н. В. Пути повышения энергетической эффективности автономного тягового подвижного состава / Н. В. Гребенников // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 4(57). — С. 19–23.
16. Гребенников Н. В. Оценка энергоэффективности тепловоза 2ТЭ25КМ в условиях Северо-Кавказской железной дороги / Н. В. Гребенников // Транспорт: наука, образование, производство: труды Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 25–27 апреля 2022 года. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2022. — С. 46–49.
17. Талахадзе Т. З. Модульная структура силовой энергетической установки грузовых тепловозов / Т. З. Талахадзе, Н. В. Романченко, А. Е. Набоков и др. // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2019): сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23–26 апреля 2019 года. Т. 4. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. — С. 138–142.
18. Гребенников Н. В. Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в реактивных индукторных машинах с сильным взаимным влиянием фаз / Н. В. Гребенников // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — Т. 16. — № 2. — С. 315–321. — DOI: 10.20295/1815-588/X-2019-2-315-321.

Дата поступления: 15.10.2023

Решение о публикации: 23.11.2023

Контактная информация:

ТАЛАХАДЗЕ Темур Зурабович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав»; 086temur086@gmail.com

ГРЕБЕННИКОВ Николай Вячеславович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав»; grebennikovnv@mail.ru

БОЛЬШИХ Иван Валерьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав»; ivan.bolshih@yandex.ru

Improving the Traction and Energy Characteristics of Self-Contained Locomotives Through the Use of Modular Design of the Traction System Elements

T. Z. Talakhadze, N. V. Grebennikov, I. V. Bolshih

Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Talakhadze T. Z., Grebennikov N. V., Bolshih I. V. Improving the Traction and Energy Characteristics of Self-Contained Locomotives Through the Use of Modular Design of the Traction System Elements. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 78-89. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-78-89

Summary

Purpose: The priority direction of strategic programs for the development of railway transport is the design and introduction into operation of new rolling stock, which is characterized by high technical and economic indicators. In this regard, the goal is to formulate scientifically based technical solutions to reduce the costs of production, maintenance and repair of traction rolling stock and improve its traction and energy characteristics.

Methods: To achieve the stated goal, the following methods have been applied: structural analysis; statistical processing of large arrays of experimental data; computer simulation; theory of locomotive traction.

Results: Priority directions for improving traction rolling stock have been identified. A set of scientifically based technical solutions has been developed to improve the traction and energy characteristics of self-contained locomotives, which may allow the transition to a single platform for diesel and electric locomotives. As a result, the reduction in costs for the production, maintenance and repair of traction rolling stock and an improvement in the traction and energy characteristics of locomotives will be achieved. **Practical significance:** Economic effect obtained due to reducing the costs of production, maintenance and repair of traction rolling stock and the consumption of fuel and energy resources for train traction.

Keywords: Traction rolling stock, self-contained locomotive, electric locomotive, diesel locomotive, single platform, modular structure, traction system, power plant, energy efficiency, computer simulation.

References

1. *Energeticheskaya strategiya holding "RZD" na period do 2015 goda I na period do 2030 goda* [Energy strategy of the "RZD" holding for the period until 2015 and for the period until 2030]. Moscow: JSC "RZD" Publ., 2011, 97 p. (In Russian)

2. Gapanovich V. A., Avilov V. D., Arzhannikov B. A. et al.; ed. by V. A. Gapanovich. *Energoberejenie na jeleznodorojnom transporte* [Energy saving in railway transport]. Moscow: MISiS Publ., 2012, 620 p. (In Russian)

3. *Federal'nyy zakon ot 23 noyabrya 2009 g. № 261-FZ (red. ot 29 iyulya 2017 g.) (s izm. i dop., vstup. v silu s 26 iyulya 2019 g.). "Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii"* [Federal Law № 261-FZ of November 23, 2009 (as amended on July 29, 2017) (as amended and supplemented, entered into force on July 26, 2019). "On energy saving and increasing energy efficiency and on introducing amendments to certain legislative acts of the Russian Federation"]. (In Russian)

4. *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya holdinga "RZHD" na period do 2025 goda i na period do 2030 goda (Belaya Kniga)* [Strategy for scientific and technological development of the

Russian Railways holding for the period until 2025 and for the period until 2030 (White Book)]. Moscow: JSC “RZD” Publ., 2015, 128 p. (In Russian)

5. Zarifyan A. A., Grebennikov N. V., Talakhadze T. Z. et al. Modul'naya silovaya energeticheskaya ustanovka sovremennogo teplovoza [The modular power energy installation of the modern diesel locomotive]. *Sbornik nauchnyh trudov “Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya transporta, promyshlennosti i ekonomiki Rossii”, T. 1. Tekhnicheskie nauki* [Collection of scientific papers “Current problems and prospects for the development of transport, and industry and the Russian economy”. Vol. 1. Technical sciences]. Rostov-on-Don: Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya Publ., 2018, pp. 191–195. (In Russian)

6. Zarifyan A. A., Talakhadze T. Z. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti teplovozov za schet pri-meneniya modul'noj silovoj ustanovki [Increasing the energy efficiency of diesel locomotives by the using of a modular power plant]. *Sbornik nauchnyh trudov “Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo”* [Collection of scientific papers “Transport: science, education, production”]. Rostov-on-Don: Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya Publ., 2018, pp. 100–104. (In Russian)

7. Grebennikov N. V. Metod snizheniya poter' elektroenergii v tyagovyh dvigatelyah avtonomnogo lokomotiva za schet primeneniya diskretno-adaptivnogo upravleniya [Method for reducing power losses in traction motors of an autonomous locomotive through the use discrete adaptive control]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications]. 2023, Iss. 1(89), pp. 234–240. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_1_234. (In Russian)

8. Zarifyan A. A. (Jr) Diskretno-adaptivnoe upravlenie tyagovym privodom gruzovogo elektrovoza pri rabote s nepolnoj nagruzkoy [Discrete and adaptive control of the traction drive of the cargo electric locomotive during the work with the underload]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications]. 2018, Iss. 1, pp. 49–59. (In Russian)

9. Zarifyan A. A., Grebennikov N. V., Talakhadze T. Z. et al. Opredelenie poleznoj raboty, sovershaemoj lokomotivom pri tyage poezda [Calculation of useful work of locomotive at the train traction]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications]. 2018, Iss. 1(69), pp. 40–49. (In Russian)

10. Grebennikov N. V., Zarifyan A. A., Talakhadze T. Z. O vozmozhnosti povysheniya energeticheskoy effektivnosti lokomoti-vov pri rabote s chastichnoj nagruzkoy [Possibility of increasing energy efficiency of locomotives working at partial load]. *Sb. nauchnyh trudov “Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo”. T. 2. Tekhnicheskie nauki* [Collection of scientific works “Transport: science, education, production”. Vol. 2. Technical sciences]. Rostov-on-Don: Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya Publ., 2016, pp. 74–76. (In Russian)

11. Zarifyan A. A., Talakhadze T. Z. Analiz ekspluatatsionnyh pokazatelej energeticheskoy effektivnosti gruzovyh teplovozov [Analysis of energy efficiency operational indicators of freight diesel locomotives]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications]. 2018, Iss. 3 (71), pp. 46–53. (In Russian)

12. Talakhadze T. Z. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti magistral'nykh teplovozov za schet perekhoda k modul'nym silovym ustanovkam: diss. ... kand. tekhn. nauk [Increasing the energy efficiency of mainline diesel locomotives through the transition to modular power plants: diss. ...cand. tech. Sciences]. 2019, 164 p. (In Russian)

13. Andryushchenko A. A., Babkov Yu. V. et al. *Asinkhronnyy tyagovyy privod lokomotivov* [Asynchronous traction drive of locomotives]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2013, 413 p. (In Russian)

14. Grebennikov N. V., Serdyukov Yu. V., Shul'gin A. N. Analiz ekspluatatsionnogo potrebleniya topliva gruzovymi tep-lovozami [Analysis operational fuel consumption of freight locomotives]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Rostov-na-Donu, 18–21 aprelya 2017 goda. T. 1* [Transport: science, education, production: collection of scientific works of the International Scientific and Practical conference, Rostov-on-Don, April 18–21, 2017. Vol. 1]. Rostov-on-Don: Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Publ., 2017, pp. 115–118. (In Russian)

15. Grebennikov N. V. Puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti avtonomnogo tyagovogo podvizhnogo sostava [Ways to improve the energy efficiency of autonomous traction rolling stock]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University]. 2021, Iss. 4(57), pp. 19–23. (In Russian)

16. Grebennikov, N. V. Ocenka energoeffektivnosti teplovoza 2TE25KM v usloviyah Severo-Kavkazskoj zheleznoj dorogi [Assessment of the energy efficiency of a diesel locomotive 2te25km in the conditions of the North-Caucasian railway]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Rostov-na-Donu, 25–27 aprelya 2022 goda* [Transport: science, education, production: proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 25–27, 2022]. Rostov-on-Don: Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Publ., 2022, pp. 46–49. (In Russian)

17. Talakhadze T. Z., Romanchenko N. V., Nabokov A. E. et al. Modul'naya struktura silovoj energeticheskoy ustanovki gruzovyh teplovozov [Modular structure of power installation of freight locomotive]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo (Transport-2019): sbornik nauchnykh trudov, Rostov-na-Donu, 23–26 aprelya 2019 goda. Tom 4* [Transport: science, education, production (Transport-2019): collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 23–26, 2019. Vol. 4]. Rostov-on-Don: Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Publ., 2019, pp. 138–142. (In Russian)

18. Grebennikov N. V. Matematicheskaya model' dlya analiza elektromagnitnykh processov v reaktivnykh induktornykh mashinah s sil'nym vzaimnym vliyaniem faz [Mathematical model for analysis of electromagnetic processes in reactive inductor machines with strong mutual influence of phases]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 315–321. DOI 10.20295/1815-588/H-2019-2-315-321. (In Russian)

Received: October 15, 2023

Accepted: November 23, 2023

Author's information:

Temur Z. TALAKHADZE — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Traction Rolling Stock”; 086temur086@gmail.com

Nikolay V. GREBENNIKOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Traction Rolling Stock”; grebennikovnv@mail.ru

Ivan V. BOLSHIH — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Traction Rolling Stock”; ivan.bolshih@yandex.ru

УДК 656.27

Логистический подход к стратегическому планированию эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий

К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, А. П. Бадецкий

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

Для цитирования: Ковалев К. Е., Новичихин А. В. Бадецкий А. П. Логистический подход к стратегическому планированию эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 90-102. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-90-102

Аннотация

Цель: Разработать логистический подход стратегического планирования эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий, основанный на усовершенствованной концепции SPACE-анализа. **Методы:** Применены методы теории управления, SPACE-анализа и нечеткого когнитивного моделирования. **Результаты:** Предложен новый подход стратегического планирования логистических процессов на малоинтенсивных железнодорожных линиях, основанный на использовании усовершенствованного SPACE-анализа, в части использования нечетких когнитивных карт для оценки значений параметров. Рассмотрены возможные сценарии функционирования малоинтенсивных линий на основе концепции SPACE-анализа. **Практическая значимость:** Предлагаемый логистический подход к стратегическому планированию логистических процессов работы малоинтенсивных линий позволит эффективно осуществлять распределение технических и технологических ресурсов с учетом требований потребителей транспортных услуг.

Ключевые слова: Малоинтенсивные железнодорожные линии, планирование работы, SPACE-анализ, организационно-технологические решения, нечеткие когнитивные карты.

Введение

Низкая эффективность функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий (далее — МИЛ) вызвана изменениями структуры транспортных потоков, снижением размеров перевозок, миграцией населения, изменением геополитических условий.

Общая протяженность МИЛ составляет около 18 % от общей протяженности железных дорог России [1], что обуславливает высокую значимость разработки мероприятий по повышению эффективности их функционирования.

Для повышения эффективности функционирования МИЛ необходима разработка логистических процессов, к которым относится доставка сырья или товаров от производителей к дистрибьютерам или конечным потребителям в случаях, когда автомобильные дороги не являются оптимальным вариантом доставки или требуется перевозка больших объемов груза. Также необходимо учитывать перемещение товаров между складами или распределительными центрами в международных логистических цепях поставок, обеспечивая транспортировку грузов между различными странами или регионами.

Для формирования перспективных логистических процессов требуется разработка стратегического плана деятельности МИЛ, позволяющего снизить неопределенности перевозочного процесса, исходя из имеющихся финансовых ресурсов, конкурентных условий, рисков и востребованности в современных условиях.

1. Анализ инструментария стратегического планирования

Для разработки стратегического плана МИЛ проведен анализ востребованных методов планирования (табл. 1), которые обеспечивают решения различных задач планирования. На основании проведенного анализа выбран наиболее подходящий метод для МИЛ в части инструментария и формирования набора критериев повышения эффективности функционирования работы участка.

На основании анализа рассмотренных инструментов стратегического планирования предлагается использование SPACE-анализа [2] для управления логистическими процессами на МИЛ, поскольку этот анализ позволяет учитывать влияние внутренних и внешних факторов, а также визуализировать полученные результаты применительно к железнодорожному транспорту. Представленные недостатки выбранного метода предлагается усовершенствовать в части определения весовых значений критериев с использованием когнитивного подхода и расширении перечня факторов, влияющих на функционирование МИЛ.

SPACE-анализ основан на использовании векторов средних значений факторов, к которым относятся финансовые ресурсы (FS) на организацию перевозочного процесса; конкурентная позиция железнодорожного транспорта с другими видами транспорта (CA); степень риска невыполнения плановых эксплуатационных показателей перевозочного процесса (ES); степень реализации транспортного потенциала МИЛ (IS) (рис. 1).

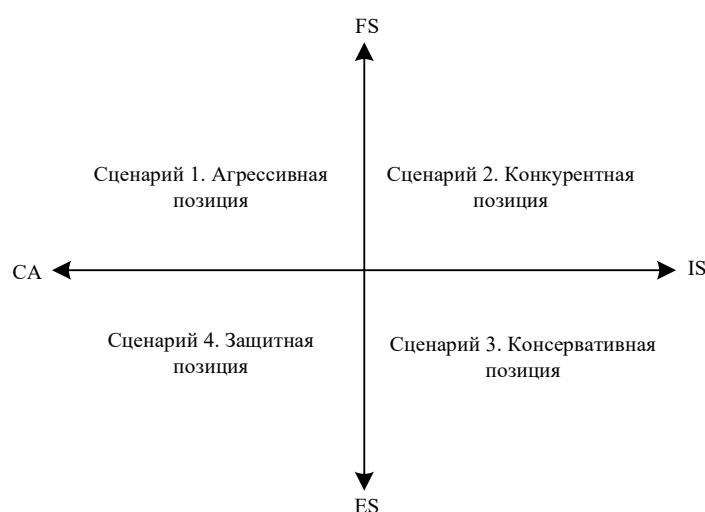


Рис. 1. Векторы критериев SPACE-анализа и возможные сценарии функционирования МИЛ

ТАБЛИЦА 1. Инструменты стратегического планирования

Название метода	Область применения	Достоинства	Недостатки	Возможные сферы применения на железнодорожном транспорте
Матрица BCG	Для анализа реализуемых продуктов	Позволяет оценить текущую прибыльность и потенциал роста продуктов. Помогает определить стратегические приоритеты и распределение ресурсов	Упрощенный подход, не учитывающий все аспекты стратегического анализа. Ориентирован на продукты, а не на саму организацию	Анализ реализуемых цифровых сервисов. Анализ показателей перевозочного процесса. Анализ экологичности перевозочного процесса
Анализ PESTEL	Анализ внешней конкурентной среды	Позволяет оценить влияние внешних факторов на организацию. Помогает выявить возможности и угрозы, которые могут повлиять на стратегические решения	Основывается на анализе внешних факторов, не учитывает внутренние характеристики организации. Не предоставляет конкретных рекомендаций по стратегическим действиям	Анализ конкуренции с другими видами транспорта. Анализ транспортного потенциала в международных транспортных коридорах
SWOT-анализ	Определение сильных и слабых сторон, а также возможности и угрозы внешней среды	Позволяет систематически оценить внутренние и внешние факторы организации. Помогает выработать стратегические альтернативы на основе анализа SWOT-матрицы	Зависит от представлений и оценок экспертов. Не предоставляет конкретных рекомендаций по выбору стратегических действий	Анализ результатов внедряемых инструментов цифровизации перевозочного процесса и развития инфраструктуры
SPACE-анализ	Используется для оценки позиции на рынке и определения стратегических действий	Учитывает факторы внутренней и внешней среды, а также проблемы и альтернативы. Оценка конкурентных преимуществ и уязвимых мест организации. Визуализация результатов в виде графической матрицы стратегических позиций организации и выделением ключевых аспектов для разработки стратегии	Упрощенная модель не учитывает все факторы, которые могут влиять на функционирование организации. Субъективность оценок экспертов при формировании факторов	Оценка стратегического плана деятельности железнодорожного участка

На основании выбранных факторов формируется шкала оценок для каждого вектора критериев, которая может быть числовой или качественной в зависимости от учитываемых условий на железнодорожном транспорте.

Выбор стратегии осуществляется путем анализа текущей позиции организации на SPACE-матрице и определения подходящей области, которая соответствует стратегическим целям и условиям функционирования МИЛ.

Возможны четыре альтернативные позиции функционирования МИЛ, на основании которых выбираются стратегии планирования:

Агрессивная позиция при наличии конкурентных преимуществ с другими видами транспорта — характерна для интенсивных железнодорожных линий со стабильными размерами перевозок.

Конкурентная позиция для железнодорожных направлений, где имеется борьба между видами транспорта и нестабильный грузопоток.

Консервативная позиция — характерна для железнодорожных линий со стабильным, медленно растущим грузопотоком.

Защитная позиция для МИЛ, на которых низкие размеры перевозок и ограниченность в финансовых ресурсах для развития.

2. SPACE-анализ функционирования МИЛ с использованием нечетких когнитивных карт

На финансовые ресурсы функционирования МИЛ (FS) влияют следующие факторы: ресурсы холдинга ОАО «РЖД»; частные инвесторы; федеральный бюджет; региональный бюджет; риски; инфраструктура; инвестиционная привлекательность; реализация стратегии развития; цифровизация; нормативная база.

На конкурентную позицию с другими видами транспорта (CA) влияют следующие факторы: доля на транспортном рынке; качество предоставляемых услуг; стадия жизненного цикла железнодорожной линии; предпочтения потребителей транспортных услуг.

На степень риска невыполнения плановых эксплуатационных показателей (ES) влияют факторы: реализуемые транспортные технологии; инфляция; изменения спроса на транспортные услуги; стоимость перевозки у конкурентных видов транспорта.

На степень реализации транспортного потенциала МИЛ (IS) влияют факторы: потенциальная прибыль; финансовая стабильность; использование ресурсов на функционирование МИЛ. При использовании SPACE-анализа критериям дается рейтинговая оценка и оценка каждого фактора.

В статье предлагается производить оценку факторов с использованием нечетких когнитивных карт [3–5], применяемых для моделирования и анализа сложных систем в виде графа, состоящего из концептов и связей между ними.

Нечеткие когнитивные карты позволяют использовать нечеткие значения для описания отношений между концепциями, что позволяет учитывать неопределенность и нечеткость в знаниях о системе [6–9]. Для примера приведена когнитивная карта финансового состояния МИЛ и расчет ее показателей. Выбрана трапециевидная функция принадлежности, используемая для задач, неопределенностей, которые характеризуются аналитическим выражением (1):

$$f_T(x; FS(t), CA(t), ES(t), IS(t)) = \begin{cases} 0, x \leq FS(t); \\ \frac{x - FS(t)}{CA(t) - FS(t)}; FS(t) \leq x \leq CA(t); \\ 1; CA(t) \leq x \leq ES(t); \\ \frac{IS(t) - x}{IS(t) - EA(t)}; ES(t) \leq x \leq IS(t); \\ 0; IS(t) \leq x, \end{cases} \quad (1)$$

где FS — финансовый ресурсы МИЛ на организацию перевозочного процесса;
 CA — конкурентная позиция МИЛ с другими видами транспорта на рассматриваемом направлении;
 ES — степень риска невыполнения плановых эксплуатационных показателей перевозочного процесса;
 IS — степень реализации транспортного потенциала МИЛ.
 FS, CA, ES, IS — числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением $FS(t) \leq CA(t) \leq ES(t) \leq IS(t)$.
 Эта функция имеет нормальное выпуклое нечеткое множество.

Пример для МИЛ на участке А — Б, обладающей следующими исходными параметрами (табл. 2), определения величины фактора (FS) на основе шкалы оценок с использованием нечеткой когнитивной карты приведен на (рис. 2).

Для анализа устойчивости когнитивная карта «Финансовые ресурсы» составлена матрица смежности (2) и определены собственные значения матрицы A :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0,1 & 0,3 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,4 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,4 & 0,8 \\ 0 & 0 & -0,7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0,6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

ТАБЛИЦА 2. Параметры функционирования МИЛ на участке А — Б

Параметры	Значения
Длина, км	148
Система СЦБ	полуавтоматическая блокировка
Грузовых поездов	0,2
Пассажирских поездов	0,09
Пригородных поездов	1,8
Грузонапряженность, млн ткм брутто/км	0,3
Количество грузовых вагонов, ед/сут	8,7
Количество пассажиров, чел/сут	80,5
Количество рабочих по службе ДИ, чел.	55
Количество рабочих по службе Д, чел.	52
Количество рабочих по службе Т, чел.	32,3
Расходы по службе ДИ, млн руб/год	34,8
Расходы по службе Д, млн руб/год	22,3
Расходы по службе Т, млн руб/год	14,1
Выручка за грузовые перевозки, млн руб/год	106
Выручка за пассажирские перевозки, млн руб/год	1,2
Выручка за пригородные перевозки, млн руб/год	7,7
Финансовый результат млн руб/год	-4

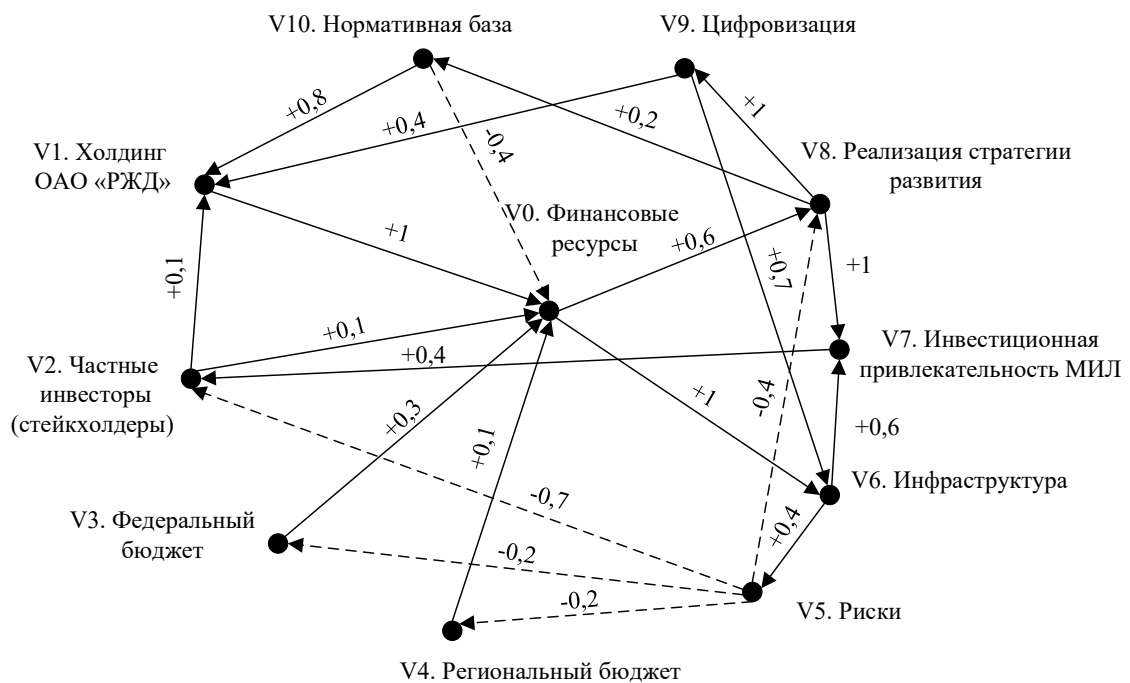


Рис. 2. Когнитивная карта (FS) «Финансовые ресурсы»

Собственные векторы матрицы A :

$$v = \begin{pmatrix} 0 \\ -0,3 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \text{ собственное значение } \lambda_1 = 0. \quad (3)$$

Определен набор показателей [3–5] нечеткой когнитивной карты «Финансовые ресурсы» (табл. 3). Перечисленный комплекс дополнен параметром значения фактора FS, который определяется по формуле:

$$FS = \frac{P_i^{\leftarrow}}{n}. \quad (4)$$

где n — количество концептов когнитивной карты;

P_i^{\leftarrow} — степень влияния системы на каждый концепт.

$$P_i^{\leftarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij}. \quad (5)$$

$\sum_{j=1}^n d_{ij}$ — сумма по строке в матрице смежности нечеткой когнитивной карты.

Аналогично определены значения факторов IS , ES , CA . После определения значений факторов с использованием нечетких когнитивных карт выполнено графическое отображение стратегической позиции функционирования МИЛ (рис. 3).

На основе SPACE-анализа функционирования МИЛ с использованием нечетких когнитивных карт определена защитная позиция, которая характерна для направлений с низкими размерами грузопотока и пассажиропотока, в которых не хватает конкурентоспособных транспортных предложений и финансовых ресурсов на развитие и модернизацию. В данном случае рекомендуются следующие сценарии функционирования МИЛ: консервирование или демонтаж линии; прекращение перевозок низкодоходных грузов; агрессивное сокращение издержек; сокращение излишних производственных мощностей; отказ от инвестиций.

ТАБЛИЦА 3. Показатели когнитивной карты «Финансовые ресурсы»

Названия концептов	Положительное влияние системы на концепты	Отрицательное влияние системы на концепты	Положительное влияние концепта на систему	Отрицательное влияние концепта на систему	Степень влияния системы на концепт	Степень влияния концепта на систему
V0. Финансовые ресурсы	0,62	0,38	0,73	0,27	0,31	0,29
V1. Холдинг ОАО «РЖД»	0,65	0,35	0,71	0,29	0,37	0,19
V2. Частные инвесторы (стейкхолдеры)	0,68	0,32	0,25	0,75	0,04	-0,11
V3. Федеральный бюджет	0,65	0,35	0,77	0,23	0,11	-0,06
V4. Региональный бюджет	0,65	0,35	0,77	0,23	0,04	-0,06
V5. Риски	0,80	0,20	0,77	0,23	-0,28	0,19
V6. Инфраструктура	0,65	0,35	0,75	0,25	0,00	0,36
V7. Инвестиционная привлекательность МИЛ	0,76	0,24	0,60	0,40	0,06	0,31
V8. Реализация стратегии развития	0,71	0,29	0,59	0,41	0,40	0,17
V9. Цифровизация	0,68	0,32	0,62	0,38	0,18	0,24
V10. Нормативная база	0,35	0,65	0,62	0,38	0,35	0,05
Значение фактора FS						0,14

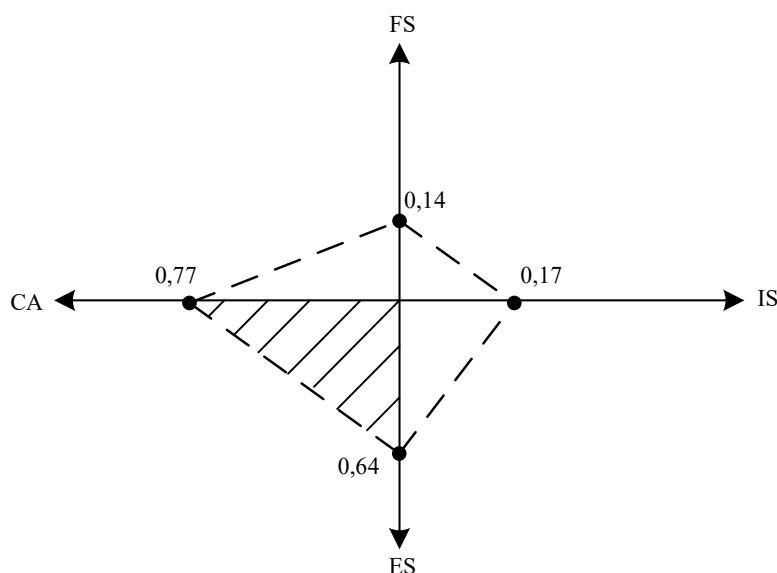


Рис. 3. Стратегическая позиция функционирования МИЛ

Недостатком SPACE-анализа является малое количество учитываемых факторов. Существующая концепция SPACE-анализа не учитывает факторы времени принятия решения о перевозке, тарифную стоимость, количество клиентов, использующих МИЛ, способ принятия решения о перевозке и виды предоставляемых транспортных услуг. В связи этим предлагается усовершенствовать SPACE-анализ в части набора векторов и классификации их по зонам получаемых результатов для снижения неопределенности стратегического планирования функционирования МИЛ.

3. Совершенствование SPACE-анализа для детализации структуры функционирования МИЛ

Усовершенствование SPACE-анализа состоит в расширении количества, зонировании и оценке параметров векторов для формирования сценариев функционирования с позиции клиента железнодорожного транспорта.

Предложены следующие векторы SPACE-анализа для грузовых перевозок: вид перевозки; тарифная стоимость перевозки; количество клиентов; время принятия решения о перевозке; вид предоставляемой транспортной услуги (рис. 4).

Каждый из векторов поделен на три зоны в зависимости от тенденций потребителей транспортных услуг. Зона 2 сформирована исходя из следующих положений:

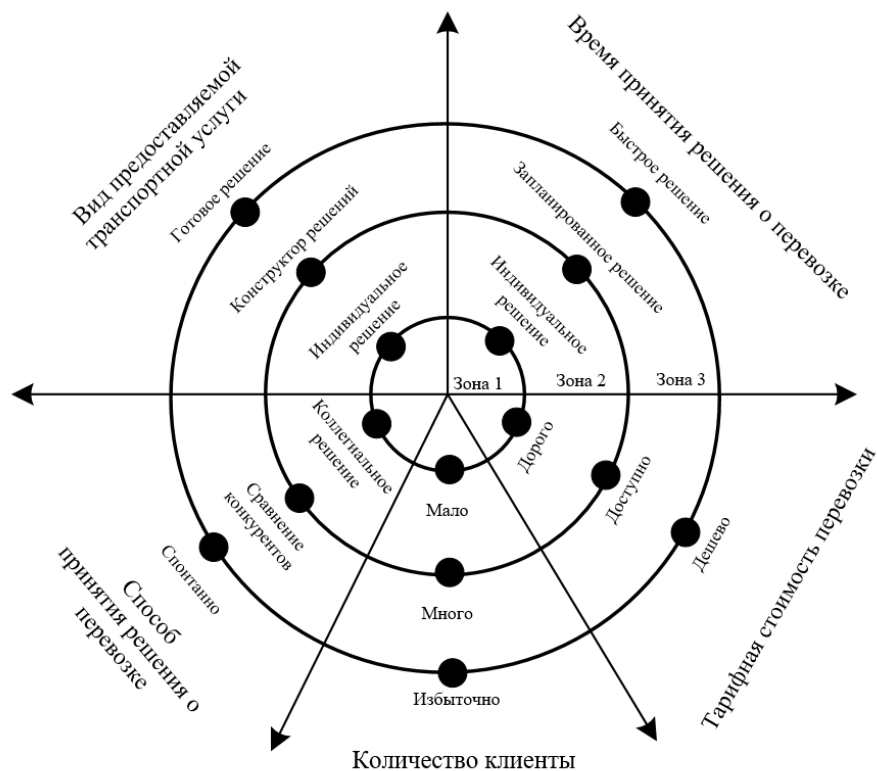


Рис. 4. Усовершенствованная концепция SPACE-анализа

Клиент принимает запланированное решение о перевозке.

Клиент проводит сравнительный анализ конкурентов, предоставляющих транспортные услуги с другими видами транспорта.

Клиент знает рыночную конъюнктуру и предварительную стоимость перевозки.

Стоимость перевозки удовлетворяет клиента.

Клиенту требуется получить дополнительные решения, по согласованию с ОАО «РЖД», дающие ему определенную выгоду.

Положения для формирования зон 1 и 3 приведены на рис. 4 и отображают возможные варианты принимаемых решений.

На основании усовершенствованной концепция SPACE-анализа функционирования МИЛ формализована оценка для грузовых перевозок (рис. 5). Основной проблемой функционирования МИЛ является малое количество клиентов, поэтому целесообразно осуществлять планирование деятельности МИЛ в зоне 1.

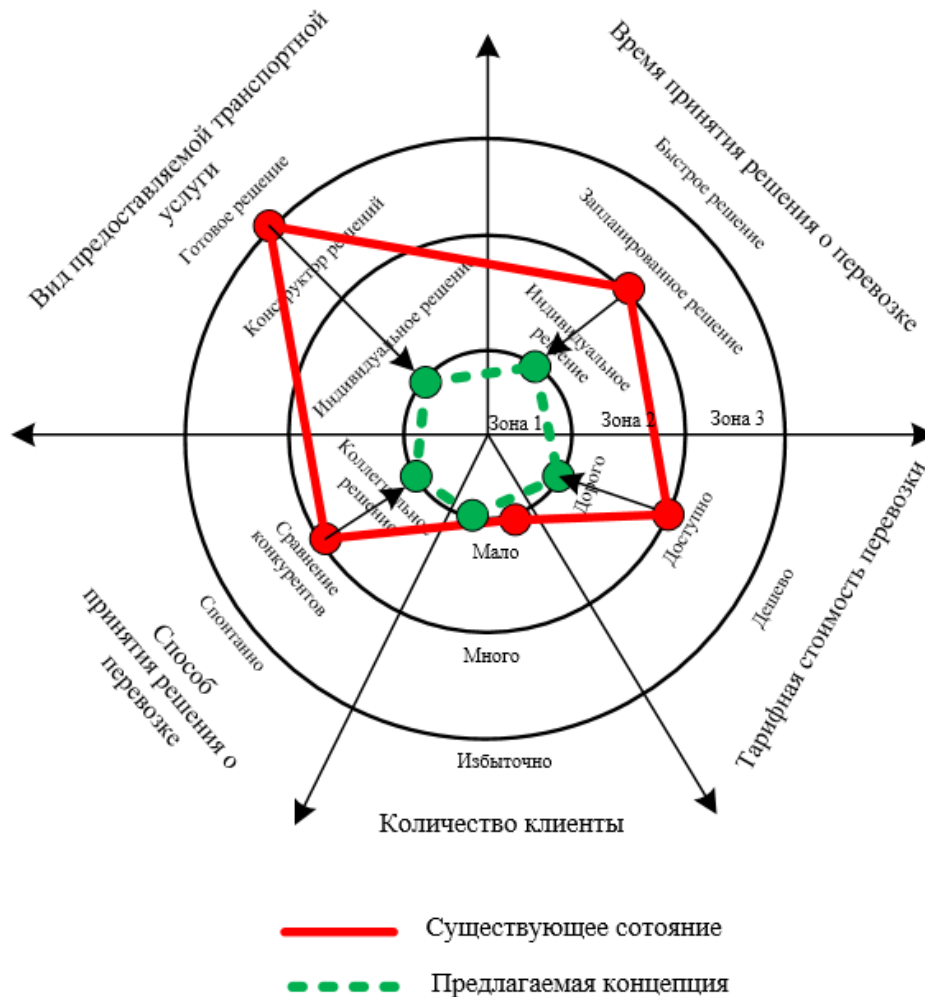


Рис. 5. Усовершенствованная концепция SPACE-анализа функционирования МИЛ для грузовых перевозок

Для этого необходимо разработать процедуру, позволяющую изменить время принятия решения о перевозке с запланированного к индивидуальному решению, что позволит формировать более выгодные тарифные предложения. При этом способ принятия решения о перевозке будет иметь вид коллегиального решения, а вид предоставляемой транспортной услуги будет реализован в виде конструктора индивидуальных решений, реализуемых на конкретной МИЛ.

Заключение

В статье предложен новый логистический подход к стратегическому планированию эксплуатации МИЛ, основанный на использовании усовершенствованной концепции SPACE-анализа. Проведен анализ современных инструментов стратегического планирования, и выбран SPACE-анализ для планирования работы МИЛ по причине возможности формирования различных сценариев функционирования.

На основе SPACE-анализа и нечетких когнитивных карт определена защитная стратегия функционирования МИЛ для железнодорожных направлений с низкими размерами грузопотока и пассажиропотока, на которых не хватает конкурентоспособных транспортных предложений и финансовых ресурсов на развитие и модернизацию. На основе усовершенствованной концепции SPACE-анализа предложен подход к стратегическому планированию эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий, который учитывает основную проблему их функционирования — малое количество клиентов.

Для положительного финансового результата функционирования МИЛ необходима разработка механизмов по изменению способа принимаемого решения о перевозке и смещении его в зону коллегиального (долгосрочного), индивидуальных решений с высокой добавочной стоимостью конечного продукта в виде конструктора транспортных услуг на индивидуальную МИЛ.

Библиографический список

1. Вакуленко С. П. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий: монография / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова; под ред. С. П. Вакуленко. — М.: ВИНТИ РАН, 2018. — 218 с.
2. Дженстер П. Анализ сильных и слабых сторон компании: определение стратегических возможностей / П. Дженстер. — М.: Вильямс, 2003. — 368 с.
3. Силов В. Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке / В. Б. Силов. — М.: ИНПРО-РЕС, 1995. — 228 с.
4. Кульба В. В. Сценарный анализ динамики поведения социально-экономических систем / В. В. Кульба, Д. А. Кононов, С. С. Ковалевский и др. — М.: ИПУ РАН, 2002. — 122 с.
5. Горелова Г. В. О когнитивном моделировании развития ситуаций в регионе в условиях быстрых изменения среды и противодействия / Г. В. Горелова, Э. В. Мельник // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2011. — № 3(116). — С. 65–78.

6. Ковалев К. Е. Разработка механизмов повышения эффективности функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, О. А. Медведь // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 2. — С. 150–161. — DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-150-161.

7. Ковалев К. Е. Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодеятельных линиях / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 2. — С. 252–267. — DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267.

8. Kovalev K. Interaction of Intensive and Low-Density Lines: Management Approach and Models / K. Kovalev, A. Novichikhin // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2022. — Vol. 402. — Pp. 701–709. — DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_76.

9. Kovalev K. E. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling — 2021 (ИТММ-2021). Journal of Physics: Conference Series 2131. — 2021. — P. 032008. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032008.

Дата поступления: 15.09.2023

Решение о публикации: 10.11.2023

Контактная информация:

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич — канд. техн. наук; kovalev@pgups.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, доц.; novichihin@bk.ru

БАДЕЦКИЙ Александр Петрович — канд. техн. наук; badetskii@pgups.ru

A Logistics Approach to Strategic Planning for the Operation of Low-Intensity Railway lines

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin, A. P. Badetsky

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

For citation: Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Badetsky A. P. A Logistics Approach to Strategic Planning for the Operation of Low-Intensity Railway lines. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 90-102. (In Russian) DOI:10.20295/2223-9987-2023-4-90-102

Summary

Purpose: To develop a logistics approach to strategic planning for the operation of low-intensity railway lines, based on the improved concept of SPACE analysis. **Methods:** Methods of control theory, SPACE analysis and fuzzy cognitive modeling have been used. **Results:** A new approach to strategic planning of logistics processes on low-intensity railway lines is proposed based on the use of improved SPACE analysis, in terms of the use of fuzzy cognitive maps to estimate parameter values. Possible scenarios for the operation of low-intensity lines based on the concept of SPACE analysis are considered. **Practical significance:** The proposed logistics approach to the strategic planning of logistics processes for the operation of low-intensity lines will allow for the effective distribution of technical and technological resources, taking into account the requirements of consumers of transport services.

Keywords: Low-intensity railway lines, operation planning, SPACE analysis, organizational and technological solutions, fuzzy cognitive maps.

References

1. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Yu. et al.; ed. S. P. Vakulenko. *Effektivnost' ekspluatatsii i obsluzhivaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy: monografiya* [Efficiency of operation and maintenance of low-intensity railway lines: monograph; Russian University of Transport (RUT (MIIT)]. Moscow: VINITI RAS Publ., 2018, 218 p. (In Russian)
2. Dzhenster P. *Analiz sil'nykh i slabykh storon kompanii: opredelenie strategicheskikh vozmozhnostey* [Analysis of the company's strengths and weaknesses: identifying strategic opportunities]. Moscow: Williams Publ., 2003, 368 p. (In Russian)
3. Silov V. B. *Prinyatie strategicheskikh resheniy v nechetkoy obstanovke* [Making strategic decisions in uncertain environments]. Moscow: INPRO-RES Publ., 1995, 228 p. (In Russian)
4. Kulba V. V., Kononov D. A., Kovalevsky S. S. et al. *Stsenarnyy analiz dinamiki povedeniya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem* [Scenario analysis of the dynamics of behavior of socio-economic systems]. Moscow: IPU RAS Publ., 2002, 122 p. (In Russian)
5. Gorelova G. V., Melnik E. V. On cognitive modeling of the development of situations in the region in conditions of rapid environmental changes and counteraction. *News of the Southern Federal University. Technical science*, 2011, Iss. 3 (116), pp. 65–78.
6. Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Medved O. A. O kognitivnom modelirovanii razvitiya situatsiy v regione v usloviyakh bystrykh izmeneniya sredy i protivodeystviya [Development of mechanisms for increasing the efficiency of functioning of low-intensity railway lines]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2022, vol. 8, Iss. 2, pp. 150–161. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-150-161. (In Russian)
7. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Kompleksnyy sinergetiko-indikatornyy podkhod k upravleniyu protsessami perevozok na intensivnykh i malodeyatel'nykh liniyakh [Integrated synergetic-indicator approach to managing transportation processes on intensive and low-volume lines]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2021, vol. 7, Iss. 2, pp. 252–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267. (In Russian)
8. Kovalev K., Novichikhin A. Interaction of Intensive and Low-Density Lines: Management Approach and Models. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, vol. 402, pp. 701–709. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_76.
9. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines. *Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling — 2021 (IITMM-2021)*. *Journal of Physics: Conference Series* 2131, 2021, p. 032008. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032008.

Received: September 15, 2023

Accepted: November 10, 2023

Author's information:

Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering; kovalev@pgups.ru

Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novichihin@bk.ru

Alexander P. BADETSKY — PhD in Engineering; badetskii@pgups.ru

УДК 338.47

Синергетический подход к преодолению ограничений инфраструктуры транспортно-логистического комплекса

К. С. Кривошлыков

Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону. пл. им. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2

Для цитирования: Кривошлыков К. С. Синергетический подход к преодолению ограничений инфраструктуры транспортно-логистического комплекса // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 103-111. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-103-111

Аннотация

Цель: Ограничения инфраструктуры транспортно-логистического комплекса на сегодняшний день являются острой проблемой их работы, что отрицательно влияет на производительность труда и требует научных разработок. В работе предлагается один из путей решения проблемы, который может стать фундаментальным толчком для выстраивания конечного решения проблемы ограничения инфраструктуры транспортно-логистического комплекса, через внедрение и других научно-прикладных дисциплин, таких как математика, моделирование и т. д. Рассмотреть вопрос о применении синергетического подхода в контексте синергетики как междисциплинарного научного метода в решении проблемы ограничений инфраструктуры транспортно-логистического комплекса. Показать необходимость и актуальность применения данного метода при решении проблемы. Раскрыть инструменты, факторы и методы применения их в проблеме ограничений инфраструктуры транспортно-логистического комплекса. **Методы:** Раскрыты основные принципы и факторы синергетики в вопросе ограничений системы, а также приведены основные инструменты синергетического подхода в вопросе ограничений инфраструктуры транспортно-логистического комплекса. **Результаты:** Указаны необходимые инструменты преодоления ограничений инфраструктуры транспортно-логистического комплекса, а также показаны факторы, влияющие на преткновения путей решения проблемы ограничений инфраструктуры. Сформирован вывод о том, что данный концептуальный подход будет являться фундаментальным камнем в нахождении пути решения сформированной проблемы через другие научно-прикладные дисциплины, такие как моделирование, математика и т. д. **Практическая значимость:** Показана необходимость применения синергетического подхода, его методов в решении проблемы ограничений инфраструктуры транспортно-логистического комплекса. Их использование позволит повысить определение путей решения проблемы и более точно сформировать взгляд на конкретное логистическое звено, которое должно поддаваться корректировке в системе ограничений. Работа может быть рекомендована к практическому использованию.

Ключевые слова: Транспорт, логистика, комплекс, инфраструктура, ограничения, преодоление, синергетика.

Агрессивный обоюдно санкционированный режим современных международных экономических отношений, необходимость их геополитических трансформаций требуют реформирования комплекса транспортно-логистических потоков. Данная актуализация сдерживается в своей реализации объективно наличествующими, субъективно порожденными, накопившимися инфраструктурными ограничениями. Поэтому трансформационные процессы неразрывно связаны с их

преодолениями, в том числе в контексте новых дорожных карт, а для этого необходим концептуальный подход, позволяющий обеспечить практическую реализацию методологии, оперативным решением придать системность.

Ограничения транспортно-логистического комплекса вызывают побочные отрицательные эффекты его функционирования: проблемы реализации контрактных отношений, рост явных издержек и прогрессирующие упущенные выгоды (неявные издержки). Особенно это характерно для мультимодальных перевозок. Накопившиеся и возникающие проблемы ограничений требуют необходимых управленческих, организационных и технико-технологических трансформаций транспортно-логистических комплексов в контексте тренда преобразований [1].

Методологический подход к решению проблемы ограничений инфраструктуры позволяет от необоснованных оперативных решений перейти к системности их преодоления.

Синергетика — проверенный научный подход решения системных проблем. Она обеспечена инструментарием, универсальностью которого подтверждена практикой использования.

Синергетика в данном вопросе, на наш взгляд, — ведущий инструментарий, так как позволяет комплексно преодолевать ограничения.

Изучая данный вопрос, необходимо рассмотреть зарождение синергетики как научного направления для полного раскрытия понятия «ограничения», а также понять, каким образом данное направление может повлиять на раскрытие и решение в вопросе инфраструктурных ограничений транспортно-логистического комплекса.

Зарождение синергетики как научного междисциплинарного направления получило свое предназначение изначально в физике и химии, после распространившись в других научных дисциплинах, что положительно сказывалось на экономике и жизнедеятельности человека [2].

Синергетический междисциплинарный научный подход берет основополагающий принцип поведения элемента системы во взаимодействии с другими участниками процесса как полную взаимозависимость между участниками системы. При этом необходим полный спектр изучения каждого элемента системы, при поведении его в системе и отдельно от участников, а также эмерджентные свойства участника, которые рассматриваются только при рассмотрении элемента в системе, а не отдельно от общей концепции. Так, синергетика рассматривает понятие «ограничения», которые оказывают влияние на поведение системы в целом и ее отдельных участников.

Обозначим, что при решении проблемы инфраструктурных ограничений границы не должны четко устанавливаться, данный аспект должен влиять на простор принятия решения [3].

Синергетический междисциплинарный подход оказывает непосредственное понимание понятия «ограничения» в комплексе системы.

Рассмотрение комплекса с проблемой ограничений в целом, через призму концептуального подхода, дает понять систему в целом, ее структуру, взаимосвязи, а не изолированные компоненты. Данный подход будет влиять на понимание ограничений комплекса, поскольку они будут являться непосредственной его частью и поведением элементов в нем.

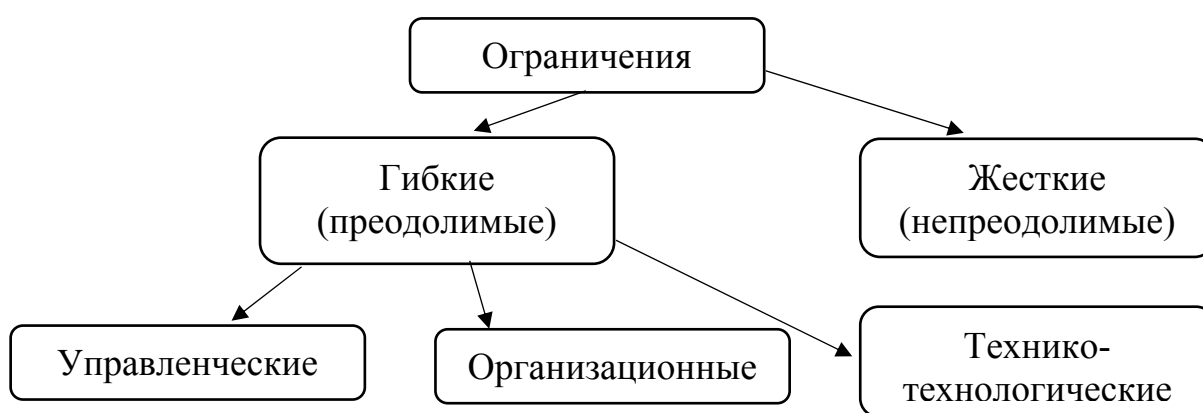
Отметим, что в синергетическом подходе понятие «ограничения» рассматривается не как внешний риск, который можно обойти или же нейтрализовать, а как часть системы, которая формирует ее интегральную часть и работоспособность.

Эмерджентные свойства синергетики в вопросе ограничений дают понять, какие взаимодействия и с какими конкретно элементами существуют в системе, для осмысления ее среды.

Большим плюсом данного подхода будет тот факт, что свойства элементов и в целом системы при синергетическом анализе будут пониматься как положительные и отрицательные в вопросе ограничений и взаимодействии элементов системы.

Синергетический подход влияет и дает определение границам системы и границам взаимосвязей ее компонентов. Также определяются границы взаимосвязи с ограничениями системы. Границы системы могут рассматриваться как размытые и изменчивые, что может положительно сказываться на решении проблемы инфраструктурных ограничений, а также в целом на понимание границ системы (комплекса).

Синергетический подход требует классификации ограничений системы (рисунок).



Инфраструктурные ограничения транспортно-логистического комплекса

Синергетический подход объясняет ограничения системы внутренними и внешними факторами ее функционирования и развития. Сами же ограничения классифицируются в системе как жесткие (непреодолимые) и гибкие (преодолимые).

Непреодолимые ограничения транспортно-логистических образований, действующих и прогнозируемых потоков, — относительно в условиях имеющихся и используемых технологий и технического обеспечения логистики. Также они обусловлены территориальными и климатическими условиями, отношениями собственности, а следовательно, законодательными порядками, сложившимися системой размещения производственных сил и потребителей промежуточных и конечных товаров.

Кроме того, к непреодолимым ограничениям транспортно-логистического субъекта хозяйствования можно отнести фиксированные действующие и прогнозируемые потоки [4].

Перечисленные факторы ограничений нами рассматриваются как данные, требующие коренных преобразований, изменяющих систему отношений производства, обмена, распределения и потребления, т. е. как внешне непреодолимые.

Преодолимые ограничения, т. е. решаемые с точки зрения необходимых стратегических и технических преобразований, — преодоления упущенных возможностей, оппортунистического поведения менеджеров. Сегодня актуализируется и фактор национальных интересов, реализуемый государственным регулированием в направлении выбранного варианта развития [5].

Отметим: ограничения при взаимодействии с комплексом могут изменяться как в количественном, так и в качественном аспекте, что может порождать переход от преодолимых ограничений к управляемым и неуправляемым рискам. Поэтому развитие транспортно-логистической инфраструктуры в преодолении ограничений предполагает переход от экстенсивного развития к интенсивному и соответствующему инвестированию, способствующему повышению производительности факторов производства, а не их росту, безопасности и рациональности логистики.

Синергетические ограничения могут иметь и количественную оценку как жесткого, так и гибкого характера. Количественные ограничения в большей степени представлены преодолимыми, так как их можно реально оценить, в отличие, например, от институциональных.

Таким образом, предметом результативного воздействия должны стать гибкие ограничения транспортно-логистического комплекса, которые мы классифицировали как управленческие, организационные и технико-технологические. Свойственно использование синергетического инструментария.

Синергетика предоставляет ценные инструменты для анализа и оптимизации транспортно-логистических комплексов. Синергетический подход в данном вопросе будет означать взаимодействие и взаимодополняемость различных компонентов логистического комплекса с целью объединения и координации различных элементов системы и взаимодействия процессов через методологический подход и получение конечного результата.

Так, концепция синергетики и ее методы будут основываться на принципах системного мышления и целостности системы (с ее размытыми границами в том числе), цель которой будет являться эффективная работа транспортно-логистического комплекса.

Основными инструментами применения синергетического подхода в преодолении ограничений являются:

1. Аттракторы и бифуркации

В системе ограничений транспортно-логистического комплекса они могут выступать оптимальными точками складирования или формированием частот обновления запасов. Другими словами, аттракторы и бифуркации применимы в анализе ограничений логистических систем.

Аттракторы представляют собой устойчивые состояния функционирующей системы.

Изучение аттракторов дает возможность лучше понимать структуру системы и усиленно в организации выбирать оптимальные решения для преодоления ограничений.

Бифуркации — это изменения структуры системы при изменении ее параметров.

В транспортно-логистическом комплексе они могут быть вызваны изменениями в спросе, тарифах транспортировки и другими факторами. Анализ бифуркаций дает возможность прогнозировать изменения системы и разрабатывать адаптивные стратегии управления в новых условиях инфраструктуры в момент ее использования. Это способствует минимизации ограничений.

Изменения в функционировании транспортно-логистического комплекса, вызванные санкционным режимом, требуют преодоления управленческих и организационных ограничений, тем более они относятся к гибкой (преодолимой) типологии сдерживания транспортно-логистической инфраструктуры.

2. Флуктуации и самоорганизация

Флуктуации свидетельствуют о незначительных изменениях в системе, которые могут накапливаться и вызывать качественные изменения системы в инфраструктуре.

Они — это не порождение экономических геополитических рисков, а приобретенные за время обозримого функционирования, детерминированные внешней и внутренней средой транспортно-логистического комплекса. Их типологизация может определяться в том числе организационно-менеджерскими ограничениями, технико-технологическими рисками производства.

При этом инфраструктурные ограничения могут быть вызваны непредсказуемыми изменениями в спросе и другими внешними факторами, влияющими на

логистическую инфраструктуру. Мониторинг и анализ флуктуаций создает возможности усилить гибкость системы, что повышает возможности ее адаптивности к ограничениям.

Самоорганизация способна организовать компоненты системы для достижения оптимальных состояний.

Другими словами, данный инструмент синергетики можно назвать преодолением ограничений, получивших форму флуктуации.

В вопросе решения ограниченности логистической инфраструктуры она может проявляться в оптимизации маршрутов доставки или товарном распределении. Использование принципов самоорганизации дает возможность повысить эффективность транспортно-логистического комплекса параллельно с преодолением управленческих и организационных ограничений.

3. Комплексные системы и эмерджентность

Комплексные системы дают возможность взаимодействия множества компонентов и приводят к эмерджентным свойствам, которые необходимо объяснять с точки зрения других менеджерских решений, изучая отдельные компоненты транспортно-логистической инфраструктуры.

В вопросе оптимизации логистической инфраструктуры они могут быть объединениями нескольких складов в цепь поставок. Реализацию комплексности дает возможность предсказывать их поведение в системе наличествующих ограничений.

Под эмерджентностью мы понимаем свойства транспортно-логистического комплекса, возникающие в результате взаимодействия компонентов, обусловленных средой инфраструктурных ограничений. Это могут быть неожиданные задержки в доставке или изменения в спросе, которые сложно предсказать. Анализ эмерджентности в данном вопросе дает возможность создавать устойчивые логистические связи, которые будут способствовать адаптации к неожиданным ситуациям системы с ограничениями.

Синергетика, ее инструментарий, активно и эффективно используемый менеджером транспортно-логистического комплекса, — концептуальный научный механизм решения и преодоления гибких ограничений, его эффективного производства.

Синергетический подход как сложный комплексный инструментарий решения проблемы ограничений позволяет управлять инфраструктурой, объединяя различные стратегии, решения и, таким образом, всех участников перевозочного процесса [6].

Гибкость, динамическая адаптивность к изменениям в ограниченных условиях системы и требованиям со стороны других рисков будут являться способностью

синергетического подхода в решении проблем ограничений через использование ресурсов и их кооперирование в транспортно-логистическом комплексе.

Синергетический подход также способствует гибкости логистической системы, ее динамической адаптивности к изменениям в условиях и требованиях.

В период быстро меняющейся геополитической и экономической среды данный вопрос ограничений инфраструктуры транспортно-логистических комплексов как никогда актуален в решении проблем, которые накапливались долгое время и существенно возросли сегодня.

Рассмотрев данный вопрос, был сделан вывод, что применение данного метода будет способствовать в решении проблемы ограничений инфраструктуры транспортно-логистических комплексов.

Библиографический список

1. Воскресенский И. В. Принципы синергетики в построении логистико-ориентированного транспортно-экспедиционного обеспечения развивающихся экономических районов / И. В. Воскресенский, Т. П. Воскресенская // Проблемы развития транспортной логистики. — 2011. — № 1. — С. 28–36.

2. Ботнарюк М. В. Формирование партнерских отношений компаний морского транспортного узла на основе маркетинга взаимодействий: проблемы и перспективы / М. В. Ботнарюк // Общество: политика, экономика, право. — 2012. — № 2. — С. 104–109.

3. Ермошин Н. А. Адаптивный подход к определению мероприятий развития транспортно-логистической инфраструктуры систем материально-технического обеспечения / Н. А. Ермошин // Национальные приоритеты России. Сер. Наука и военная безопасность. — 2019. — № 2. — С. 82–87.

4. Аглиуллин И. А. Синергетическое представление социальных систем: концепция моделирования и управления / И. А. Аглиуллин // Анализ систем на пороге XXI века: теория и практика: материалы междунар. конф. В 4 т. — М.: Интеллект, 1996. — Т. 2. — С. 16–27.

5. Мамаев Э. А. Проблемы и перспективы развития комплексных транспортных услуг на железнодорожном транспорте / Э. А. Мамаев // Транспорт и логистика: актуальные проблемы стратегического развития и оперативного управления. — Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020. — С. 188–192.

6. Вишневская Ю. А. Применение синергетики для организации сложных систем в технических науках / Ю. А. Вишневская // Просвещение и познание. — М., 2022. — С. 11–18.

Дата поступления: 15.09.2023

Решение о публикации: 10.11.2023

Контактная информация:

Кривошлыков Константин Сергеевич — аспирант; konstantin200998@mail.ru

A Synergistic Approach to Overcoming the Limitations of the Transport and Logistics Complex Infrastructure

K. S. Krivoshlykov

Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Krivoshlykov K. S. A Synergistic Approach to Overcoming the Limitations of the Transport and Logistics Complex Infrastructure. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 103-111. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-103-111

Summary

Purpose: Limitations of the infrastructure of the transport and logistics complex today are an acute problem in their work, which negatively affects labor productivity and requires scientific development. The work proposes one of the ways to solve the problem, which can become a fundamental impetus for building the final solution to the problem of infrastructure limitations of the transport and logistics complex, through the introduction of other scientific and applied disciplines, such as mathematics, modeling, etc. To consider the issue of applying a synergetic approach, in the context of synergetics as an interdisciplinary scientific method in solving the problem of infrastructure limitations of the transport and logistics complex. To show the necessity and relevance of using this method in solving the problem. To reveal the tools, factors and methods of their application in the problem of limitations of the infrastructure of the transport and logistics complex.

Methods: The basic principles and factors of synergy in the issue of system limitations are revealed, and the main tools of the synergetic approach in the issue of infrastructure limitations of the transport and logistics complex are presented. **Results:** The necessary tools for overcoming the limitations of the infrastructure of the transport and logistics complex are indicated, and the factors influencing the stumbling blocks to solving the problem of infrastructure limitations are also shown. The conclusion is drawn that this conceptual approach will be the fundamental stone in finding a way to solve the formed problem through other scientific and applied disciplines, such as modeling, mathematics, etc. **Practical significance:** The necessity of using a synergetic approach and its methods in solving the problem of infrastructure limitations of the transport and logistics complex is shown. Their use will improve the identification of ways to solve the problem and more accurately form a view of a specific logistics link, which should be adjustable in the system of restrictions. The work can be recommended for practical use.

Keywords: Transport, logistics, complex, infrastructure, limitations, overcoming, synergetics.

References

1. Voskresenskiy I. V., Voskresenskaya T. P. Printsipy sinergetiki v postroenii logistiko-orienirovannogo transportno-ekspeditsionnogo obespecheniya razvivayushchikhsya ekonomicheskikh rayonov [Principles of synergetics in the construction of logistics-oriented transport and forwarding support for developing economic regions]. *Problemy razvitiya transportnoy logistiki* [Problems of development of transport logistics]. 2011, Iss. 1, pp. 28–36. (In Russian)
2. Botnaryuk M. V. Formirovanie partnerskikh otnosheniy kompaniy morskogo transportnogo uzla na osnove marketinga vzaimodeystviy: problemy i perspektivy [Formation of partnerships of maritime transport hub companies based on marketing interactions: problems and prospects]. *Obshchestvo: politika, ekonomika, parvo* [Society: politics, economics, law]. 2012, Iss. 2, pp. 104–109. (In Russian)

3. Ermoshin N. A. Adaptivnyy podkhod k opredeleniyu meropriyatiy razvitiya transportno-logisticheskoy infrastruktury sistem material'no-tekhnicheskogo obespecheniya [Adaptive approach to determining measures for the development of transport and logistics infrastructure of material and technical support systems]. *Natsional'nye priority Rossii. Ser. Nauka i voennaya bezopasnost'* [National priorities of Russia. Ser. Science and military security]. 2019, Iss. 2, pp. 82–87. (In Russian)

4. Agliullin I. A. Sinergeticheskoe predstavlenie sotsial'nykh sistem: kontseptsiya modelirovaniya i upravleniya [Synergetic representation of social systems: the concept of modeling and management]. *Analiz sistem na poroge XXI veka: teoriya i praktika: materialy mezhdunar. konf. V 4 t.* [Analysis of systems on the threshold of the 21st century: theory and practice: materials of the international. conf. In 4 volumes]. Moscow: Intellekt Publ., 1996, vol. 2, pp. 16–27. (In Russian)

5. Mamaev E. A. Problemy i perspektivy razvitiya kompleksnykh transportnykh uslug na zheleznodorozhnom transporte [Problems and prospects for the development of complex transport services in railway transport]. *Transport i logistika: aktual'nye problemy strategicheskogo razvitiya i operativnogo upravleniya* [Transport and logistics: current problems of strategic development and operational management]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2020, pp. 188–192. (In Russian)

6. Vishnevskaya Yu. A. Primenenie sinergetiki dlya organizatsii slozhnykh sistem v tekhnicheskikh naukakh [Application of synergetics for organizing complex systems in technical sciences]. *Prosveshchenie i poznanie* [Education and knowledge]. Moscow, 2022, pp. 11–18. (In Russian)

Received: September 15, 2023

Accepted: November 10, 2023

Author's information:

Konstantin S. KRIVOSHLYKOV — Postgraduate Student; konstantin200998@mail.ru

УДК 629.4.014

Проблематика оценки ресурса и усталостной прочности при постановке на производство инновационного подвижного состава

А. А. Комайданов¹, А. Н. Смирнов², М. В. Зверев¹

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

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

Для цитирования: Комайданов А. А., Смирнов А. Н., Зверев М. В. Проблематика оценки ресурса и усталостной прочности при постановке на производство инновационного подвижного состава // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 112-123. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-112-123

Аннотация

Цель: Описана следующая проблема, возникающая при проведении ресурсных испытаний вагонов: в требованиях п. 3.17 Положения о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении (СТОИР) при назначении срока службы вагона, отличного от указанного в документе, необходимо проведение ресурсных испытаний вагона *до разрушения*. Но поскольку в конструкции заложен запас, то при одном и том же нормативном спектре воздействий расчетное число циклов до разрушения превосходит количество циклов при ресурсных испытаниях в 2–10 раз, в зависимости от выбранного коэффициента запаса сопротивления усталости конструкции 1,15–1,8. Таким образом, если полученные расчетным путем результаты достоверны, то ресурсные испытания до разрушения будут проходить при количестве циклов и повреждений, большем в 2–10 раз, чем определено ГОСТ 33788. Ресурсные испытания обладают высокой степенью достоверности, так как проводятся на натуральных образцах и при реальном эксплуатационном нагружении, исключением может являться проведение испытаний на макетах, в этом случае имеет смысл вводить запас на «ненатурность» образца и его нагружения. **Методы:** Рассмотрены пути снижения коэффициента запаса сопротивления усталости; произведен анализ нормативных документов, требования которых приводят к превышению расчетного числа циклов до разрушения над количеством циклов при ресурсных испытаниях до 10 раз. **Результаты:** Предложен ряд действий, позволяющих решить проблему, возникающую при проведении испытаний груженых грузовых вагонов, включая инновационные, на ресурс при соударении. **Практическая значимость:** Использование рекомендуемого ряда действий позволит исключить превышение расчетного числа циклов до разрушения над количеством циклов при ресурсных испытаниях до 10 раз, что значительно сократит временные и финансовые вложения в процесс проведения данных испытаний.

Ключевые слова: Сопротивление усталости, ресурс вагона, постановка на производство, коэффициент запаса сопротивления усталости, инновационный подвижной состав.

Введение

Одной из важнейших задач вагоностроителей при проектировании вагонов является снижение коэффициента тары вагона, который рассчитывается как отношение массы тары вагона к его грузоподъемности. Грузоподъемность вагона

ограничена в большей степени осевой нагрузкой и, соответственно, числом осей вагона, в то время как снижение массы тары вагона возможно несколькими путями: выбор рациональной конструктивной схемы вагона; применение при производстве вагонов новых материалов (алюминиевые сплавы, композитные материалы и так далее); оптимальный выбор коэффициента запаса сопротивления усталости при разработке новых единиц подвижного состава [1].

При снижении коэффициента запаса сопротивления усталости возможно уменьшение массы тары вагона за счет сокращения металлоемкости конструкции вагона. С другой стороны, указанный выше коэффициент ограничен действующими нормативными документами [2, 3]. Минимальные коэффициенты запаса сопротивления усталости несущей конструкции, в соответствии с ГОСТ 33211 и Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) (далее — Нормы), представлены в табл. 1 и 2 соответственно [4, 5].

ТАБЛИЦА 1. Допустимые коэффициенты запаса сопротивления усталости несущей конструкции в соответствии с ГОСТ 33211

Вариант	Метод определения приведенной амплитуды	Коэффициент запаса сопротивления усталости несущей конструкции, не менее	
		кузова вагонов	тележки, сцепные устройства
А	Испытания	1,15	1,30
Б	Расчет	1,20	1,40
В		1,50	1,80

ТАБЛИЦА 2. Допустимые коэффициенты запаса сопротивления усталости в соответствии с Нормами

Вариант	Исходные условия расчета	Значение $[n]^*$
А	При использовании статически надежных экспериментальных данных по пределу выносливости, при доверительной вероятности $P = 0,95$ и надежных экспериментальных данных по эксплуатационной нагруженности детали	1,3
		1,4
		1,5
		1,7
Б	При использовании статически надежных экспериментальных данных по пределу выносливости, при доверительной вероятности $P = 0,95$ и приближенных по эксплуатационной нагруженности детали, определяемых расчетным путем по установленным нормативам динамических сил, либо при использовании средневероятных данных по пределу выносливости ($P = 0,5$) и надежных экспериментальных данных по эксплуатационной нагруженности	1,5
		1,6
		1,7
		1,9
В	При использовании приближенных данных по пределу выносливости, определяемых расчетным путем или экспертной оценкой при $P = 0,5$, и приближенных данных по эксплуатационной нагруженности, определяемых расчетным путем по установленным нормативам динамических сил	1,8
		2,0
		2,1
		2,2

*В вариантах условий расчета А, Б и В значения допускаемых коэффициентов запаса относятся: первое — к элементам кузовов всех типов; второе — к тележкам, сцепным и тормозным устройствам грузовых и изотермических вагонов; третье — к тележкам, сцепным, переходным и тормозным устройствам пассажирских вагонов; четвертое — к колесным парам и их связям с рамой тележки вагонов всех типов.

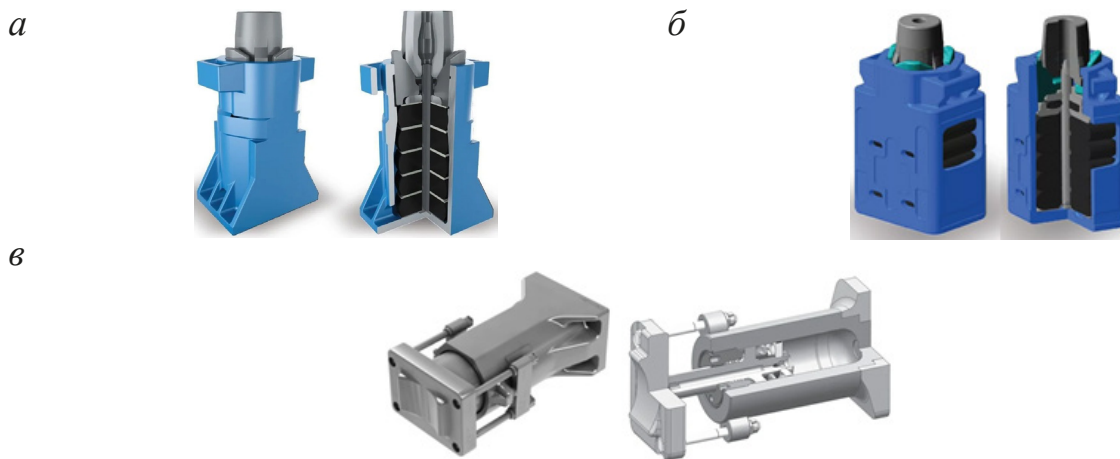


Рис. 1. Современные аппараты поглощающие для грузовых вагонов:
a — класса Т1; *б* — класса Т2; *в* — класса Т3

Существует несколько вариантов путей снижения металлоемкости конструкции грузовых вагонов. Один из возможных вариантов — это применение на грузовых вагонах, включая инновационные, современных энергоемких аппаратов поглощающих класса Т2 и выше.

Как известно, аппарат поглощающий представляет собой устройство, конструктивно входящее в состав автосцепного устройства единиц подвижного состава и предназначенное для поглощения энергии и демпфирования продольных усилий, действующих на подвижной состав.

Все аппараты поглощающие грузового подвижного состава имеют один общий параметр — установочные размеры, которые должны соответствовать требованиям ГОСТ 3475 [6]. В остальном — имеют различия как по методу гашения энергии удара, так и конструктивно. По методу поглощения кинетической энергии, возникающей от действия продольных усилий, оказывающих влияние на подвижной состав, различают следующие типы аппаратов поглощающих: фрикционные (поглощение энергии происходит за счет фрикционного трения); гидравлические (принцип работы основан на перетекании рабочей жидкости по одноименным камерам); эластомерные (в основе аппарата — эластомер, обладающий высокой вязкостью и эластичными свойствами); аппараты из упругих элементов (преобразование энергии происходит за счет деформации упругих частей); комбинированные (применение в аппарате поглощающем более одного из вышеперечисленных способов гашения энергии) [7, 8].

В соответствии с ГОСТ 32913 для грузовых вагонов по эксплуатационно-техническим показателям выделяют три класса (группы) аппаратов поглощающих: Т1 — предназначены для установки на грузовые вагоны, перевозящие все основные виды грузов, кроме опасных (номинальная энергоемкость аппарата — не менее 70 кДж) (рис. 1, *a*); Т2 — предназначены для установки на грузовые вагоны, перевозящие ценные грузы, а также грузы некоторых классов опасности (номинальная

энергоёмкость аппарата — не менее 100 кДж) (рис. 1, б); Т3 — предназначены для установки на грузовые вагоны, перевозящие особо опасные грузы (номинальная энергоёмкость аппарата — не менее 140 кДж) (рис. 1, в) [9].

Установка на грузовой вагон, особенно инновационный, аппаратов поглощающих класса не ниже Т2 позволяет существенно снизить продольные усилия, действующие на раму вагона при соударении/рывке (в соответствии с ГОСТ 33211 допускается принимать значение продольной силы 2,5 МН, вместо установленной 3,5 МН, при применении аппарата поглощающего класса Т1). В связи с этим становится возможным снизить действующий нормативный спектр в случае применения поглощающего аппарата большей энергоёмкости либо при проектировании новых вагонов принимать меньший коэффициент запаса сопротивления усталости, уменьшая тем самым профиль конструктивных элементов вагона, что неизбежно приведет к уменьшению объема используемого металла, а следовательно, и массы тары вагона. Вместе с тем масса тары вагона и ее снижение является одним из показателей инновационности для новых грузовых вагонов в соответствии с [10].

Однако при применении аппарата поглощающего класса не ниже Т2, с целью снижения продольных усилий и металлоёмкости, возникает следующая проблема: Нормы предусматривают для грузовых вагонов основных типов (согласно I расчетному режиму) максимальную продольную силу, при соударении вагонов, величиной 3,5 МН вне зависимости от класса аппарата поглощающего, установленного на вагон (и, соответственно, имеют только один спектр) [5]. Так как при проектировании и расчете вагонов на прочность оценка прочности конструкции на данный момент производится на соответствие двум основным нормативным документам: ГОСТ 33211 и Нормам (через ГОСТы на грузовые вагоны, которые, в свою очередь, ссылаются на действующие Нормы). При этом возникает ситуация, при которой использование аппарата поглощающего класса не ниже Т2 на грузовых вагонах становится бессмысленным, так как требования к величинам продольных усилий при соударении вагонов в указанных выше документах разнятся. В связи с вышесказанным снижение коэффициента запаса сопротивления усталости за счет применения более высокого класса аппарата поглощающего оказывается невозможным на данный момент. Ко всему прочему и спектров для аппаратов поглощающих класса выше Т2 тоже пока нет, но если бы спектр продольных действующих через сцепное устройство сил появился в нормативных документах по проектированию и испытаниям грузового подвижного состава, то этот факт дал бы новый толчок в развитии грузового подвижного состава. Это позволило бы создавать грузовые вагоны, спроектированные с учетом сниженных продольных нагрузок, за счет применения поглощающих аппаратов класса Т3 и выше, а также позволило бы расширить модельный ряд поглощающих аппаратов повышенной энергоёмкости и удешевить их стоимость за счет увеличившегося на них спроса при строительстве и модернизации грузовых вагонов.

Постановка задачи

В требованиях п. 3.17 положения о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении (СТОИР) при назначении срока службы вагона, отличного от указанного в документе, необходимо проведение ресурсных испытаний вагона при соударении или его наиболее нагруженных узлов, лимитирующих назначенный срок службы (шкворневой узел, узел заделки стойки и т. п.), до разрушения (после чего образец должен быть утилизирован) [10, 11]. Но поскольку в конструкции заложен запас на сопротивление усталости (табл. 1), то при одном и том же нормативном спектре воздействий расчетное число циклов до разрушения превосходит количество циклов при ресурсных испытаниях в 2–10 раз, в зависимости от выбранного коэффициента запаса сопротивления усталости конструкции 1,15–1,8. Вышеизложенное говорит о том, что если полученные расчетным путем результаты достоверны, то ресурсные испытания до разрушения будут проходить при количестве циклов и повреждении в 2–10 раз больше, чем определено ГОСТ 33788. Поскольку ресурсные испытания максимально приближены по характеру воздействия к эксплуатационным нагрузкам и проводятся чаще всего на натуральных образцах изделий, то запас на ошибки, связанные с имитацией нагрузок или подбором испытываемых образцов, минимальны вследствие высокой достоверности испытаний. Именно это дает возможность проводить исследования до накопления расчетного усталостного повреждения согласно нормативному спектру без учета запаса при его определении.

Решение

В качестве доказательной базы для п. 15 технического регламента Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (ТР ТС 001/2011) «Выбранные проектировщиком (разработчиком) конструкции железнодорожного подвижного состава и его составных частей должны быть безопасны в течение назначенного срока службы и (или) до достижения назначенного ресурса, в течение назначенного срока хранения, а также выдерживать воздействия и нагрузки, которым они могут подвергаться в процессе эксплуатации» [12], представлен ГОСТ 33788—2016 согласно перечню международных и региональных (межгосударственных) стандартов, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований ТР ТС 001/2011 и осуществления оценки соответствия объектов технического регулирования, утвержденный Решением Коллегии Евразийской экономической комиссии от 29 марта 2022 г. № 48.

Пункты 8.7 и 9.8 ГОСТ 33788—2016, посвященные испытаниям на ресурс при соударении, не предполагают испытаний до разрушения, а сам термин

«разрушение» упоминается только совместно с термином «потеря несущей способности». Согласно п. 8.7.5 ГОСТ 33788—2016 число соударений должно соответствовать расчетному ресурсу несущей конструкции вагона или ее составной части [13].

Если углубиться в терминологию п. 3.17 СТОИР, то в ГОСТ 27.001—95 «Надежность в технике» в разделе «Основные положения» и ГОСТ 32192—2013 «Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения» такой термин, как «разрушение», отсутствует (в данном случае применяется термин «предельное состояние»), и критерии установления наиболее нагруженных узлов, ограничивающих назначенный срок службы (узлы заделок стоек, шкворневые узлы и т. п.), в нормативных документах также не обозначены [14].

Таким образом, при проведении испытаний грузовых вагонов на ресурс при соударении техническая возможность продолжить испытания до наступления разрушения есть, но полученный при этих дополнительных испытаниях результат не может быть применим, так как расчетный срок службы вагона назначается не по результатам испытаний, а согласно установленным нормативам для различных типов грузовых вагонов и периодов освидетельствования входящего в их комплект оборудования. Немаловажным также является и то, что в случае большого запаса по сопротивлению усталости базовых (лимитирующих назначенный срок службы) элементов конструкции значительно увеличатся затраты на проведение ресурсных испытаний, результаты которых, как было указано выше, не могут быть использованы. В случае с инновационным подвижным составом, который имеет больший срок службы в сравнении с остальными вагонами, значительно увеличивается стоимость испытаний и сроки постановки продукции на производство.

Соответствующее требование в СТОИР возникло в связи с тем, что были попытки обоснования срока службы вагонов посредством расчетов на сопротивление усталости и экспертных оценок на основе опыта эксплуатации аналогичного подвижного состава, и все это вместо реальных экспериментальных оценок показателей циклической долговечности конструкции грузовых вагонов по результатам ресурсных испытаний при соударении по стандартам, включенным в доказательную базу технических регламентов, а также наблюдались попытки использовать в эксплуатации образцы, уже прошедшие ресурсные испытания, без соответствующих разрешений. В дополнение к вышеизложенному не исключена и вероятность фальсификации испытаний со стороны недобросовестных и аффилированных с собственником вагонов испытательных центров, а наличие разрушений усталостного характера на опытном образце практически исключает возможность этого.

Так как оба показателя (коэффициент запаса сопротивления усталости, ресурс) связаны с накоплением усталостных повреждений в конструкции при эксплуатации, возникает необходимость оценки запаса сопротивления усталости

объекта по результатам ресурсных испытаний, которая может быть проведена только для случаев, когда основным деградиационным процессом при эксплуатации является накопление усталостных повреждений.

Деградиационные процессы, связанные с износом и коррозией, возникают в основном в небазовых элементах кузова (элементы обшивки, промежуточные балки и так далее) или в сменных узлах вагона (ходовая часть, сцепное устройство, пятник, подпятник и тому подобное).

У подвижного состава железных дорог в основном деградиационные процессы связаны с накоплением усталостных повреждений в базовых несущих элементах, повреждение которых приводит к наступлению предельного состояния для подвижного состава в целом.

Как, например, при испытаниях на ресурс при соударении, проводимых по пп. 8.7, 9.8 ГОСТ 33788—2016, величина суммарного повреждения, накопленного при испытаниях, определяется как сумма возведенных в степень m усилий соударения, действующих через сцепное устройство на грузовой вагон:

$$D_u(n) = \sum_{i=1}^n (F_{1,i}^m + F_{2,i}^m), \quad (1)$$

где $D_u(n)$ — суммарное накопленное повреждение;

i — порядковый номер соударения;

n — число соударений;

$F_{1,i}, F_{2,i}$ — максимальные продольные силы, действующие в автосцепке со стороны вагона-бойка при соударении с испытуемым вагоном и при соударении сцепа вагона-бойка и испытуемого вагона с вагонами подпора соответственно.

Расчетное повреждение, накопленное вагоном в эксплуатации, определяется:

$$D_{\text{расч}} = N_{\text{расч}} \sum_k p_k \cdot F_k^m, \quad (2)$$

где $D_{\text{расч}}$ — расчетное повреждение;

p_k — вероятность возникновения силы;

m — показатель степени кривой усталости (принимают $m = 4$);

$N_{\text{расч}}$ — расчетное число действия сил соударения.

В пп. 8.7, 9.8 ГОСТ 33788—2016 нет упоминания, что m — это степень кривой усталости, и накопленные в испытаниях и эксплуатации повреждения не называют усталостными. Очевидно, что описанный в них метод суммирования полностью базируется на уравнении кривой усталости с показателем m и гипотезе о линейном суммировании повреждений.

Аналогичным образом производится определение величины воздействия в эксплуатации при оценке усталостной прочности подвижного состава по

результатам ходовых прочностных испытаний при определении приведенной эквивалентной амплитуды динамического напряжения, которую определяют:

$$\sigma_{a,\varepsilon} = \sqrt[m_1]{\frac{1}{N_0} \left(\sum n_i \sigma_{a,i}^{m_1} + \sigma_{a,N}^{(m_1-m_2)} \sum n_j \sigma_{a,j}^{m_2} \right)}, \quad (3)$$

где $\sigma_{a,N}$ — предел выносливости по амплитуде по напряжениям, при базовом числе циклов $N_0 = 10^7$;

m_1 — показатель степени первой ветви кривой выносливости, для литых деталей принимают $m_1 = 4$;

$\sigma_{a,i}$ — амплитуда динамического напряжения $\sigma_{a,i} \geq \sigma_{a,N}$;

n_i — количество циклов амплитуд динамического напряжения $\sigma_{a,i}$;

$\sigma_{a,j}$ — амплитуда динамического напряжения $\sigma_{a,j} < \sigma_{a,N}$;

n_j — количество циклов амплитуд динамического напряжения $\sigma_{a,j}$.

Заключение

В связи с вышеизложенным предлагается:

Для применения меньшего коэффициента запаса сопротивления усталости в качестве одного (основного) документа для оценки прочности конструкции вагонов и их узлов использовать ГОСТ 33211, в котором учтено использование современных энергоемких аппаратов поглощающих, либо переиздать Нормы, в новом издании которых учесть снижение действия продольных нагрузок при соударении с 3,5 МН до 2,5 МН, при использовании в конструкции вагона аппаратов поглощающих класса не ниже Т2. А также дополнить упомянутые нормативные документы спектрами для аппаратов поглощающих классов выше Т2.

Для ресурсных испытаний на макетах ввести коэффициент запаса, учитывающий отличие натурального образца от макета и его неэксплуатационные нагружения.

Отсутствующий в стандартах по надежности термин «разрушение» в СТОИР рассматривать как термин «предельное состояние» (*en limiting state*) — техническое состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно (ГОСТ 27.002—2015). Техническое состояние объекта после проведения испытаний на ресурс при соударении до выработки расчетного (для соответствующего количества лет) повреждения считать предельным состоянием, так как его дальнейшая эксплуатация недопустима в связи с тем, что его остаточный ресурс неизвестен.

Синхронизировать нормативную документацию в части коэффициента запаса сопротивления усталости в сторону его снижения, с учетом достоверности способа получения данных, так как эксплуатационные спектры снижаются

по величине механического воздействия, а методы оценки показателей совершенствуются с уменьшением величины неопределенности при измерениях.

В п. 9.8 ГОСТ 33788 «Испытания на ресурс при соударении» указать природу происхождения показателя степени $m = 4$.

После накопления соответствующих расчетным данным в годах усталостных повреждений единицей подвижного состава (объекта испытаний) должен быть составлен акт, подтверждающий предельное состояние объекта после испытаний на ресурс при соударении, который должен являться основанием для утилизации объекта в установленном порядке.

Библиографический список

1. Бороненко Ю. П. Выбор конструктивных решений элементов вагонов с малой массой тары / Ю. П. Бороненко, И. О. Филиппова // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. — 2017. — № 3(69).
2. Сенько В. И. Особенности определения коэффициента запаса сопротивления усталости конструкций подвижного состава / В. И. Сенько, С. В. Макеев, В. В. Комиссаров и др. // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. — 2018. — № 1(36). — С. 5–9.
3. Сенько В. И. Методические основы определения коэффициента запаса сопротивления усталости при натуральных испытаниях подвижного состава / В. И. Сенько, С. В. Макеев, В. В. Комиссаров и др. // Вестник Белорусского государственного университета Транспорта: наука и транспорт. — 2018. — № 1(36). — С. 5–9.
4. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с поправкой, с Изменением № 1). Официальное издание. — М.: Стандартинформ, 2020.
5. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных), ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996 (с дополнениями и изменениями на момент разработки).
6. ГОСТ 3475—81. Устройство автосцепное подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524) мм. Установочные размеры (с Изменениями № 1 и № 2). Официальное издание.
7. Болдырев А. П. Основные тенденции разработки и внедрения новых конструкций поглощающих аппаратов автосцепки грузовых вагонов / А. П. Болдырев, Д. А. Ступин, А. М. Гуров // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2018. — № 1.
8. Болдырев А. П. Оценка параметрической надежности поглощающих аппаратов с учетом эксплуатационных факторов / А. П. Болдырев, П. Д. Жиров, В. В. Ионов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2017. — № 4.
9. ГОСТ 32913—2014. Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки (Переиздание). Официальное издание. — М.: Стандартинформ, 2019.
10. Отраслевой стандарт СТО РЖД 10.002—2015. Вагоны грузовые инновационные. Правила оценки экономической эффективности, утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 26 апреля 2016 г. № 768р.
11. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сооб-

щении. Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества протокол № 57 от 16–17 октября 2021 г.

12. ТР ТС 001/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (с изменениями на 25 ноября 2022 года). — URL: www.tsouz.ru.

13. ГОСТ 33788—2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества (с Изменением № 1). Официальное издание. — М.: Стандартинформ, 2016.

14. Бороненко Ю. П. Введение показателей энергоэффективности грузовых вагонов — резерв энергосбережения на железнодорожном транспорте / Ю. П. Бороненко, А. А. Комайданов // Железнодорожный транспорт. — 2023 — № 6.

Дата поступления: 15.09.2023

Решение о публикации: 10.11.2023

Контактная информация:

КОМАЙДАНОВ Алексей Андреевич — аспирант, инженер кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; komaidanovnvc@yandex.ru

СМИРНОВ Анатолий Николаевич — начальник испытательного центра; smirnovnvc@mail.ru

ЗВЕРЕВ Михаил Владимирович — канд. техн. наук, доц.; zverev-nvc@yandex.ru

The Problems of Assessing the Resource and Fatigue Strength during the Production of Innovative Rolling Stock

A. A. Komaidanov¹, A. N. Smirnov², M. V. Zverev¹

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

²JSC “NVC “Vagony”, 22, litera M, pr-kt Moskovsky, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

For citation: Komaidanov A. A., Zverev M. V., Smirnov A. N. The Problems of Assessing the Resource and Fatigue Strength during the Production of Innovative Rolling Stock. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 112-123. (In Russian) DOI:10.20295/2223-9987-2023-4-112-123

Summary

Purpose: In accordance with the requirements of section 3.17 of the Regulations on the System of Maintenance and Repair of Freight Cars Admitted to Operation on General-Use Railway Tracks in International Traffic (STOIR), when assigning a service life for a car different from that specified in the document, it is necessary to conduct resource tests of the car until destruction. But since there is a reserve in the structure, then with the same regulatory spectrum of impacts, the estimated number of cycles until destruction exceeds the number of cycles during resource tests by 2-10 times, depending on the selected coefficient of the fatigue resistance of the structure 1.15-1.8. Thus, if the results obtained by calculation are reliable, then the resource tests until destruction will take place with the number of cycles and damage 2-10 times greater than defined by GOST 33788. Resource tests have a high degree of reliability, as they are carried out on natural samples and under real operational loads. The exception may be testing on prototypes; in such cases, it makes sense to introduce a margin for the ‘non-naturality’ of the sample and its loading. **Methods:** Ways to reduce the safety factor for

fatigue resistance have been explored. An analysis of regulatory documents, the requirements of which lead to exceeding the calculated number of cycles until failure over the number of cycles in resource tests by up to 10 times, has been conducted. **Results:** A series of actions, including innovative approaches, has been proposed to address the issue arising during the testing of loaded freight cars on the resource during collisions. **Practical significance:** The implementation of the recommended series of actions will eliminate the exceedance of the calculated number of cycles until destruction over the number of cycles in resource tests by up to 10 times. This will significantly reduce the time and financial investments in the process of conducting these tests.

Keywords: Fatigue resistance, wagon life, launching into production, fatigue resistance reserve coefficient, innovative rolling stock.

References

1. Boronenko Yu. P., Filippova I. O. Vybor konstruktivnykh resheniy elementov vagonov s maloy massoy tary [Selection of design solutions for elements of cars with low tare weight]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Science and progress of transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport]. 2017, Iss. 3(69). (In Russian)
2. Sen'ko V. I., Makeev S. V., Komissarov V. V. et al. Osobennosti opredeleniya koeffitsienta zapasa soprotivleniya ustalosti konstruktsiy podvizhnogo sostava [Features of determining the fatigue safety factor of rolling stock structures]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: science and transport]. 2018, Iss. 1(36), pp. 5–9. (In Russian)
3. Sen'ko V. I., Makeev S. V., Komissarov V. V. et al. Metodicheskie osnovy opredeleniya koeffitsienta zapasa soprotivleniya ustalosti pri naturnykh ispytaniyakh podvizhnogo sostava [Methodological basis for determining the safety factor of fatigue resistance during full-scale testing of rolling stock]. *Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta Transporta: nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: science and transport]. 2018, Iss. 1(36), pp. 5–9. (In Russian)
4. GOST 33211—2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam (s popravkoy, s Izmeneniyem № 1). Ofitsial'noe izdanie [GOST 33211—2014. Freight cars. Requirements for strength and dynamic properties (as amended, with Change No. 1). Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian)
5. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh), GosNIIV-VNIIZhT, 1996 (s dopolneniyami i izmeneniyami na moment razrabotki) [Standards for the calculation and design of 1520 mm gauge railway cars of the Ministry of Railways (non-self-propelled), GosNIIV-VNIIZhT, 1996 (with additions and changes at the time of development)]. (In Russian)
6. GOST 3475—81. Ustroystvo avtostsepnogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm. Ustanovochnye razmery (s Izmeneniyami № 1 i № 2). Ofitsial'noe izdanie [GOST 3475-81. Automatic coupling device for rolling stock of 1520 (1524) mm gauge railways. Installation dimensions (with Changes No. 1 and No. 2). Official publication]. (In Russian)
7. Boldyrev A. P., Stupin D. A., Gurov A. M. Osnovnye tendentsii razrabotki i vnedreniya novykh konstruktsiy pogloshchayushchikh apparatov avtostseпки gruzovykh vagonov [Main trends in the development and implementation of new designs of draft gears for automatic couplers of freight cars]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the St. Petersburg University of Railway Transport]. 2018, Iss. 1. (In Russian)

8. Boldyrev A. P., Zhiron P. D., Ionov V. V. Otsenka parametricheskoy nadezhnosti pogloshchayushchikh apparatov s uchetom ekspluatatsionnykh faktorov [Assessing the parametric reliability of draft gears taking into account operational factors]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the St. Petersburg University of Railway Transport]. 2017, Iss. 4. (In Russian)

9. GOST 32913—2014. *Apparaty pogloshchayushchie stsepnyykh i avtostsepnyykh ustroystv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tekhnicheskie trebovaniya i pravila priemki (Pereizdanie). Ofitsial'noe izdanie* [GOST 32913—2014. Absorbing devices for coupling and automatic couplers of railway rolling stock. Technical requirements and acceptance rules (Reprint). Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian)

10. *Otrasevyy standart STO RZhD 10.002—2015. Vagony gruzovye innovatsionnye. Pravila otsenki ekonomicheskoy effektivnosti, utv. Rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 26 aprelya 2016 g. № 768r* [Industry standard STO Russian Railways 10.002—2015. Freight cars are innovative. Rules for assessing economic efficiency, approved. By order of JSC Russian Railways dated April 26, 2016 № 768r]. (In Russian)

11. *Polozhenie o sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gruzovykh vagonov, dopushchennykh v obrashchenie na zheleznodorozhnye puti obshchego pol'zovaniya v mezhdunarodnom soobshchenii. Utverzhdeno Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva protokol № 57 ot 16–17 oktyabrya 2021 g.* [Regulations on the system of maintenance and repair of freight cars allowed for circulation on public railway tracks in international traffic. Protocol № 57 dated October 16–17, 2021 was approved by the Council on Railway Transport of the Commonwealth member states]. (In Russian)

12. *TR TS 001/2011. Tekhnicheskiy reglament Tamozhennogo soyuza “O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava” (s izmeneniyami na 25 noyabrya 2022 goda)* [TR TS 001/2011. Technical Regulations of the Customs Union “On the safety of railway rolling stock” (as amended on November 25, 2022)]. Available at: www.tsouz.ru. (In Russian)

13. GOST 33788—2016. *Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva (s Izmeneniem № 1). Ofitsial'noe izdanie* [GOST 33788—2016. Freight and passenger cars. Test methods for strength and dynamic qualities (with Change No. 1). Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2016. (In Russian)

14. Boronenko Yu. P., Komaydanov A. A. Vvedenie pokazateley energoeffektivnosti gruzovykh vagonov — rezerv energosberezheniya na zheleznodorozhnom transporte [Introduction of energy efficiency indicators for freight cars — a reserve of energy saving in railway transport]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2023, Iss. 6. (In Russian)

Received: September 15, 2023

Accepted: November 10, 2023

Author's information:

Aleksey A. KOMAIDANOV — Postgraduate Student, Engineer of the Department of “Wagons and Carriage Facilities”; komaidanovnc@yandex.ru

Anatoly N. SMIRNOV — Head of the Testing Center; smirnovnc@mail.ru

Mikhail V. ZVEREV — PhD in Engineering, Associate Professor; zverev-nvc@yandex.ru

УДК 656.02

Систематизация и уточнение индексов эффективности логистики в управлении цепями поставок

Н. А. Журавлева, В. М. Шавшуков, Л. М. Чеченова

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

Для цитирования: Журавлева Н. А., Шавшуков В. М., Чеченова Л. М. Систематизация и уточнение индексов эффективности логистики в управлении цепями поставок // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 124-136. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-124-136

Аннотация

Цель: Уточнение индексов эффективности логистики РФ в новых цепях поставок, формирующихся под воздействием санкционных и иных ограничений, в условиях новой политики и новой геоэкономики, сформировавших третью кризисную ситуацию транспортно-логистического рынка. **Методы:** Используются методы аналитики и диагностики данных (наблюдение, анализ, синтез) индексов эффективности логистики как интерактивного инструмента сравнительного анализа проблем и возможностей основных параметров логистики, рассчитанных Turku School of Economics и поддерживаемых актуальными исследованиями Всемирного банка (World Bank). **Результаты:** Показаны результаты корректировки индексов эффективности логистики в формируемых цепях поставок РФ на основе оперативной информации по результатам опроса и нескольким типам данных; дана корректировка индексов эффективности логистики в формируемых цепях поставок по железной дороге; систематизированы корректирующие данные, влияющие на значения индексов эффективности логистики в РФ в зависимости от условий, влияющих на снижение их значений и возможности роста. **Практическая значимость:** Полученные результаты имеют прикладной характер, поскольку предлагают и обосновывают ряд мер, обеспечивающих разработку новых методологических подходов к формированию эффективных бизнес-моделей.

Ключевые слова: Транспортно-логистический рынок, индекс эффективности логистики.

Введение

Турбулентность мировой торговли, достигшая пика к концу 2022 года, принципиально изменила цепочки поставок, а следовательно, и рынок логистики. Доставка грузов превратилась не только в логистическую проблему, но и повлияла на рост стоимости продукции машиностроения, приборостроения и обрабатывающей промышленности (до 50 % рост транспортной составляющей) и привела к разнородной неэффективности поставок сырья и материалов. Бизнес огромного числа транспортно-логистических компаний оказался на грани рентабельности. Разрыв цепей поставок в РФ увеличил себестоимость перевозок более чем на 17 %, а для большинства промышленных компаний расходы на закупку техники и запчастей выросли до 50 %. Наступивший 2023 год поставил логистический бизнес перед выбором: любым способом удерживаться на рынке, теряя

свою операционную эффективность, или уходить на новые маршруты, формировать новые логистические связи, оптимизируя логистические издержки. Надо отметить, что это третья история масштабной смены парадигмы логистического рынка с 2008 года.

Первая началась с мирового валютного кризиса 2008–2010 годов, обвала ряда финансовых и продовольственных рынков ведущих мировых стран. Перевозки мгновенно отреагировали на спад производства и потребления. Чтобы выжить, большинство транспортных компаний готовы были доставлять грузы по минимальным тарифам и даже ниже себестоимости перевозки. На рынке развивался демпинг, конкуренция нарастала, а объем перевозок сокращался. Логистические компании, формируя свои стратегии товарных запасов и доставки, стали максимально использовать модель *just-in-time* («точно в срок»), оптимизируя затраты путем снижения объемов хранения. Однако для сбалансированного логистического рынка это не стало решением всех проблем. Нужна была оптимизация стоимостных затрат: времени перевозки и оформления, скорости расчетов, включения логистики «последней мили». Это привело к цифровизации логистики — появлению новых бизнес-моделей, основанных на новых ценностных предложениях [1, 2]. В это же время в РФ активно начинает работать так называемое импортозамещение, или локализация производства, что позволило к 2014 году увеличить индекс промышленного производства почти в 4 раза. Эффект промышленного роста сразу отразился на объеме грузоперевозок железнодорожным транспортом.

Второй кризисной ситуацией стал локдаун COVID-19, вызвавший бум бесконтактных заказов и доставок. Выиграли логистические компании с операционными моделями онлайн-покупок и бесконтактной доставки, ориентированные на клиента. Торговля наращивала темпы роста электронной коммерции — почти в два раза (2021 год к 2020 году). Но для большинства логистических компаний, ориентированных на доставки крупных партий промышленной продукции, рынок обрушился почти в два раза. Закрытие Китая привело к разрыву цепей поставок (увеличив срок доставки из Китая в РФ с 25 до 60 дней) и тарифному кризису перевозок в контейнерах (увеличив в 4 раза тарифы). Тем не менее и здесь появились лидеры, развивающие новые маршруты с качественным и безопасным сервисом перевозки. Тенденция повышения эффективности логистического бизнеса ушла в направлении новой гравитации товарных рынков, оптимизации издержек всей цепочки поставок. При этом для небольших компаний эффективными бизнес-моделями стали модели «нишевой» логистики (доставка негабаритных грузов, освоение новых маршрутов «последней мили» и пр.).

Новая геополитика и геоэкономика сформировали третью кризисную ситуацию транспортно-логистического рынка. Огромный пакет санкций в отношении РФ заблокировал до 80 % импорта и до 50 % экспорта, что должно было разрушить основную логистическую систему страны и зарубежных компаний, уже

встроенных в российскую экономику. При этом уже к началу 2023 года стало очевидным, что новые цепи поставок сформировались достаточно быстро. Это подтверждается рядом исследований, например [3]. Грузовые перевозки железнодорожным транспортом, упав к концу 2022 года на 2 % (среднее значение по всем дорогам и грузам), в начале 2023 года показали рост. Морские порты Северо-Запада РФ работали и работают в режиме предельных мощностей. Российская транспортно-логистическая система оказалась высокоустойчивой: вслед за клиентами, ускоренно переориентированными на новые рынки сбыта и альтернативные поставки, достаточно оперативно были разработаны новые маршруты, активизирован транспортный коридор «Север — Юг», налажены системы финансовых платежей. Конечно, такая шоковая ситуация привела к росту стоимости перевозки, но транспортно-логистический рынок сохранил конкурентоспособность, что оставляет шанс выравнивания цен на перевозку, и вышел с предложениями предоставления комплексного логистического сервиса, повышающего его операционную эффективность. Уже очевидно, что транспортно-логистические компании сформировали свои новые бизнес-стратегии, ориентированные на масштабирование новых транспортных услуг, новых направлений и логистических сервисов [4, 5].

Таким образом, в любую фазу острейших кризисов, частота которых постоянно сокращается, транспортно-логистический бизнес должен быть максимально ориентирован на клиента, что отражают индексы эффективности логистики (Logistic Performance Index).

Целью данного исследования является уточнение индексов эффективности логистики РФ в новых цепях поставок, формирующихся под воздействием санкционных и иных ограничений.

Данные и методы

Основу исследования составляют данные индексов эффективности логистики, рассчитанных Turku School of Economics и поддерживаемых актуальными исследованиями Всемирного банка (World Bank) [4]. Из статистического ряда показателей 160 стран были выбраны: США как страна с развитой транспортной инфраструктурой (6,586,610 км на 2012 г.) и большими объемами грузовых перевозок (2,1 трлн тонно-километров в 2017 г.) [6, 7]; Германия — страна с самым высоким уровнем развития логистики в Европе (4,37 в 2018 году); Белоруссия, Казахстан и Китай — как страны единого маршрутного коридора «Восток — Запад», проходящего в большей степени по территории РФ. Анализировались значения показателя индекса эффективности логистики (общего) как интерактивного инструмента сравнительного анализа проблем и возможностей основных параметров логистики этих стран и составляющие его индексы:

- общий индекс эффективности логистики (LPI — Logistic Performance Index);

- эффективность таможенного и пограничного оформления (ЕСР — Efficiency of customs clearance process);
- качество торговой и транспортной инфраструктуры (QTI — Quality of trade and transport-related infrastructure);
- простота организации поставок по конкурентоспособным ценам (СР — Ease of arranging competitively priced shipments);
- компетентность и качество логистических услуг — грузоперевозок, экспедирования и таможенного брокерства (СQ — Competence and quality of logistics services);
- возможность отслеживания отправок (АТТ — Ability to track and trace consignments);
- частота, с которой грузы достигают получателей в запланированные или ожидаемые сроки доставки (FST — Frequency with which shipments reach consignee within scheduled or expected time).

В табл. 1 представлены анализируемые значения индексов (1 — низкий, 5 — высокий).

ТАБЛИЦА 1. Перечень анализируемых значений индексов

Страна	Рейтинг LPI	LPI общий	ЕСР	QTI	СР	СQ	АТТ	FST
Германия	1	4,2	4,09	4,37	3,86	4,31	4,24	4,39
США	14	3,89	3,78	4,05	3,51	3,87	4,09	4,08
Китай	26	3,61	3,29	3,75	3,54	3,59	3,65	3,84
Казахстан	71	2,81	2,66	2,55	2,73	2,58	2,78	3,53
РФ	75	2,76	2,42	2,78	2,64	2,75	2,65	3,31
Беларусь	103	2,57	2,35	2,44	2,31	2,64	2,54	3,18

Примечание. Составлено по [4].

На рис. 1 показаны результаты анализа эффективности логистики РФ в отношении других стран за период 2018 года.

На базе анализа данных МВФ (2018 г. как наиболее репрезентативный) рассмотрены основные показатели перевозки экспорта и импорта по странам, входящим в транспортный коридор «Восток — Запад». В табл. 2 представлены результаты выборки.

Как следует из таблицы, по индексу эффективности таможенного и пограничного оформления (ЕСР) из всех выбранных стран РФ имела наименьший показатель. Далее, на основе всемирного опроса логистических операторов, нами сделана выборка измерения производительности по всей логистической цепочке поставок по данным странам и рейтингового индекса сравнительного анализа эффективности их логистических систем (табл. 3).

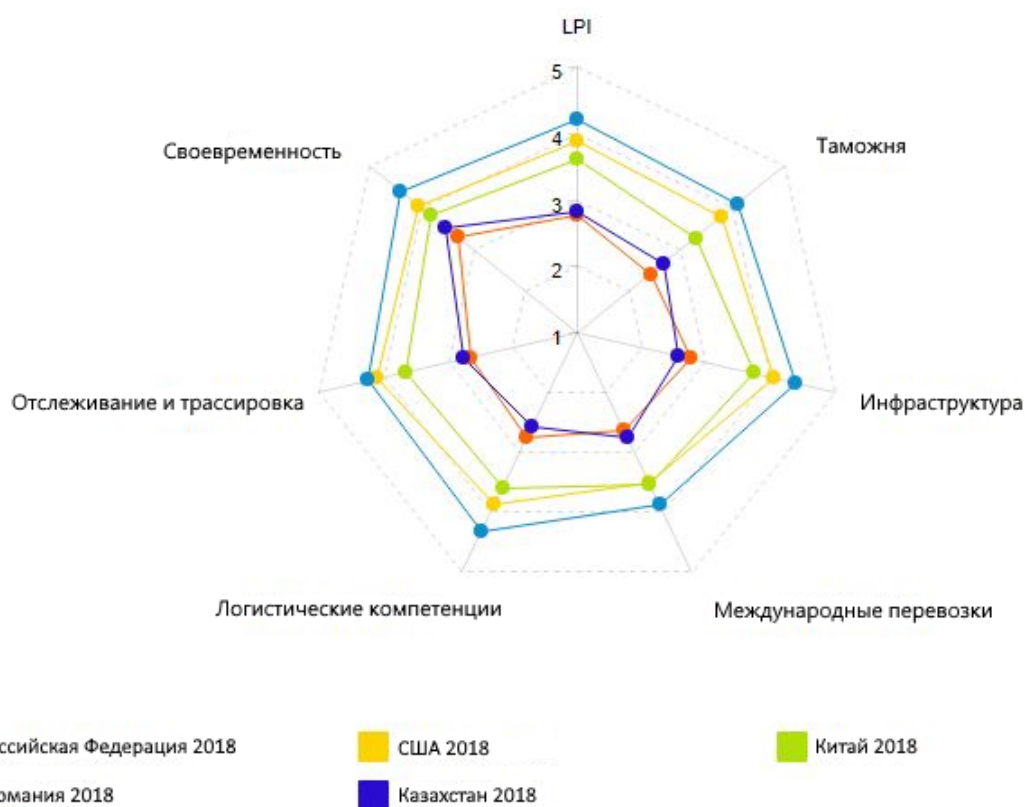


Рис. 1. Рейтинг Российской Федерации, 2018 г.

ТАБЛИЦА 2. Результаты выборки показателей перевозки

Наименование показателей перевозки	РФ	Китай	Казахстан	Германия
Время и расстояние экспорта/Цепочка поставок до порта или аэропорта				
Расстояние (километры)	306	337	2000	212
Срок выполнения (дни)	3	2	10	2
Экспорт время и расстояние/Страновая цепочка поставок				
Расстояние (километры)	3500	707	Н/Д	569
Срок выполнения (дни)	3	6	Н/Д	2
Время и расстояние импорта/Цепочка поставок до порта или аэропорта				
Расстояние (километры)	2646	328	Н/Д	350
Срок выполнения (дни)	5	6	Н/Д	2
Время и расстояние импорта/Страновая цепочка поставок				
Расстояние (километры)	2092	784	3500	559
Срок выполнения (дни)	9	4	18	3
Отгрузки, отвечающие критериям качества				
Количество агентств — экспорт (%)	69	81	93	95
Количество агентств — импорт (%)	3	3	4	1
Количество документов — экспорт (%)	3	3	6	1

Окончание табл. 2

Наименование показателей перевозки	РФ	Китай	Казахстан	Германия
Количество документов — импорт (%)	2	4	5	1
Время оформления без физического досмотра (дни)	2	4	8	1
Время оформления с физическим досмотром (дни)	2	1	10	1
Физический осмотр (%)	4	2	5	1
Множественная проверка (%)	22	3	18	2
Декларации, представленные и обработанные в электронном виде и онлайн (%)	4	1	50	2
Импортёры используют лицензированного таможенного брокера (%)	43	71	100	100
Возможность выбора места окончательной очистки (%)	88	71	100	Н/Д
Товар выпущен в ожидании таможенного оформления (%)	88	83	Н/Д	100

Примечание. Составлено по [8].

ТАБЛИЦА 3. Результаты измерения производительности по всей логистической цепочке поставок

Элемент выборки измерения производительности по логистической цепочке поставок	РФ	Беларусь	Германия	Казахстан	Китай
Оценка качества торговой и транспортной инфраструктуры (порты, дороги, аэропорты, информационные технологии)	Процент респондентов, ответивших низкий/очень низкий (%)				
Порты	50	50	0	100	0
Аэропорты	50	33	0	0	0
Дороги	75	0	14	100	18
Железнодорожный	50	0	23	0	9
Складские/перегрузочные мощности	0	0	0	0	8
Телекоммуникации и ИТ	50	0	14	0	8
Оценка компетентности и качества услуг	Процент респондентов, ответивших высокий/очень высокий (%)				
Дорожный	0	100	95	0	58
Железнодорожный	0	67	62	100	42
Воздушный транспорт	25	100	95	0	71
Морской транспорт	50	33	95	0	69
Складирование/перегрузка и распределение	25	33	100	0	64
Экспедиторы	50	67	80	100	62
Таможенные органы	25	33	79	0	64
Агентства по контролю качества/стандартов	50	50	63	0	38
Здравоохранение/Агентства по СФС	25	50	58	0	42
Таможенные брокеры	50	67	75	100	64
Торговые и транспортные ассоциации	25	67	63	100	50
Получатели или грузоотправители	25	33	53	0	69

Окончание табл. 3

Элемент выборки измерения производительности по логистической цепочке поставок	РФ	Беларусь	Германия	Казахстан	Китай
Оценка эффективности процессов	Процент респондентов, отвечающих часто или почти всегда (%)				
Оформление и доставка импорта	25	100	90	100	79
Оформление и доставка экспортных товаров	50	100	95	0	92
Прозрачность таможенного оформления	50	100	89	0	64
Прозрачность других пограничных ведомств	50	100	86	0	54
Предоставление адекватной и своевременной информации об изменениях в законодательстве	25	67	90	0	69
Ускоренное таможенное оформление для трейдеров с высоким уровнем соответствия	25	67	80	0	69
Оценка источников серьезных задержек	Процент респондентов, отвечающих часто или почти всегда (%)				
Обязательное складирование/перегрузка	0	0	0	0	0
Проверка перед отправкой	0	0	5	0	0
Морские перевозки	0	0	5	0	8
Преступная деятельность (например, украденный груз)	0	0	0	100	0
Привлечение неофициальных платежей	25	0	5	0	17

Примечание. Составлено по [9].

Из данной таблицы следует, что показатели LPI в странах с высоким уровнем дохода на 48 % выше, чем в странах с низким уровнем дохода. Это подтверждает тезис о том, что эффективная логистика может снижать торговые издержки и повышать конкурентоспособность страны на глобальном уровне [10].

Следуя методологии расчета индекса эффективности логистики, основанной на структурированном онлайн-опросе специалистов по логистике, был проведен выборочный опрос транспортно-логистических компаний, значимых для российского и международного логистического рынка. Основными респондентами являлись специалисты семи транспортно-логистических компаний, осуществляющих наибольшие объемы перевозок: ООО Транспортная компания «Грузовая ЖД Логистика», ООО «НеваБалтТранс», ОАО «Трансойл», Maersk Line Санкт-Петербург (с 2022 года — группа «Дело»), ОАО «Трансконтейнер», Морской торговый порт Усть-Луга, ООО «Балтийская логистическая компания». Большинство респондентов предоставляют транспортно-логистические услуги (перевозка, оперирование подвижным составом, экспедиторские услуги, предоставление инфраструктуры, складирование и индивидуальные логистические решения, перевозки сыпучих или навалочных грузов, контейнерные перевозки) как на территории РФ, так и по международным транспортным коридорам. В 2022 году основное направление перевозок было на маршруте Северо-Западного региона РФ в направлении Китая

(часть международного транспортного коридора Европа — Азия). Активизируются перевозки по коридору «Север — Юг».

Результаты

1. Приведены результаты корректировки индексов эффективности логистики в формируемых цепях поставок РФ на основе оперативной информации по результатам опроса и нескольким типам данных (рис. 2).

Цены от основных портов Китая до Санкт-Петербурга на 01.03.2023	<p><i>FOB QINGDAO/SHANGHAI/NINGBO/XIMAN (QUANZHOU)/NANSHA/SHEKOU - Санкт-Петербург, ПЛП O/F: USD6500/20 'GP, USD8600/40' HC (включая DTHC, DOC)</i></p> <p><i>Свободное время: 14 дней в Санкт-Петербурге</i></p> <p><i>Транзит через Дубай, T/T: 45-50 дней</i></p> <p><i>Каждую неделю: 200TEU</i></p>
	<p><i>FOB QINGDAO/SHANGHAI/NINGBO/NANSHA - Санкт-Петербург, Бронка O/F: USD6500/20 'GP, USD8700/40' HC (включая DTHC, DOC)</i></p> <p><i>Перевозчик: XXXXX</i></p> <p><i>Свободное время: 14 дней в Санкт-Петербурге</i></p> <p><i>T/T: 40 дней с прямым обслуживанием</i></p> <p><i>Каждую неделю: 50 единиц подтверждения TEU</i></p>

Рис. 2. Индексы эффективности логистики в формируемых цепях поставок РФ
В дополнение дана корректировка индексов эффективности логистики в формируемых цепях поставок по железной дороге (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Индексы эффективности логистики в формируемых цепях поставок по железной дороге

Ж.-д. станция назначения	Cross borde/ пересечение границы	Shanghai Шанхай	Ningbo Нинбо	Qingdao Циндао	Tianjin Тяньцзинь	Xiamen Сямынь	Guangzhou Гуанчжоу	Shenzhen Шэньчжэнь	T/T-оплата
Vorsino — Bely Rast (Elektrougli)	Alashankou/Khorgos Алашанькоу/Хоргос	10 300	10 400	9850	10 050	10 600	10 400	10 400	18
Ворсино — Белый Раст (Электроугли)	Alashankou Алашанькоу	10 400	10 700	/	/	/	10 200	10 200	18
Saint Petersburg (Shushary) Санкт-Петербург (Шушары)	Alashankou/Khorgos Алашанькоу/Хоргос	10 400	10 800	10 300	10300	11100	10 800	10 800	20
Minsk (Kolyadichi) Минск (Колядичи)	Khorgos Хоргос	10 700	10 400	/	/	/	9900	9900	20

ТАБЛИЦА 5. Корректирующие данные, влияющие на значения индексов эффективности логистики (ИЭЛ) в РФ

ИЭЛ	Проблемы	Возможности
ЕСР (таможня)	Поставка товаров в Россию через третьи страны. Очереди на загрузку/перегрузку товаров и очереди на въезд в Китай. Среднее время ожидания прохождения границы 4–7 дней	Рост эффективности нового маршрута «Север — Юг» через Иран и Азербайджан, транзитное время составляет 18–20 дней. Доставка из турецких портов в порты Краснодарского края паромом. Достижение договоренности прохождения границ на основе использования смарт-контрактов. Активизация деятельности портов Санкт-Петербурга в направлении стран Ближнего Востока, Азиатско-Тихоокеанского региона, Африки, Латинской Америки и др.
QTI (инфраструктура)	Ограничения железнодорожной инфраструктуры (очереди на погрузку на железную дорогу составляют 15–30 дней). 100 % загрузка терминалов и нехватка платформ. Время простоя морских судов в портах Китая — 20–40 дней	Ввод в действие второго пути Байкало-Амурской магистрали. Внедрение технологии отправки контейнеров в полувагонах вместо фитинговых платформ. Строительство новых терминалов и повышение вместимости действующих
CQ (качество)	Неотработка альтернативных маршрутов доставки грузов в/из России	Северный морской путь (СМП): возможность продления на западе до Мурманска и на востоке до Сахалина, чтобы соединить морские терминалы с центрами производства неэнергетических товаров и транспортно-логистическими центрами перевалки контейнеров. Развитие инфраструктуры коридора «Север — Юг»
FST (сроки)	Из Китая авто- и авиаперевозка — 7–10 дней. Стоимость перевозки по сравнению с прямыми рейсами из Китая составляет в среднем 15–20 % от стоимости фрахта. Среднее время транзита грузов из Китая в Москву автотранспортом составляет 22–27 дней, сборный груз — до 40 дней	Решение проблем инфраструктуры. Расширение применения цифровых технологий при прохождении таможни
CP (цены)	Средняя стоимость доставки 40-футового контейнера, например от ст. Чунцин в Москву, составит \$8500, из Шанхая в Москву — \$9000. Рост тарифов РЖД, недостаточно мест в поездах из КНР, простои в ожидании смены платформ, загруженность станций прибытия в Москве и регионах, а также несоблюдение расписания	Актуализация и ратификация новых торговых и тарифных соглашений в рамках БРИКС, оптимизирующих стоимость перевозки (в том числе с использованием дотаций и специальных тарифов) [11, оперативные данные по тарифам отдельных грузоперевозок]

2. Систематизированы корректирующие данные, влияющие на значения индексов эффективности логистики в РФ (табл. 5) в зависимости от условий, влияющих на снижение их значений и возможности роста.

Таким образом, индексы эффективности логистики как показатели состояния транспортно-логистического рынка могут существенно улучшаться с изменением и оптимизацией операционных моделей транспортных организаций и задействованием новых маршрутов перевозки.

Заключение

Будущее товарных рынков РФ и стран экспортеров-импортеров напрямую связано с эффективностью транспортно-логистических маршрутов. При этом их развитие связано не только с новой транспортно-логистической инфраструктурой, но и с межгосударственными торговыми, тарифными и протекционистскими мерами [11–13]. Организовать доставку в РФ сегодня можно из любой точки мира.

Однако санкции вынуждают использовать обходные пути, что увеличивает сроки и стоимость перевозки. Достаточно сложно планировать маршрут даже на среднесрочный период, поскольку брокеры в том числе в дружественных странах (Казахстан и Турция) иногда отказываются работать с российскими грузами. Это ставит новые задачи перед российским бизнесом. Их можно выделить в две группы: задачи формирования оптимальных операционных транспортно-логистических моделей и разработка новых методологических подходов формирования эффективных бизнес-моделей. Именно вторая группа представляется нам наиболее перспективной и актуальной для дальнейшего исследования.

Библиографический список

1. Гулый И. М. Влияние показателей эффективности логистики, транспортной мобильности населения и инвестиций в цифровую транспортную инфраструктуру на параметры устойчивого развития / И. М. Гулый // Экономика устойчивого развития. — 2021. — № 4(48). — С. 23–27.
2. Гулый И. М. Методология оценки влияния цифровых платформ взаимодействия участников мультимодальных перевозок грузов на параметры международных транспортных коридоров / И. М. Гулый // Транспортное дело России. 2021. — № 6. — С. 167–169.
3. Куренков П. Влияние санкций коллективного Запада на транспортную логистику Российской Федерации / П. Куренков, М. Харитонова, А. Захаров и др. // Логистика. — 2023. — № 1(194). — С. 10–13. — DOI: 10.54959/22197222_2023_01_10.
4. Yan Y. Research on the Innovation Path of Logistics Formats Based on 5G Technology / Y. Yan // Open Journal of Business and Management. — 2019. — Vol. 7. — Iss. 4. — Pp. 1936–1942. — DOI: 10.4236/ojbm.2019.74132.

5. Борисик М. П. Современные проблемы транспортной логистики РФ / М. П. Борисик, Е. С. Иванова, К. А. Рюмкина // Электронный научно-практический журнал «Экономика и менеджмент инновационных технологий». — 2022. — № 1. — URL: <https://ekonomika.snauka.ru/2022/01/17400> (дата обращения: 24.10.2023).
6. Доклад Всемирного банка «Индекс эффективности логистики»: The World Bank. Data. Logistics performance index: Quality of trade and transport-related infrastructure. — URL: <https://data.worldbank.org/indicator/LP.LPI.INFR.XQ?end=2018&start=2018&view=map> (дата обращения: 24.10.2023).
7. Central Intelligence Agency (CIA). The World Factbook. Country Comparison: Roadways. — URL: <https://web.archive.org/web/20170702023929/https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2085rank.html> (дата обращения: 26.10.2023).
8. Salas E. B. Rail freight volume transported in the U.S. 2002-2021 / E. B. Salas // Statista. 12.12.2022. — URL: <https://www.statista.com/statistics/245235/rail-freight-transportation-in-the-us/#statisticContainer> (дата обращения: 26.10.2023).
9. Доклад Всемирного банка «Среднее время выполнения импорта для цепочек поставок»: The World Bank. Data. Lead time to import, median case. — URL: https://data.worldbank.org/indicator/LP.IMP.DURS.MD?most_recent_value_desc=false&view=chart (дата обращения: 24.10.2023).
10. Domestic LPI, Environment and Institutions: Russia 2018. — URL: https://lpi.worldbank.org/domestic/environment_institutions/2018/C/RUS/C/CHN#chartarea (дата обращения: 24.10.2023).
11. He N. Relationship between Logistics Firm Size and Business Diversification: An Empirical Study of Chongqing, Area in China / N. He, W. Wu, S. Liu // Open Journal of Statistics. — 2021. — Vol. 11. — Iss. 1. — Pp. 1–18. — DOI: 10.4236/ojs.2021.1111001.
12. Данг К. Б. Ключевые факторы развития логистической системы АСЕАН / К. Б. Данг, Б. А. Аникин // Вестник университета. — 2022. — № 3. — С. 90–96. — DOI: 10.26425/1816-4277-2022-3-90-96.
13. Young L. Freight rebound hopes are fading under an inventory glut / L. Young, P. Berger // The Wall Street Journal. — 2023. — URL: <https://www.wsj.com/articles/freight-rebound-hopes-are-fading-under-an-inventory-glut-912995d2> (дата обращения: 26.04.2023).

Дата поступления: 20.09.2023

Решение о публикации: 19.10.2023

Контактная информация:

ЖУРАВЛЕВА Наталья Александровна — д-р экон. наук, проф.

ШАВШУКОВ Вячеслав Михайлович — д-р экон. наук, проф.

ЧЕЧЕНОВА Лиана Мухамедовна — д-р экон. наук, доц.; liana1981-149@mail.ru

Systematization and Refinement of Logistics Efficiency Indices in Supply Chain Management

N. A. Zhuravleva, V. M. Shavshukov, L. M. Chechenova

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

For citation: Zhuravleva N. A., Shavshukov V. M., Chechenova L. M. Systematization and Refinement of Logistics Efficiency Indices in Supply Chain Management. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 124-136. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-124-136

Summary

Purpose: To clarify the indices of the efficiency of logistics of the Russian Federation in new supply chains formed under the influence of sanctions and other restrictions, in the conditions of new politics and new geoeconomics, which have formed the third crisis situation of the transport and logistics market. **Methods:** Methods of data analysis and diagnostics (observation, analysis, synthesis) of logistics efficiency indices are used as an interactive tool for comparative analysis of problems and opportunities of the main logistics parameters calculated by Turku School of Economics and supported by a current research of the World Bank. **Results:** The results of adjusting the logistics efficiency indices in the formed supply chains of the Russian Federation based on operational information from survey results and several types of data are shown; The adjustment of logistics efficiency indices in the formed supply chains by rail is given; the corrective data affecting the values of logistics efficiency indices in the Russian Federation are systematized depending on the conditions affecting the decrease in logistics efficiency indices in the Russian Federation and the possibility of their growth. **Practical significance:** The results obtained are of an applied nature, since they propose and justify a number of measures that ensure the development of new methodological approaches to the formation of effective business models.

Keywords: Transport and logistics market, logistics efficiency index.

References

1. Gulyy I. M. Vliyaniye pokazateley effektivnosti logistiki, transportnoy mobil'nosti naseleniya i investitsiy v tsifrovuyu transportnyuyu infrastrukturu na parametry ustoychivogo razvitiya [The influence of efficiency indicators of logistics, transport mobility of the population and investments in digital transport infrastructure on the parameters of sustainable development]. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Economics of sustainable development]. 2021, Iss. 4(48), pp. 23–27. (In Russian)
2. Gulyy I. M. Metodologiya otsenki vliyaniya tsifrovyykh platform vzaimodeystviya uchastnikov mul'timodal'nykh perevozok gruzov na parametry mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Methodology for assessing the influence of digital platforms for interaction between participants in multimodal cargo transportation on the parameters of international transport corridors]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2021, Iss. 6, pp. 167–169. (In Russian)
3. Kurenkov P., Kharitonova M., Zakharov A. et al. Vliyaniye sanktsiy kollektivnogo Zapada na transportnyuyu logistiku Rossiyskoy Federatsii [The influence of sanctions of the collective West on transport logistics of the Russian Federation]. *Logistika* [Logistics]. 2023, Iss. 1(194), pp. 10–13. DOI: 10.54959/22197222_2023_01_10. (In Russian)
4. Yan Y. Research on the Innovation Path of Logistics Formats Based on 5G Technology. *Open Journal of Business and Management*, 2019, vol. 7, Iss. 4, pp. 1936–1942. DOI: 10.4236/ojbm.2019.74132.
5. Borisik M. P., Ivanova E. S., Ryumkina K. A. Sovremennyye problemy transportnoy logistiki RF [Modern problems of transport logistics of the Russian Federation]. *Elektronnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal "Ekonomika i menedzhment innovatsionnykh tekhnologiy"* [Electronic scientific and

practical journal “Economics and management of innovative technologies”]. 2022, Iss. 1. Available at: <https://ekonomika.snauka.ru/2022/01/17400> (accessed: October 24, 2023).

6. *Doklad Vsemirnogo banka “Indeks effektivnosti logistiki”*: The World Bank. Data. Logistics performance index: Quality of trade and transport-related infrastructure [World Bank report “Logistics Performance Index”: The World Bank. Data. Logistics performance index: Quality of trade and transport-related infrastructure]. Available at: <https://data.worldbank.org/indicator/LP.LPI.INFR.XQ?end=2018&start=2018&view=map> (accessed: October 24, 2023).

7. Central Intelligence Agency (CIA). The World Factbook. Country Comparison: Roadways. Available at: <https://web.archive.org/web/20170702023929/https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2085rank.html> (accessed: October 24, 2023).

8. Salas E. B. Rail freight volume transported in the U.S. 2002-2021 / E. B. Salas // Statista. 12.12.2022. Available at: <https://www.statista.com/statistics/245235/rail-freight-transportation-in-the-us/#statisticContainer> (accessed: October 24, 2023).

9. *Doklad Vsemirnogo banka “Srednee vremya vypolneniya importa dlya tsepohek postavok”*: The World Bank. Data. Lead time to import, median case [World Bank Report “Average Import Lead Time for Supply Chains”: The World Bank. Data. Lead time to import, median case]. Available at: https://data.worldbank.org/indicator/LP.IMP.DURS.MD?most_recent_value_desc=false&view=chart (accessed: October 24, 2023).

10. Domestic LPI, Environment and Institutions: Russia 2018. Available at: https://lpi.worldbank.org/domestic/environment_institutions/2018/C/RUS/C/CHN#chartarea (accessed: October 24, 2023).

11. He N., Wu W., Liu S. Relationship between Logistics Firm Size and Business Diversification: An Empirical Study of Chongqing, Area in China. *Open Journal of Statistics*, 2021, vol. 11, Iss. 1, pp. 1–18. DOI: 10.4236/ojs.2021.111001.

12. Dang K. B., Anikin B. A. Klyuchevye faktory razvitiya logisticheskoy sistemy ASEAN [Key factors in the development of the ASEAN logistics system]. *Vestnik universiteta* [University Bulletin]. 2022, Iss. 3, pp. 90–96. DOI: 10.26425/1816-4277-2022-3-90-96. (In Russian)

13. Young L., Berger P. Freight rebound hopes are fading under an inventory glut. *The Wall Street Journal*, 2023. Available at: <https://www.wsj.com/articles/freight-rebound-hopes-are-fading-under-an-inventory-glut-912995d2> (accessed: October 24, 2023).

Received: September 20, 2023

Accepted: October 19, 2023

Author’s information:

Natalia A. ZHURAVLEVA — Dr. Sci. in Economics, Professor

Vyacheslav M. SHAVSHUKOV — Dr. Sci. in Economics, Professor

Liana M. CHECHENOVA — Dr. Sci. in Economics, Associate Professor; liana1981-149@mail.ru

УДК 629.4.015:625.1.03

Определение оптимальных режимов резания при обточке железнодорожных колес

Д. П. Кононов, Ю. В. Гомонец

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

Для цитирования: Кононов Д. П., Гомонец Ю. В. Определение оптимальных режимов резания при обточке железнодорожных колес // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 137-145. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-137-145

Аннотация

Цель: Повышение стойкости режущего инструмента при восстановлении профиля поверхности катания железнодорожных колес за счет управления вибрациями системы «станок — инструмент — деталь». **Методы:** Исследовались вибрации, возникающие в процессе обточки поверхности катания вагонных колес при различных режимах резания. Для этого строилась матрица планирования эксперимента методом Бокса — Уилсона, в соответствии с которым изменяются все факторы по очереди (глубина резания, скорость резания, подача). По результатам каждой серии эксперимента выбирается математическая модель и оцениваются численные значения коэффициентов этого уравнения. В соответствии с принятыми в теории резания степенными зависимостями для проведенных экспериментов постулировалась математическая модель в виде логарифмического полинома ряда первой степени. Проводилась математическая обработка результатов измерений с помощью фрактальной размерности. Фрактальная размерность определялась методом нормированного размаха. **Результаты:** Установлено соответствие между стойкостью режущего инструмента и интенсивностью его колебаний при обточке железнодорожных колес. Получена математическая зависимость фрактальной размерности от режимов резания, позволяющая регулировать скорость резания или подачу в процессе восстановления поверхности катания колеса при наличии дефектов. Оптимальные режимы резания, позволяющие достичь заданного качества поверхности катания колеса за минимальное время, дают наибольшее значение фрактальной размерности. Наличие таких дефектов поверхности катания колеса, как ползуны, навары, выщербины, приводит к уменьшению фрактальной размерности. **Практическая значимость:** Определение фрактальной размерности в процессе обточки колесных пар дает возможность автоматически регулировать режимы резания для обеспечения заданного качества поверхности катания колеса и требуемой стойкости режущего инструмента.

Ключевые слова: Поверхность катания, стойкость, дефекты, режимы резания, колесо.

Введение

Повышение качества железнодорожных колес имеет большое значение для народного хозяйства нашей страны и позволяет экономить значительное количество материальных средств, обеспечивает надежность и безопасность эксплуатации. Современные условия работы железнодорожного транспорта постоянно ужесточаются: возрастают жесткость пути, скорости движения поездов, осевые нагрузки [1–4]. Все это свидетельствует об актуальности данной работы.

Большое влияние на надежность и долговечность колес оказывают геометрические и механические параметры профиля поверхности катания, который регламентируется стандартом. ГОСТ 10791—2011 предъявляет к точности размеров железнодорожных колес, к шероховатости их поверхности весьма высокие требования, удовлетворить которые возможно только механической обработкой, которая имеет ряд особенностей. К ним относятся колебания припуска на обработку, вызванные как особенностью профиля колеса, так и износом в процессе эксплуатации, а также значительные колебания твердости обрабатываемого материала, зависящие от химического состава данной плавки, особенности технологии изготовления заготовки, наличия дефектов поверхности катания. Все это вызывает изменение тепловых, силовых нагрузок в процессе резания и вибрации в широком диапазоне частот, отрицательно влияющих на износостойкость режущего инструмента, оборудование и производительность обработки [5].

Влияние колебаний на износостойкость инструмента

Основным критерием обрабатываемости любых материалов является скорость резания, допускаемая режущим инструментом при определенной стойкости и других постоянных параметрах. В настоящее время при определении обрабатываемости материалов используются методы стойкостных испытаний, торцевого точения, температурных испытаний и др.

Среди множества характеристик процесса резания в качестве оптимальных критериев были взяты износостойкость режущего инструмента и высокое качество поверхностного слоя детали. Это достигается в тот момент, когда тангенциальная сила резания P_z , являющаяся функцией от скорости резания, становится стабильной.

Известно, что прочность и износостойкость инструмента зависят от колебаний в системе «станок — инструмент — деталь» (СИД), возникающих во время точения. При изменении параметров режима резания меняются спектр вибраций системы, а также его отдельные частотные составляющие [6–8]. В работе [9] установлено, что превышение определенных значений амплитуды колебаний, которые можно назвать критическими, приводит к сильному уменьшению износостойкости инструмента. При этом данное явление наблюдается при любой частоте. Чем выше частота колебаний, тем меньше критические значения амплитуды. Значения критических амплитуд колебаний, возникающих при обработке стали 45 твердостью 190 НВ твердым сплавом марки Т15К6, приведены в табл. 1. Режим резания: $V = 2,15$ м/с, $S = 2 \cdot 10^{-4}$ м/об, $t = 5 \cdot 10^{-4}$ м.

ТАБЛИЦА 1. Значения критических амплитуд колебаний

Частота колебаний, кГц	10–15	7–10	3,5–4,5	2–3
Амплитуда колебаний, м	$(7–9)10^{-8}$	$(9–10)10^{-8}$	$(2–4)10^{-7}$	$(8–12)10^{-7}$

Износостойкость резцов можно определить по формуле [10]:

$$T = \Theta A^m e^{-nA},$$

где T — износостойкость режущего инструмента, мин;

A — амплитуда колебаний, мкм;

Θ, m, n — коэффициенты, учитывающие условия резания, обрабатываемый и инструментальный материал.

Эту формулу можно применять в диапазоне частот от 150 до 3000 Гц. Она позволяет оценить величину износа режущего инструмента при разной амплитуде вибраций. Следующие причины приводят к снижению износа режущей кромки:

- повышенная пластическая деформация из-за большой амплитуды колебаний;
- пониженный коэффициент трения по задней и передней поверхностям режущего инструмента;
- отвод стружки при больших амплитудах колебаний становится проще;
- уменьшаются силы резания и др.

В то же время вибрации инструмента приводят к снижению усталостной прочности и последующему разрушению режущей кромки.

В связи с этим нужно сказать, что для обработки каждой конкретной детали на определенном станке существует оптимальная амплитуда колебаний, при которой износостойкость режущего инструмента максимальная. И для этой амплитуды необходимо определять соответствующие режимы резания.

Экспериментальные исследования

Зависимость износостойкости режущего инструмента от вибраций можно определять разными способами. В данной работе было принято решение исследовать фрактальную размерность возникающих вибраций, что позволяет определить статистические характеристики случайным образом сформированной структуры [11, 12]. Чем больше фрактальная размерность, тем выше вибрации.

Существует несколько методов определения фрактальной размерности. Для исследования вибраций наиболее удобным является метод нормированного размаха. При его применении первоначально необходимо определить показатель Херста.

Для этого строится функциональная зависимость отношения размаха колебаний к среднеквадратическому отклонению (R/S) от времени τ :

$$R(\tau) / S(\tau) \sim \tau^H,$$

где H — показатель Херста.

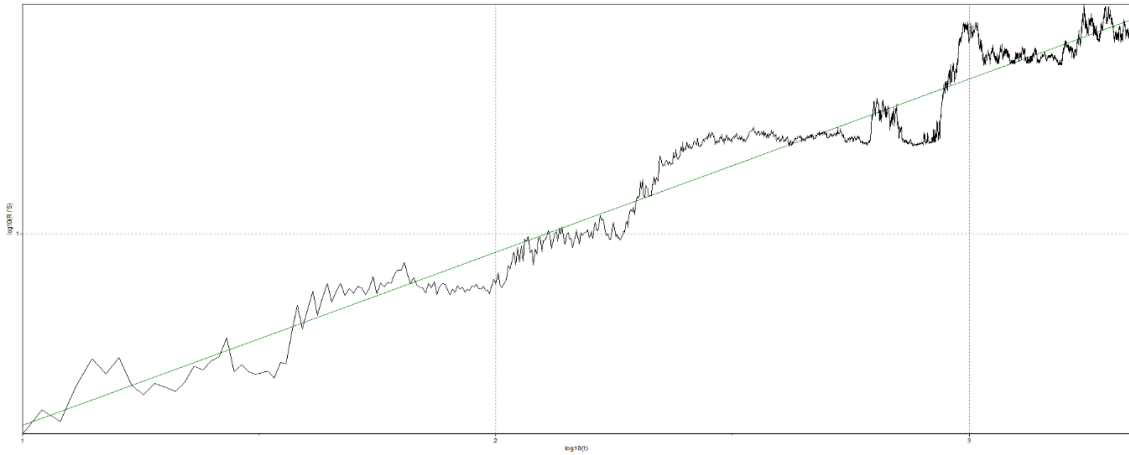


Рис. 1. Общий вид зависимости, по которой определяется показатель Херста

Данная зависимость строится в двойном логарифмическом масштабе (по оси абсцисс и ординат).

Следующим этапом является аппроксимация. Применяем линейную аппроксимацию. Тангенс угла наклона полученной прямой и является показателем Херста H (рис. 1).

На заключительном этапе, исходя из полученного значения показателя Херста, находится фрактальная размерность по формуле:

$$D = 2 - H .$$

Зависимость фрактальной размерности от глубины резания, подачи и скорости резания выражается формулой вида:

$$D(t, S, V) = C_D t^{x_D} S^{y_D} V^{z_D} ,$$

где C_D — коэффициент, учитывающий свойства материала заготовки и условия обработки;

x_D, y_D, z_D — показатели степени влияния глубины резания, подачи и скорости резания на фрактальную размерность.

Для получения данной зависимости использовался метод планирования эксперимента Бокса — Уилсона. При этом принималась математическая модель в виде логарифмического полинома первой степени.

Для определения фрактальной размерности он выглядит следующим образом:

$$\ln D = \ln C_D + x_D \cdot \ln t + y_D \cdot \ln S + z_D \cdot \ln V .$$

Для определения фрактальной размерности был проведен эксперимент по измерению вибраций, возникающих в процессе обточки колесных пар, на различных режимах резания при наличии дефектов и без них.

ТАБЛИЦА 2. Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Размерность	Уровни факторов	
		нижний	верхний
Глубина резания, t	мм	4	5
Подача, S	мм/об	0,7	1,3
Скорость резания, V	об/мин	9,6	12,8



Рис. 2. Виброанализатор

Эксперимент проводился с помощью многофакторного анализа. Суть его состоит в том, что одновременно варьируются все заданные факторы. Каждый из факторов варьируется на двух уровнях — нижний и верхний (табл. 2).

Обрабатывались вагонные колеса, изготовленные из стали марки 2 ГОСТ 10791—2011 с дефектами поверхности катания и без них. Для обточки использовался колесотокарный станок UBB-112. В качестве режущего инструмента применялась тангенциальная пластина LNUX 301940 23 из твердого сплава марки КС-35.

Для измерения вибраций использовался двухканальный диагностический виброанализатор КОН.ТЕСТ С9000 с пьезоэлектрическими датчиками вибрации СТС АС102-1А (рис. 2). Датчик вибрации крепился на державку резца с помощью магнита.

Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

По результатам эксперимента и произведенных расчетов была получена функциональная зависимость фрактальной размерности от режимов резания:

$$D = e^{0,47113} t^{-0,01398} S^{-0,04649} V^{-0,05033}.$$

Применение полученной зависимости дает возможность управлять режимами резания автоматически в процессе обточки колес без вмешательства оператора.

ТАБЛИЦА 2. Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер опыта	X_0	X_1		X_2		X_3		Среднее значение фрактальной размерности, \bar{D}
	код	код	t , мм	код	S , мм/об	код	V , об/мин	
1	+	+	5	–	0,7	–	9,6	1,42065
2	+	+	5	+	1,3	–	9,6	1,44905
3	+		4	–	0,7	–	9,6	1,3781
4	+	–	4	+	1,3	–	9,6	1,36521
5	+	+	5	–	0,7	+	12,8	1,39264
6	+	+	5	+	1,3	+	12,8	1,30417
7	+	–	4	–	0,7	+	12,8	1,46166
8	+	–	4	+	1,3	+	12,8	1,37678

Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальные режимы резания, позволяющие достичь заданного качества поверхности катания колеса за минимальное время, дают наибольшее значение фрактальной размерности.

2. Наличие таких дефектов поверхности катания колеса, как ползуны, навары, выщербины, приводит к уменьшению фрактальной размерности.

3. Определение фрактальной размерности в процессе обточки колесных пар дает возможность автоматически регулировать режимы резания для обеспечения заданного качества поверхности катания колеса и требуемой стойкости режущего инструмента.

Библиографический список

1. Горячева И. Г. О пределах системы «колесо — рельс» в условиях тяжеловесного движения (трибологический аспект) / И. Г. Горячева, С. М. Захаров // Вакуумно-левитационные транспортные системы: научная основа, технологии и перспективы для железнодорожного транспорта. Коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». — М.: ООО «РАС», 2017. — С. 27–42.

2. Захаров С. М. Особенности механизмов и причин возникновения контактно-усталостных повреждений колес железнодорожного подвижного состава / С. М. Захаров // Трение и смазка в машинах и механизмах. — М.: Инновационное машиностроение, 2007. — № 3. — С. 40–45.

3. Воробьев А. А. Разработка мероприятий по повышению ресурса железнодорожных колес с выщербинами / А. А. Воробьев, О. А. Коноград, Э. Ю. Чистяков // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте: материалы V Всероссийской научно-практической конференции. — Самара: СамГУПС, 2023. — С. 168–171.

4. Валинский О. С. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава / О. С. Валинский, А. А. Воробьев, С. И. Губенко и др. — Казань: Бук, 2022. — 324 с.
5. Воробьев А. А. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог / А. А. Воробьев, С. И. Губенко, И. А. Иванов и др. — М.: ИНФРА-М, 2011. — 264 с.
6. Диллон Дж. Сингх. Вопросы исследования динамического качества режущего инструмента: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Дж. Сингх. Диллон. — М., 1973. — 27 с.
7. Определение динамического качества расточных и проходных резцов и методы усовершенствования их конструкции / Отчет по НИР № 271, УДН, 1974. — 150 с.
8. Системный анализ основных параметров процесса резания и разработка системы показателей, характеризующих статическое и динамическое качество системы СПИД при назначении режимов резания / Отчет, № регистр. 78009181. — М.: УДН, 1979. — 115 с.
9. Шустиков А. Д. Анализ качества сборных проходных резцов / А. Д. Шустиков. — М.: НИИМаш, 1981. — 62 с.
10. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков. — Л.: Машиностроение, 1986. — 174 с.
11. Международный междисциплинарный симпозиум ФиПС-01: Фракталы и прикладная синергетика // II Труды докладов конференции. — М.: Московский государственный областной университет, 2005. — 345 с.
12. Giona M. Multifractal analysis of chaotic power spectra / M. Giona, P. Piccirilli, V. Cimagalli // J. Phys. A. — 1991. — Vol. 24. — Iss. 1. — Pp. 367–373.

Дата поступления: 07.09.2023

Решение о публикации: 16.10.2023

Контактная информация:

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

ГОМОНЕЦ Юлия Витальевна — homonets@mail.ru

Determination of Optimal Cutting Modes when Turning Railway Wheels

D. P. Kononov, Yu. V. Homonets

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

For citation: Kononov D. P. Homonets Yu. V. Determination of Optimal Cutting Modes when Turning Railway Wheels. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 137-145. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-137-145

Summary

Purpose: Increasing the durability of the cutting tool when reprofiling the tread of the railway wheels by controlling the vibrations of the “machine-tool-workpiece” system. **Methods:** Vibrations arising in the

process of turning the tread of car wheels under various cutting modes have been investigated. To do this, a matrix of experiment planning has been built using the Box-Wilson method, according to which all factors change in turn (cutting depth, cutting speed, feed). Based on the results of each series of the experiment, a mathematical model is selected and the numerical values of the coefficients of this equation are estimated. In accordance with the power dependences accepted in the theory of cutting, a mathematical model in the form of a logarithmic polynomial of a series of the first degree has been postulated for the experiments carried out. Mathematical processing of measurement results has been carried out using fractal dimension. The fractal dimension has been determined by the standardized range method. **Results:** A correspondence has been established between the durability of the cutting tool and the intensity of its vibrations when turning railway wheels. The mathematical dependence of the fractal dimension on the cutting modes is obtained, which allows to adjust the cutting speed or feed during the reprofiling the tread of the wheel when there are defects. Optimal cutting modes, which allow to achieve a given quality of the rolling surface of the wheel in the shortest time, give the highest value of the fractal dimension. The presence of such defects of the wheel tread, such as slid flat, buildups, shellings, leads to a decrease in the fractal dimension. **Practical significance:** The determination of the fractal dimension in the process of turning wheel pairs makes it possible to automatically adjust the cutting modes to ensure a given quality of the wheel tread and the required durability of the cutting tool.

Keywords: Tread, durability, defects, cutting modes, wheel.

References

1. Goryacheva I. G., Zakharov S. M. O predelakh sistemy “koleso — rel’s” v usloviyakh tyazhelovesnogo dvizheniya (tribologicheskiy aspekt) [On the limits of the “wheel — rail” system in conditions of heavy traffic (tribological aspect)]. *Vakuumno-levitatsionnye transportnye sistemy: nauchnaya osnova, tekhnologii i perspektivy dlya zheleznodorozhnogo transporta. Kollektivnaya monografiya chlenov i nauchnykh partnerov Ob’edinennogo uchenogo soveta OAO “RZhD”* [Vacuum levitation transport systems: scientific basis, technologies and prospects for railway transport. Collective monograph of members and scientific partners of the Joint Academic Council of JSC Russian Railways]. Moscow: OOO “RAS” Publ., 2017, pp. 27–42. (In Russian)
2. Zakharov S. M. Osobennosti mekhanizmov i prichin vozniknoveniya kontaktno-ustalostnykh povrezhdeniy koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Features of mechanisms and causes of contact-fatigue damage to wheels of railway rolling stock]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmach* [Friction and lubrication in machines and mechanisms]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2007, Iss. 3, pp. 40–45. (In Russian)
3. Vorob’ev A. A., Konogray O. A., Chistyakov E. Yu. Razrabotka meropriyatiy po povysheniyu resursa zheleznodorozhnykh koles s vyshcherbinami [Development of measures to increase the service life of railway wheels with holes]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie na transporte: materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Mechatronics, automation and control in transport: materials of the V All-Russian scientific and practical conferences]. Samara: SamGUPS Publ., 2023, pp. 168–171. (In Russian)
4. Valinskiy O. S., Vorob’ev A. A., Gubenko S. I. et al. *Povyshenie rabotosposobnosti kolesnykh par podvizhnogo sostava* [Increasing the performance of wheel pairs of rolling stock]. Kazan’: Buk Publ., 2022, 324 p. (In Russian)

5. Vorob'ev A. A., Gubenko S. I., Ivanov I. A. et al. *Resurs i remontoprigradnost' kolesnykh par podvizhnogo sostava zheleznnykh dorog* [Resource and maintainability of wheel pairs of rolling stock of railways]. Moscow: INFRA-M Publ., 2011, 264 p. (In Russian)
6. Dillon Dzh. Singkh. *Voprosy issledovaniya dinamicheskogo kachestva rezhushchego instrumenta: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Research issues of the dynamic quality of cutting tools: abstract of thesis. diss. ...cand. tech. Sciences]. Moscow, 1973, 27 p. (In Russian)
7. *Opreделение dinamicheskogo kachestva rastochnykh i prokhodnykh reztsov i metody usovershenstvovaniya ikh konstruksii. Otchet po NIR № 271, UDN* [Determination of the dynamic quality of boring and passing cutters and methods for improving their design / Research report No. 271, UDN]. 1974, 150 p. (In Russian)
8. *Sistemnyy analiz osnovnykh parametrov protsessa rezaniya i razrabotka sistemy pokazateley, kharakterizuyushchikh staticheskoe i dinamicheskoe kachestvo sistemy SPID pri naznachenii rezhimov rezaniya. Otchet, № registr. 78009181* [System analysis of the main parameters of the cutting process and development of a system of indicators characterizing the static and dynamic quality of the AIDS system when assigning cutting modes. Report, register № 78009181]. Moscow: UDN Publ., 1979, 115 p. (In Russian)
9. Shustikov A. D. *Analiz kachestva sbornykh prokhodnykh reztsov* [Analysis of the quality of prefabricated cutters]. Moscow: NIIMash Publ., 1981, 62 p. (In Russian)
10. Zharkov I. G. *Vibratsii pri obrabotke lezviynym instrumentom* [Vibrations during processing with a blade tool]. L.: Mashinostroenie Publ., 1986, 174 p. (In Russian)
11. *Mezhdunarodnyy mezhdistsiplinarnyy simpozium FiPS-01: Fraktaly i prikladnaya sinergetika* [International interdisciplinary symposium FiPS-01: Fractals and applied synergetics]. *II Trudy dokladov konferentsii* [II Proceedings of conference reports]. Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy oblastnoy universitet Publ., 2005, 345 p. (In Russian)
12. Giona M., Piccirilli P., Cimagalli V. Multifractal analysis of chaotic power spectra. *J. Phys. A*, 1991, vol. 24, Iss. 1, pp. 367–373.

Received: September 07, 2023

Accepted: October 16, 2023

Author's information:

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

Yuliya V. HOMONETS — homonets@mail.ru

УДК 621.316

Построение системы увеличенного автономного хода с ограничением потребляемого тока из контактной сети

В. А. Шаряков¹, О. Л. Шарякова², К. В. Шаряков³, В. А. Лебедева⁴

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

²Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (ВШТЭ СПбГУПТД), Российская Федерация, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4

³Санкт-Петербургское государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение Академия транспортных технологий, Российская Федерация, 192102, Санкт-Петербург, ул. Салова, 63

⁴ООО «Научно-производственное предприятие «ЭПРО», Российская Федерация, 195253, Санкт-Петербург, дор. Салтыковская, 18, Литера М

Для цитирования: Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Шаряков К. В., Лебедева В. А. Построение системы увеличенного автономного хода с ограничением потребляемого тока из контактной сети // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 146-157. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157

Аннотация

Цель: Показать необходимость ограничения токов, потребляемых из контактной сети, и обосновать возможность такого ограничения, используя литий-ионную тяговую аккумуляторную батарею в качестве дополнительного источника электрической энергии. Рассмотреть возможность ограничения влияния на контактную сеть потребляемых токов на троллейбусах с увеличенным автономным ходом за счет их снижения при использовании литий-ионной тяговой аккумуляторной батареи. **Методы:** Использование известных аналитических выражений и результатов заездов, полученных при эксплуатации троллейбусов с увеличенным автономным ходом на городских линиях, и результатов опытных заездов троллейбуса с увеличенным автономным ходом, у которого схема силовой части тягового привода в качестве дополнительного источника энергии использует тяговую аккумуляторную батарею. **Результаты:** Показано, что предложенная в работе схема силовой части тягового привода позволяет ограничить потребляемый ток из контактной сети; дополнительно выявлено, что при такой реализации при торможении троллейбуса не происходит увеличение напряжения в контактной сети. **Практическая значимость:** Показано, что предложенная схема силовой части тягового привода позволяет ограничить влияние потребляемого тока на контактную сеть за счет его снижения и, как следствие, уменьшить пульсации напряжения в контактной сети.

Ключевые слова: Ограничение потребляемого тока, электрический подвижной состав, городской электротранспорт, электробус, тяговый электропривод, рекуперативное торможение, накопитель энергии, неравномерность энергопотребления, тяговая аккумуляторная батарея, литий-ионная батарея.

В настоящее время отмечается тенденция к закупкам нового подвижного состава, что связано с принятием национального проекта «Безопасные качественные дороги», в рамках которого запланировано обновление 1,5 тыс. единиц подвижного состава городского электротранспорта к 2024 году. Многие регионы

проявляют интерес к закупкам электрического подвижного состава — трамвайных вагонов и троллейбусов.

Интерес к троллейбусам обусловлен их экономической эффективностью в рамках жизненного цикла (рис. 1) [1]. Как видно из графиков, затраты на эксплуатацию обыкновенных троллейбусов на 6 % меньше по сравнению с автобусами на компримированном природном газе (КПГ), а затраты на эксплуатацию троллейбусов с увеличенным автономным ходом (УАХ) практически соизмеримы с затратами на эксплуатацию автобусов (КПГ). Затраты на содержание электробусов ОРС, получивших распространение в г. Москве, превышают содержание дизельных автобусов на 8 %, автобусов (КПГ) на 22 %, обыкновенных троллейбусов на 26 % и на 23 % троллейбусов УАХ.

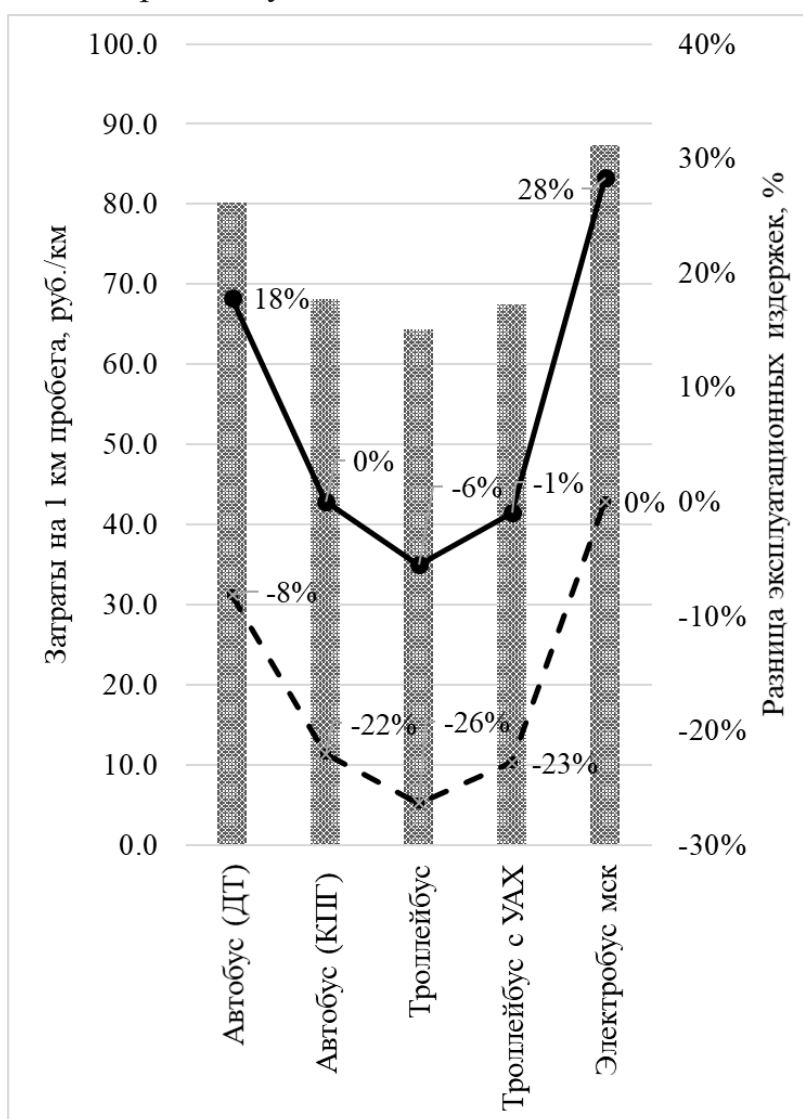


Рис. 1. Экономическая эффективность троллейбусного транспорта в рамках жизненного цикла: 15 лет в расчете на 1 км пробега: (—) — разница эксплуатационных издержек по сравнению с автобусами (КПГ); (- - -) — разница эксплуатационных издержек по сравнению с электробусами (мск)

Развитие технологий, обеспечивающих сохранение электрической энергии — литий-ионные аккумуляторные батареи, суперконденсаторы — делают доступным закупки автономного электрического подвижного состава — электробусов, которые в зависимости от количества запасаемой энергии можно разделить на следующие группы (рис. 2) [1].

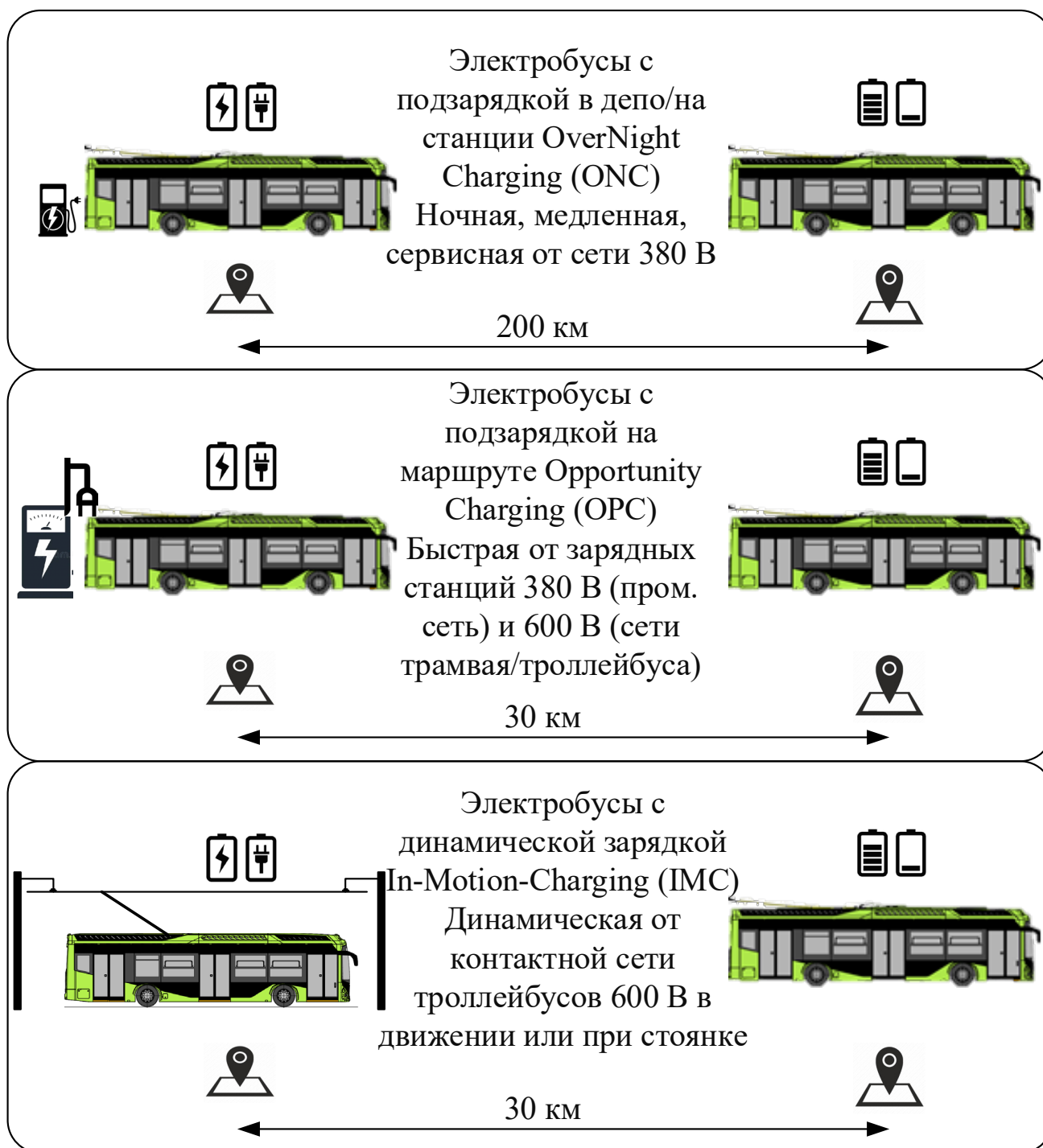


Рис. 2. Классификация электробусов

Электробусы ОНС обладают значительным автономным ходом и требуют для зарядки специальных станций, устанавливаемых на конечных остановках и депо, и выделения соответствующих электромощностей для обеспечения процессов зарядки.

Широкое распространение получили троллейбусы с увеличенным автономным ходом (ТУАХ), первое коммерческое применение которых началось в Санкт-Петербурге в 2017 г. В классификации (рис. 2) такие троллейбусы называются электробусами ИМС.

Распространение ТУАХ объясняется тем, что такие электробусы не требуют создание новой инфраструктуры и могут работать как на старых линиях в режиме троллейбуса, так и на линиях без контактной сети в режиме электробуса — автономном ходе.

На рис. 3 показаны изменения напряжения КС, потребляемого тока тяговым преобразователем (ТП), напряжения ТАБ и скорости при движении троллейбуса. Данные для графиков на рис. 3 и последующих получены при расшифровке архивов движения троллейбусов по городским линиям.

Отметим, что в большинстве реализаций ТУАХ накопитель электрической энергии (НЭЭ) аккумулирует энергию, получаемую от контактной сети (КС) в режиме заряда тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ). Часть энергии рекуперации также используется для заряда НЭЭ. После окончания заряда ТАБ энергия рекуперации отдается в КС или гасится на тормозных реостатах (рис. 3).

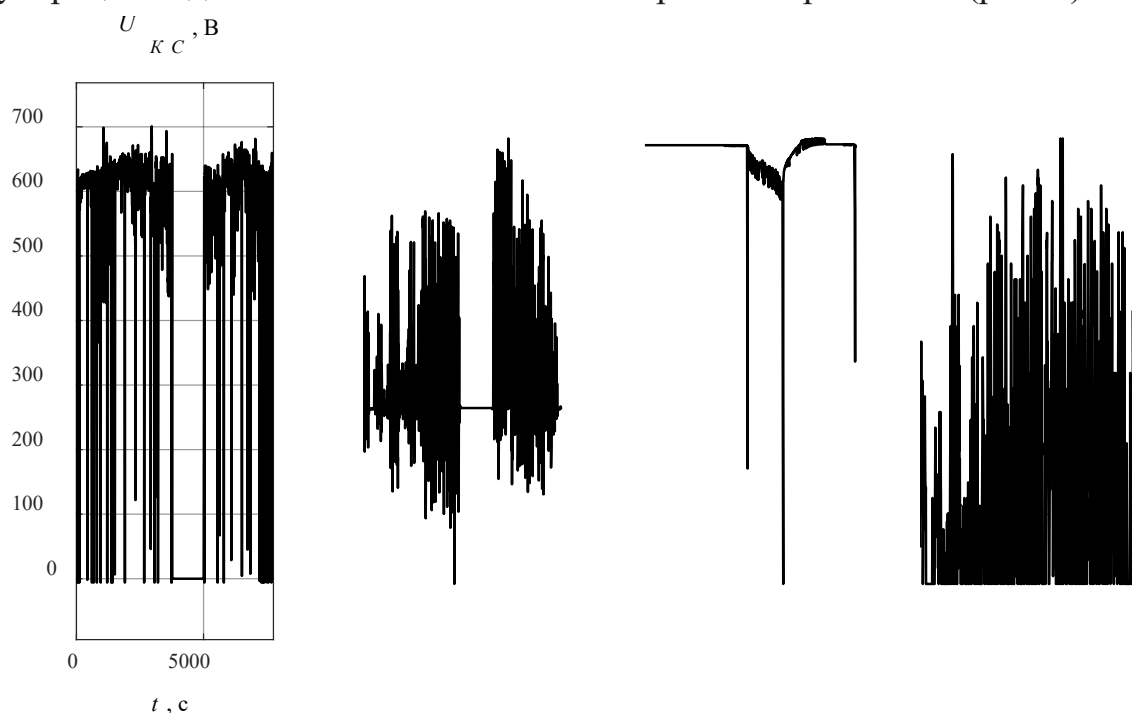


Рис. 3. Графики изменения напряжения КС, потребляемого тока тяговым преобразователем (ТП), напряжения ТАБ и скорости при движении троллейбуса с увеличенным автономным ходом (ИМС) при питании от контактной сети и ТАБ

Как видно из рис. 3, для контактной сети ТУАХ (ИМС) по своему влиянию практически не отличается от обычного ЭПС, однако после режима «автономный ход» увеличивается потребление тока, обусловленное необходимостью заряда ТАБ. Средний ток, потребляемый троллейбусом при движении в режиме тяги при заряде ТАБ, будет:

$$I_{\text{ТягаСред}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T I_{\text{КС}}(t) \cdot dt \approx 70 \text{ А.} \quad (1)$$

Следовательно, в отношении ТУАХ (ИМС) можно сделать те же выводы о негативном влиянии на КС [1–4], что и для современного ЭПС, оснащенного транзисторным тяговым преобразователем, в части неравномерности потребления электроэнергии, завышения напряжения контактной сети, импульсного изменения потребляемого тока и т. д.

В работах, например [1, 3–6], отмечается, что для снижения негативного влияния на контактную сеть на ЭПС можно использовать накопитель электрической энергии, который устанавливается на ЭПС. Положительное отличие ТУАХ (ИМС) от обыкновенного ЭПС заключается в том, что накопитель электрической энергии (НЭЭ) уже установлен для обеспечения автономного хода. Покажем, что данного накопителя достаточно для снижения пульсаций и для ограничения пиков в потребляемом токе.

Необходимую энергию для разгона ЭПС можно определить по следующим формулам:

$$\begin{cases} E_{\text{ПОТ}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{ЭПС}} \cdot V_{\text{max}}^2 / \eta_{\text{ЭПС}}, \\ E_{\text{ПОТ}} = \int U_{\text{КС}}(t) \cdot I_{\text{КС}}(t) \cdot dt \end{cases}, \quad (2)$$

где $m_{\text{ЭПС}}$ — масса ЭПС;

V_{max} — максимальная скорость ЭПС, до которой произошел разгон в текущем цикле;

$\eta_{\text{ЭПС}}$ — КПД тяговой системы ЭПС;

$U_{\text{КС}}$ — напряжение контактной сети;

$I_{\text{КС}}$ — ток контактной сети, потребляемый при разгоне ЭПС.

Из рис. 4 следует, что на один цикл разгона затрачивается 0,8 кВтч энергии, что при номинальной емкости ТАБ 32 кВт · ч составляет около 3 % запасенной энергии.

На рис. 5 показаны графики изменения напряжения ТАБ, степени заряда ТАБ (SOC) при разгоне ТУАХ.

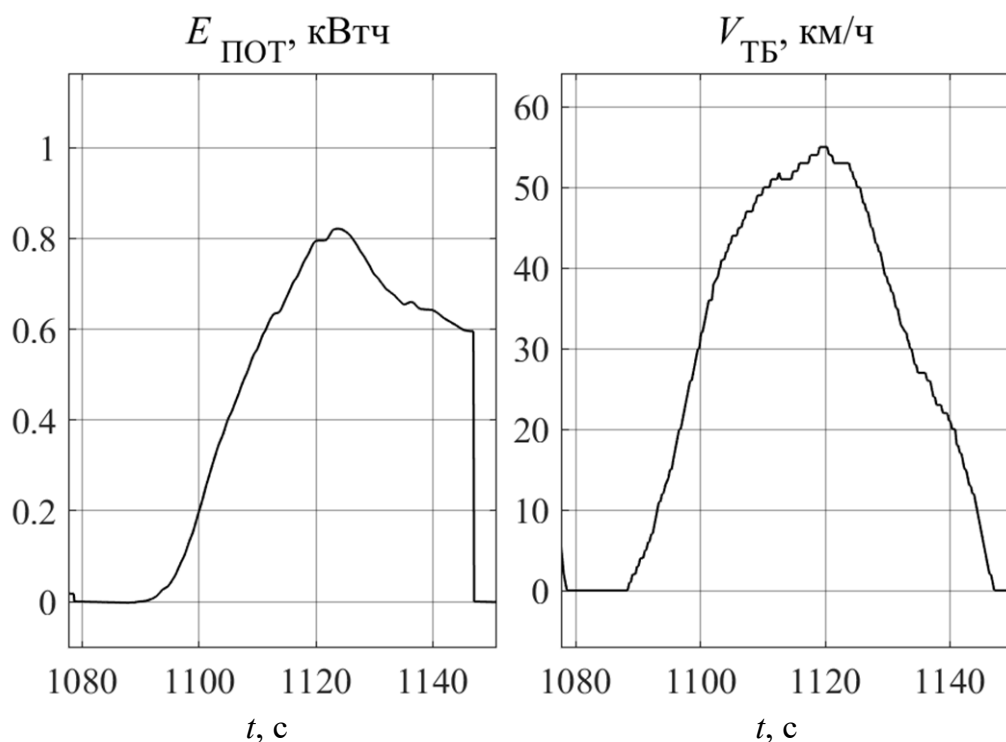


Рис. 4. График изменения потребляемой энергии и скорости при разгоне троллейбуса

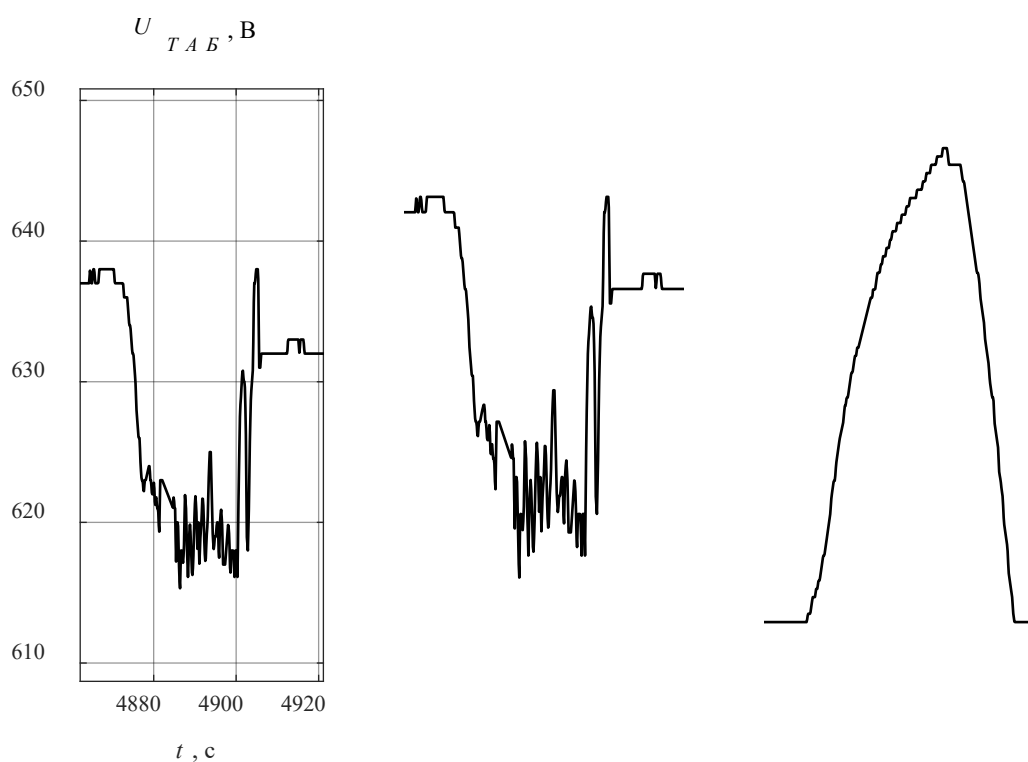


Рис. 5. Графики изменения напряжения ТАБ, степени заряда ТАБ и скорости при движении троллейбуса с увеличенным автономным ходом (ИМС) при питании от контактной сети и ТАБ

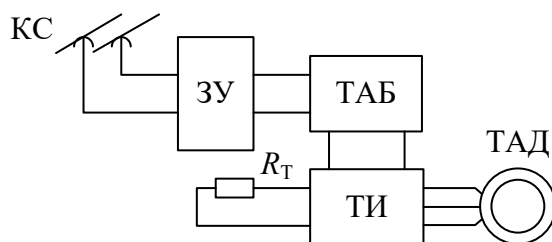


Рис. 6. Функциональная схема силовой части тягового привода ТУАХ со сниженным влиянием на КС: ЗУ — зарядное устройство для ТАБ; ТАБ — тяговая аккумуляторная батарея; ТИ — тяговый инвертор; ТАД — тяговый асинхронный двигатель.

Как видно из рис. 5, при разгоне мгновенно происходит снижение SOC на 10–15 % с последующим восстановлением 7–10 %, поэтому средний разряд соответствует 3 %.

Циклы разряд-заряд длительностью менее одной минуты не учитываются при расчете числа жизненных циклов ТАБ.

Для снижения неравномерности нагрузки и максимальных токов у троллейбусов с увеличенным автономным ходом (ИМС) необходима перекомпоновка силовой части тягового привода, как показана на рис. 6.

При такой реализации образуются три независимых потока энергии во время движения и стоянки троллейбуса (рис. 7), которые включают в себя:

Тяговую аккумуляторную батарею, тяговый инвертор и тяговый двигатель. Здесь в качестве источника энергии выступает ТАБ, при разгоне троллейбуса энергия передается в ТАД.

Тяговый двигатель, тяговый инвертор и тяговую аккумуляторную батарею. Источником выступает ТАД, при торможении передающий через ТИ энергию в ТАБ.

Контактную сеть, зарядное устройство и тяговую аккумуляторную батарею. Задача зарядного устройства восполнить затраченную на разгон энергию тяговой батареи. Величина тока заряда будет определяться допустимым током ТАБ.

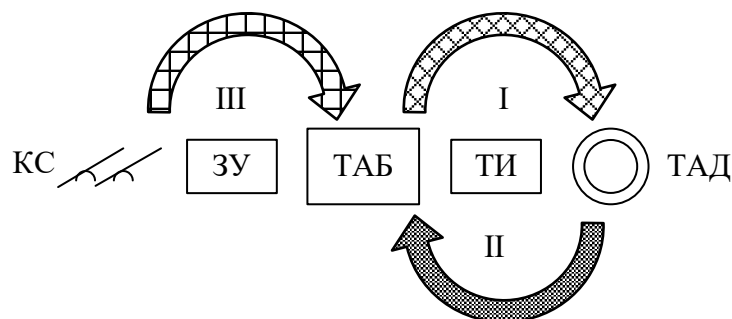


Рис. 7. Потoki энергии при движении ТУАХ при реализации предложенной функциональной схемы

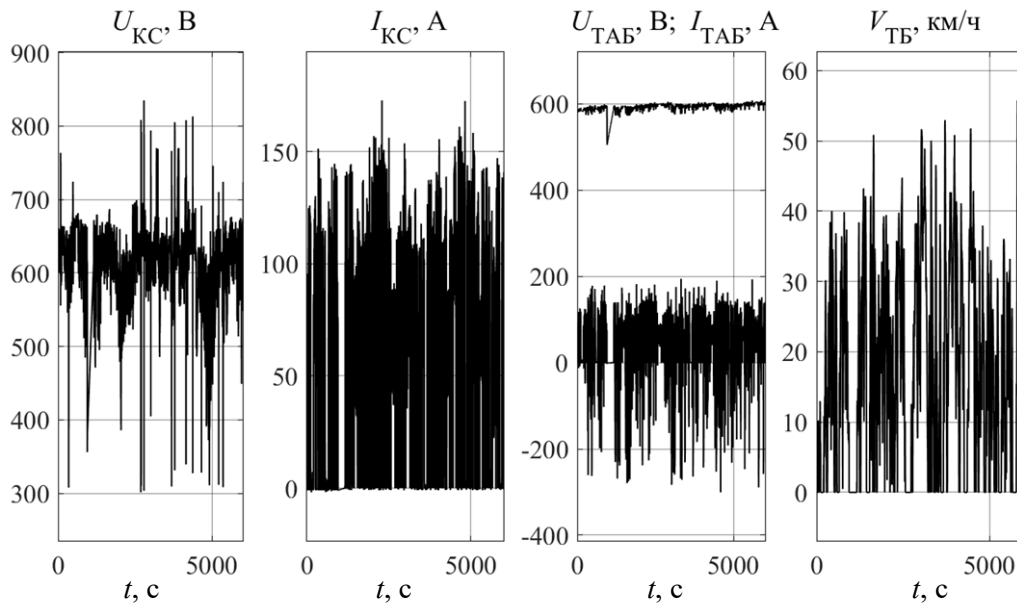


Рис. 8. Графики изменения напряжения и тока КС, напряжения и тока ТАБ, скорости при движении троллейбуса с реализованной функциональной схемой

На рис. 8 показаны графики изменения напряжения и тока КС, напряжения и тока ТАБ, скорости при движении троллейбуса с реализованной функциональной схемой рис. 6.

Как видно из полученных графиков (рис. 8), на интервале движения более 5000 с (более часа) происходил дозаряд ТАБ, но при этом ток, потребляемый из КС, не превышал 170–180 А.

На рис. 9 показан интервал, на котором троллейбус разгоняется и останавливается. Как видно из графиков, во время разгона и стоянки происходит заряд ТАБ. При торможении для заряда ТАБ используется рекуперативная энергия, на этом этапе энергия от контактной сети не используется.

Таким образом, происходит ограничение потребляемого тока, так как ТАБ выступает основным источником питания для тягового преобразователя. Также видно, что во время разгона троллейбуса ТАБ разряжается — уменьшается напряжение ТАБ — $U_{ТАБ}$. При торможении происходит заряд ТАБ — $U_{ТАБ}$ растет.

Средний ток, потребляемый из сети, будет:

$$I_{ТягаСред} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T I_{КС}(t) \cdot dt \approx 50 \text{ А.} \quad (3)$$

На рис. 10 показаны гистограммы распределения потребляемого тока из КС для традиционной схемы ТУАХ и предложенной (рис. 6), из которых видно, что использование предложенной силовой части тягового электропривода значительно уменьшает разброс в потребляемом из КС токе.

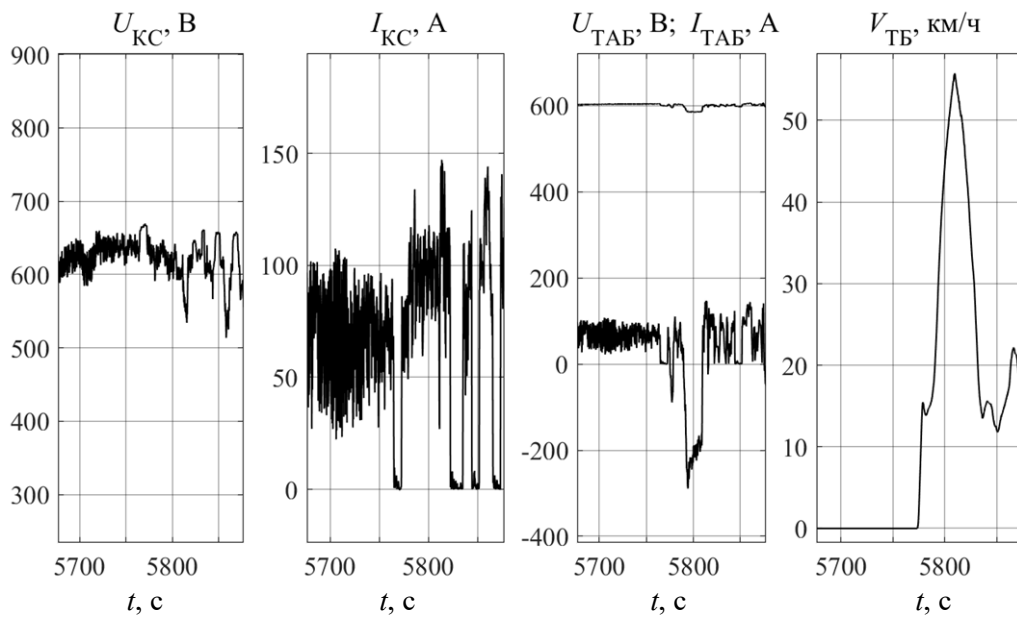


Рис. 9. Графики изменения напряжения и тока КС, напряжения и тока ТАБ, скорости при движении троллейбуса с реализованной функциональной схемой (300 с)

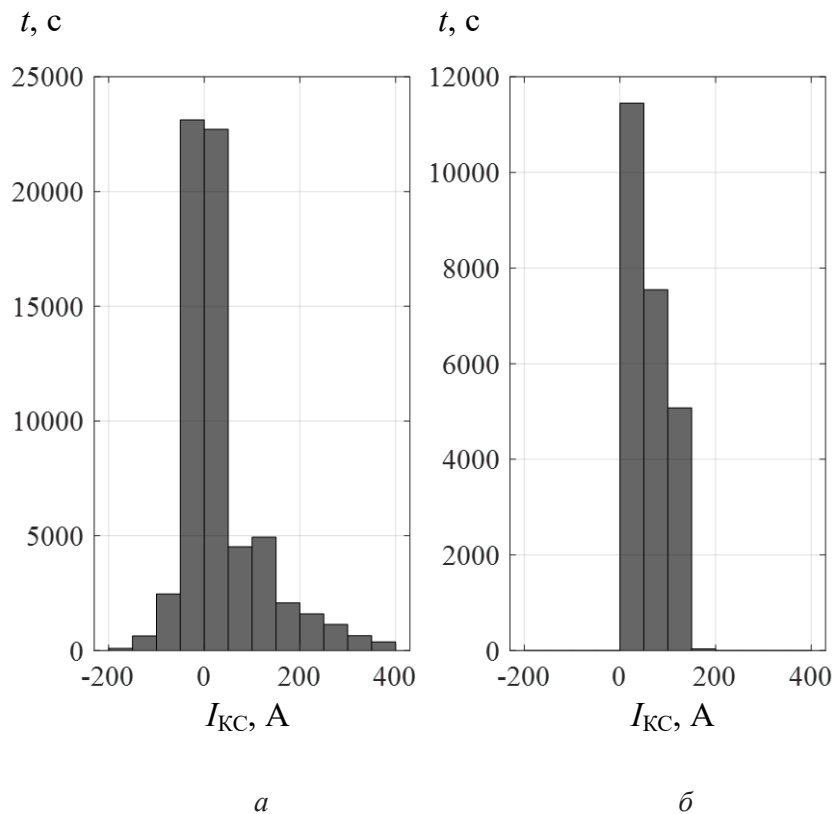


Рис. 10. Гистограммы распределения потребляемых токов из контактной сети: *a* — традиционная схема ТУАХ; *б* — предложенная схема силовой части

Результаты испытаний предложенной силовой схемы показали, что использование ТАБ в качестве постоянного источника энергии на троллейбусе УАХ (ИМС) позволяет сократить пульсации, уменьшить разброс и снизить максимальные значения токов, потребляемых из контактной сети, снижает средние показатели потребляемого из контактной сети тока. Отметим, что практически вся энергия, генерируемая при торможении, запасается в ТАБ, что разгружает контактную сеть от передачи энергии до питающих фидеров и от перераспределения ее между ЭПС, и снижает величины потребляемых токов от тяговой подстанции.

Библиографический список

1. Фролов Д. С. Актуальность троллейбусных технологий в развитии городского электротранспорта / Д. С. Фролов // Научно-практическая конференция МАП ГЭТ, приуроченная к 75-летию Казанского троллейбуса: информационный бюллетень. — 2023. — № 36.
2. Шаряков В. А. Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава / В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, А. В. Агунов и др. // Электротехника. — 2018. — № 10. — С. 55–59.
3. Шаряков В. А. Исследование влияния накопителя электрической энергии на показатели движения и неравномерности энергопотребления электрического подвижного состава / В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, И. Г. Киселев и др. // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2019. — № 5.
4. Шаряков В. А. Об автоматической стабилизации напряжения контактной сети электрического подвижного состава / В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, Д. А. Ковалев и др. // Электротехника. — 2021. — № 4. — С. 36–41.
5. Ткачук А. А. Стабилизация напряжения контактной сети трансформаторно-выпрямительным агрегатом тяговой подстанции постоянного тока 3,3 кВ: автореф. / А. А. Ткачук. — СПб., 2017. — 16 с.
6. Гулиа Н. В. Циклические испытания накопителя кинетической энергии большой мощности и энергоемкости / Н. В. Гулиа, А. В. Кацай. — URL: <http://n-t.ru/tp/ts/ci.htm> (дата обращения: 20.03.2019).

Дата поступления: 16.10.2023

Решение о публикации: 13.11.2023

Контактная информация:

ШАРЯКОВ Владимир Анатольевич — канд. техн. наук, доц.; v_a_shar@mail.ru

ШАРЯКОВА Ольга Леонидовна — канд. техн. наук, доц.; o_l_shar@mail.ru

ШАРЯКОВ Кирилл Владимирович — студент; k.v.shar2005@gmail.com

ЛЕБЕДЕВА Валерия Александровна — инженер; lerochka.lebedeva2017@mail.ru

Construction of a System of Increased Autonomous Travel with Limitation of Current Consumption from the Contact Network

V. A. Sharyakov¹, O. L. Sharyakova², K. V. Sharyakov³, V. A. Lebedeva⁴

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

²Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (HSE SPbGUPTD),

4, Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russian Federation

³St. Petersburg State Budgetary Professional Educational Institution Academy of Transport Technologies, 63, Salova str., Saint Petersburg, 192102, Russian Federation

⁴LLC "Scientific and Production Enterprise "EPRO", 18 Litera M, dor. Saltykovskaya, 195253, St. Petersburg, Russian Federation

For citation: Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Sharyakov K. V., Lebedeva V. A. Construction of a System of Increased Autonomous Travel with Limitation of Current Consumption from the Contact Network. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 146-157. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157

Summary

Purpose: To show the need to limit the currents consumed from the contact network and to justify the possibility of such a restriction using a lithium-ion traction battery as an additional source of electrical energy. To consider the possibility of limiting the impact on the contact network by reducing the current consumption on trolleybuses with increased autonomous travel when using a lithium-ion traction battery. **Methods:** The use of known analytical expressions, and the results of rides obtained during the operation of battery-assisted trolleybuses with increased autonomous travel on city lines and the results of test rides of a trolleybus with increased autonomous travel, in which the scheme of the power part of the traction drive uses a traction battery as an additional source of energy. **Results:** It is shown that the scheme of the power part of the traction drive proposed in the work allows limiting the current consumed from the contact network, it is additionally revealed that with such implementation, when braking the trolleybus, there is no increase in voltage in the contact network. **Practical significance:** It is shown that the proposed scheme of the power part of the traction drive makes it possible to limit the impact on the contact network by reducing the current consumed and, as a consequence, reducing voltage ripples in the contact network.

Keywords: Current consumption limitation, electric rolling stock, urban electric transport, electric bus, traction electric drive, regenerative braking, energy storage, uneven energy consumption, traction battery, lithium-ion battery.

References

1. Frolov D. S. Aktual'nost' trolleybusnykh tekhnologiy v razvitii gorodskogo elektrotransporta [Relevance of trolleybus technologies in the development of urban electric transport]. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya MAP GET, priurochennaya k 75-letiyu Kazanskogo trolleybusa: informatsionnyy byulleten'* [Scientific and practical conference of the MAP GET, dedicated to the 75th anniversary of the Kazan trolleybus: information bulletin]. 2023, Iss. 36. (In Russian)

2. Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Agunov A. V. et al. Vozmozhnosti ratsional'nogo ispol'zovaniya energii tormozheniya elektricheskogo podvizhnogo sostava [Possibilities of rational use of braking energy of electric rolling stock]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2018, Iss. 10, pp. 55–59. (In Russian)

3. Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Kiselev I. G. et al. Issledovanie vliyaniya nakopitelya elektricheskoy energii na pokazateli dvizheniya i neravnomernosti energopotrebleniya elektricheskogo podvizhnogo sostava [Study of the influence of an electrical energy storage device on the movement indicators and uneven energy consumption of electric rolling stock]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2019, Iss. 5. (In Russian)

4. Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Kovalev D. A. Ob avtomaticheskoy stabilizatsii napryazheniya kontaktnoy seti elektricheskogo podvizhnogo sostava [About automatic stabilization of the voltage of the contact network of electric rolling stock]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2021, Iss. 4, pp. 36–41. (In Russian)

5. Tkachuk A. A. *Stabilizatsiya napryazheniya kontaktnoy seti transformatorno-vypryamitel'nyim agregatom tyagovoy podstantsii postoyannogo toka 3,3 kV: avtoref.* [Voltage stabilization of the contact network with a transformer-rectifier unit for a 3.3 kV DC traction substation: abstract of thesis]. St. Petersburg, 2017, 16 p. (In Russian)

6. Gulia N. V., Katsay A. V. *Tsiklicheskie ispytaniya nakopitelya kineticheskoy energii bol'shoy moshchnosti i energoemkosti* [Cyclic testing of a kinetic energy storage device of high power and energy intensity]. Available at: <http://n-t.ru/tp/ts/ci.htm> (accessed: March 20, 2019).

Received: October 16, 2023

Accepted: November 13, 2023

Author's information:

Vladimir A. SHARYAKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; v_a_shar@mail.ru

Olga L. SHARYAKOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; o_l_shar@mail.ru

Kirill V. SHARYAKOV — Student; k.v.shar2005@gmail.com

Valeria A. LEBEDEVA — Engineer; lerochka.lebedeva2017@mail.ru

УДК 656.025.4

Модель региональной транспортной сети для построения рациональных мультимодальных маршрутов пассажирских перевозок

В. В. Костенко, В. А. Голубцов

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

Для цитирования: Костенко В. В., Голубцов В. А. Модель региональной транспортной сети для построения рациональных мультимодальных маршрутов пассажирских перевозок // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 158-172. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-158-172

Аннотация

Цель: Адаптация методов построения моделей транспортных сетей для разработки рациональных мультимодальных маршрутов региональных пассажирских перевозок, а также создание программного продукта для практической реализации предлагаемых алгоритмов. **Методы:** Математическое моделирование; теория графов для решения региональных транспортных задач с построением двухуровневых ориентированных взвешенных мультиграфов; анализ существующих алгоритмов для оптимизации поиска решений графов; алгоритм Дейкстры. **Результаты:** Модель региональной пассажирской транспортной сети реализована в виде разработанной авторами расчетной программы, в которой исходными данными служили расписание движения всех рассматриваемых видов транспорта между учитываемыми узловыми точками, а результатом — построение рациональных мультимодальных маршрутов. Расчетная программа составлена из нескольких модулей, реализующих в общем виде следующий функционал: считывание исходных данных из файлов; формирование массива связей для рассматриваемых проблем; поиск рационального решения и вывод полученных данных с сохранением в файл. Критерием оптимизации при выборе маршрута может служить минимальное время поездки, расстояние или стоимость поездки в зависимости от поставленной задачи и введенных исходных данных. Полученный массив данных с результатами в дальнейшем анализировался с использованием табличного редактора *MS Excel*. Такой подход был выбран по причине достаточной гибкости при выполнении разнообразного анализа данных и удобства графического представления результатов. **Практическая значимость:** Разработка рациональных мультимодальных маршрутов, актуальная в первую очередь для случаев скачкообразных изменений транспортных связей, при которых методы экстраполяции существующих пассажиропотоков не позволяют получить достоверные прогнозные данные. Обоснование корректировки расписаний региональных пассажирских маршрутов по результатам анализа востребованности и загруженности их конкретных сегментов.

Ключевые слова: Мультимодальный маршрут, пассажирская перевозка, региональная транспортная сеть, региональный транспорт, теория графов, математическая модель.

Объект исследования

Пассажирские транспортные сети любого уровня, как правило, крайне инерционны. Они формируются в течение длительного периода времени и медленно эволюционируют под влиянием различных и часто противоречивых тенденций

и ограничений, адаптируясь к экономическим, социальным, градостроительным, природно-климатическим и другим изменениям. В подобных условиях предпочтения пассажиров достаточно хорошо прогнозируются на годы вперед на основе экстраполяции существующих и реализованных пассажиропотоков.

Однако в этой эволюционной ситуации в последнее время наблюдается довольно много исключений, когда методы экстраполяции плохо работают: это случаи скачкообразных изменений, ломающих старые логистические схемы. Например, при изменении административных и государственных границ или при создании уникальных транспортных объектов. В Европе к наиболее ярким событиям, вызвавшим единовременное изменение региональных пассажиропотоков по политическим причинам, можно отнести падение Берлинской стены и объединение Германии, распад Советского Союза и разделение Югославии, создание Европейского союза и Шенгенской зоны свободных передвижений. Примеры особо значимых транспортных объектов, изменивших потоки внутри регионов и в точках входа-выхода, — тоннель под Ла-Маншем, Московское центральное кольцо, Крымский мост, европейские высокоскоростные железнодорожные магистрали, раздвигающие границы агломераций и объединяющие провинции.

Исследование, описанное в настоящей статье, выполнено для подобных случаев развития региональных транспортных сетей, в которых пассажир, с одной стороны, имеет выбор между видами транспорта, их маршрутами и точками пересадок (узлами сети), а с другой — этот выбор не очевиден перевозчикам из-за упомянутых выше изменений [1, 2]. Рассматриваемая модель собрана на основании данных конкретного российского региона — Республики Крым в рамках исследований [3], осуществленных в Петербургском университете путей сообщения за счет средств федерального бюджета, но при этом она может быть легко тиражируема, так как при уникальности каждой транспортной сети составляющие их элементы универсальны.

Решения, реализуемые в рамках рассматриваемых задач моделирования перевозочного процесса, позволят наметить возможные способы ускорения существующих транспортных связей, добавлять новые или исключать неиспользуемые и малоиспользуемые существующие транспортные узлы. Такие манипуляции с моделью транспортной сети приведут к появлению новых связей и исключению незадействованных, что делает модель динамически изменяемой. Подобный подход в моделировании вносит необходимость обновления целого ряда используемых данных в режиме реального времени, что в некоторых случаях может быть затруднительно, поскольку, в свою очередь, такие сведения не могут быть получены одномоментно и требуют предварительных исследований и расчетов. К таким сведениям можно отнести перспективные графики движения и времена хода на железнодорожном транспорте, получить которые можно только после выполнения моделирования движения поездов (тяговых расчетов) и разработки

ТАБЛИЦА 1. Форма представления расписаний движения видов транспорта между узловыми точками

Название узла	Транспорт	Маршрут	Рейс	Пересадка на транспорт	Прибытие	Стоянка/пересадка	Отправление
Керчь	Поезд	Керчь — Джанкой	6746				8:35
Владиславовка	Поезд	Керчь — Джанкой	6746		10:55	25	11:20
Джанкой	Поезд	Керчь — Джанкой	6746		13:10		
Джанкой	Поезд			Автобус		40	

данных графиков. Однако даже при наличии определенных ограничений и допущений моделирование мультимодальных перевозок позволяет выделить наиболее загруженные (востребованные) участки транспортной сети, издержки, связанные с пересадками, достижимость отдельных узлов в определенное время суток, наиболее востребованные виды транспорта на планируемых маршрутах.

Рассматриваемые модели позволят строить наиболее рациональные мультимодальные маршруты пассажирских перевозок между заданными точками, представляющие собой, как правило, точки тяготения пассажиров — пассажирообразующие, поглощающие и перераспределяющие. К таким точкам в случае Республики Крым отнесены точки входа в транспортную сеть региона и выхода из нее, курортные зоны и транспортные пересадочные узлы — далее все эти точки будут называться узловыми точками.

В разрабатываемой модели, в целях обеспечения связей между узловыми точками, рассматриваются следующие основные виды пассажирского транспорта общего пользования: автодорожный, железнодорожный и воздушный. В соответствии с видом связей между узлами в модели используются следующие виды транспортных средств: региональный и межрегиональный железнодорожный транспорт (рельсовые автобусы, электропоезда, поезда дальнего следования), региональный автотранспорт (автобусы, троллейбусы, маршрутные такси), межрегиональный воздушный транспорт.

Для решения поставленных задач точность моделирования перевозочного процесса требует учета даты и времени начала поездок, конкретных расписаний на определенную дату. Поэтому в качестве исходных данных в модели используется актуальное, на момент разработки и использования модели, расписание движения, учитываемого в работе общественного транспорта, по видам и маршрутам во всех узловых точках, а также время, затрачиваемое на пересадку между различными видами транспорта. Кроме этого, учет расписания в явном виде позволяет провести оценку времени на ожидание транспортного средства. В этом времени учитывается в том числе запас на компенсацию возможных опозданий регионального

транспорта. Все это дает возможность провести корректировку расписания для улучшения согласованности между различными видами транспорта. Информация об актуальном расписании получена из открытых источников и представляется для вычислений в программе в табличном виде. Пример приведен в табл. 1.

В модели учитывается расписание движения в рамках одних календарных суток от начального времени движения (т. е. фактически максимально двое суток), что достаточно для проезда по рассматриваемой территории с учетом всех вариантов пересадок.

Кроме расписания движения, которое используется для всех рассматриваемых вариантов, для моделирования каждого конкретного мультимодального маршрута задается следующая исходная информация: начальная и конечная узловые точки, начальный (возможно и конечный) вид транспорта, начальное время возможного отправления. Эти данные могут задаваться одним массивом со всеми интересующими вариациями переменных.

Решения

Рассматриваемая задача создания модели структуры и работы транспортно-логистической сети относится к типовым из теории графов [4], поэтому для ее решения был использован соответствующий инструментарий. Формируемый граф предполагает наличие нескольких связей между смежными узлами — каждая связь определяет тот или иной вид транспорта, на котором можно перемещаться между рассматриваемыми узлами. При этом учитывается, что направление движения может быть двусторонним, а количество связывающих узлы видов транспорта между различными узлами графа может различаться. Такую схему можно отнести к ориентированным мультиграфам [5], поскольку каждая связь, определяющая вид транспорта, соединяет узлы в определенном направлении (ребра с собственной идентификацией). Кроме этого, граф является взвешенным, поскольку в характеристиках связей учитываются не только соединяемые узлы, но и их вес (время, стоимость, расстояние или иной параметр), при этом весовая характеристика связи, в зависимости от направления, может меняться (например, время движения «туда» и «обратно» может различаться). Заметим здесь, что при формировании и изменении маршрутных сетей финансовые показатели обычно выступают в виде ограничений [6, 7], а критерием эффективности является минимизация времени доставки и максимальный комфорт пассажиров на выбранном маршруте. Комфорт, в свою очередь, формализуется количеством и удобством пересадок, а также продолжительностью сегментов поездок на местных транспортных средствах, уступающих в условиях проезда транспорту магистральному. Например, проезд сегмента маршрута на пригородном автобусе менее комфортен, чем на поезде со спальными местами.

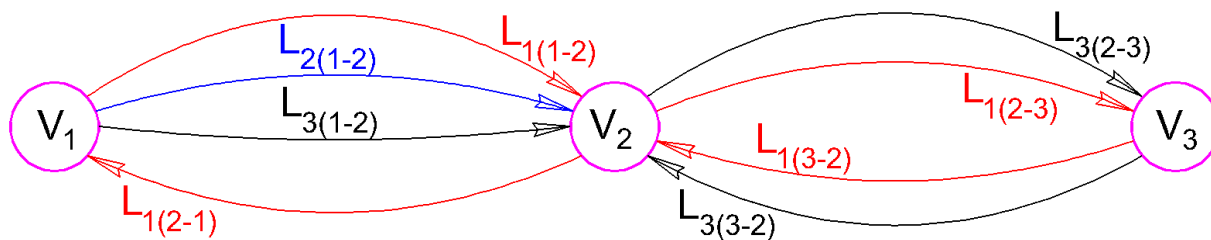


Рис. 1. Ориентированный мультиграф:
цвет связи определяет вид транспорта; $L_{1(1-2)}$ — связь видом транспорта 1 между узлами первым и вторым в соответствующем направлении; V_1 — определенный узел

Требуемые графы могут быть представлены классической формулой:

$$G = (V, L, i, j),$$

где V — множество вершин графа;

L — множество связей, соединяющих вершины;

i — определяет для каждой связи начальную вершину;

j — определяет для каждой связи конечную вершину.

Рассматриваемый ориентированный мультиграф показан на рис. 1.

В представленном на рис. 1 примере показаны попарные связи между узлами V_1 , V_2 и V_3 . Между первыми двумя узлами существуют три связи, представляющие различные виды транспорта (определенный цвет соответствует конкретному виду транспорта) — от первого ко второму, и только одна связь в обратном направлении. Между вторым и третьим узлами реализованы по две связи в каждом направлении и используются только два вида транспорта.

Вес связи — в данном примере это время на перемещение между узловыми точками — может быть определен по формуле:

$$T_{ij} = t_j - t_i, \text{ мин}$$

где t_j — время прибытия транспорта в целевой узел;

t_i — время отправления транспорта из предыдущего узла.

Эти времена принимаются из условия неизменности вида транспорта, маршрута и рейса согласно базе с расписанием.

Однако, поскольку при моделировании перевозочного процесса предусматриваются пересадки между рассматриваемыми видами транспорта и маршрутами, каждый узел в сети будет представлять собой дополнительный, внутренний граф (рис. 2), который должен быть также учтен при построении мультимодального маршрута.

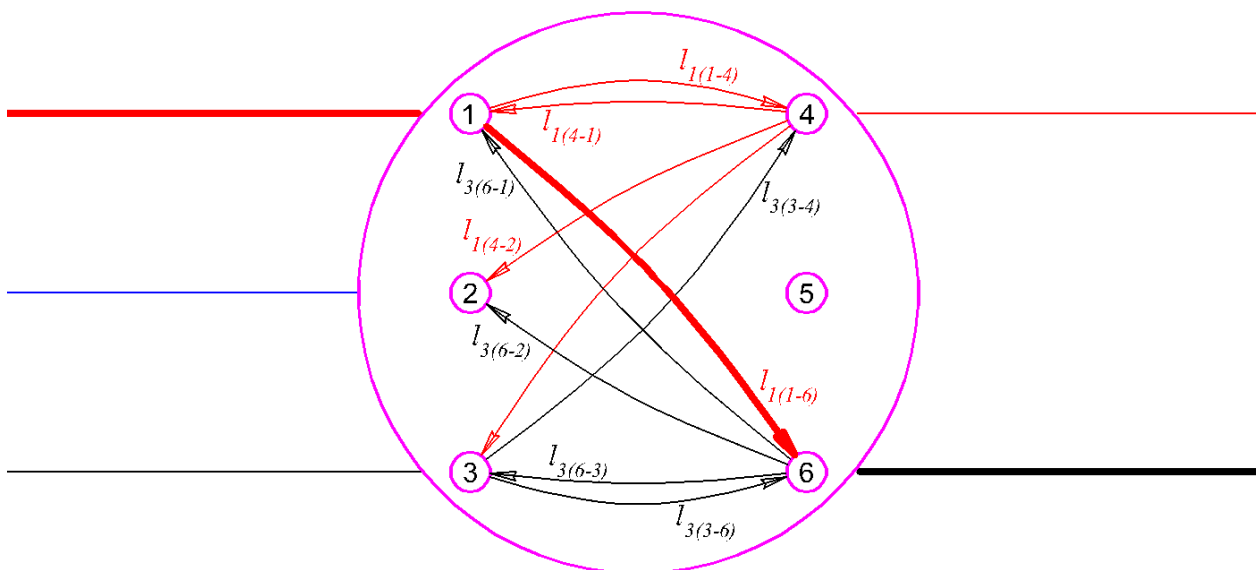


Рис. 2. Граф в узле, определяющий возможные пересадки (цветом определяются виды транспорта, утолщенной линией — выбранный маршрут с учетом пересадки)

Данный граф приводит пример возможных пересадок между видами транспорта, пересекающимися в узловой точке. Связи графа имеют веса, которые могут выражать интересующие сущности, например время, затрачиваемое на пересадку или остановку транспорта в определенном пункте, или расстояние, которое может потребоваться преодолеть для осуществления пересадки, или приведенную стоимость потерь времени пассажира. Графы в узловых точках учитывают не только виды транспорта, между которыми возможны пересадки, но и направление пересадок. Это необходимо, поскольку веса связей по направлениям движения могут отличаться, что вызвано особенностями правил, регламентирующих допуск и посадку пассажиров на транспорт. Например, пересадка с автобуса на поезд требует гораздо больше времени по сравнению с обратным направлением, что связано с наличием досмотровых мероприятий и другими повышенными мерами обеспечения безопасности. Кроме этого, учитывается тот факт, что в ряде случаев дальнейшее движение на выбранном транспортном средстве невозможно. Подобное ограничение появляется, когда рассматриваемый узел является конечным для транспорта и его дальнейшее движение не предусмотрено. Так на представленном графе (рис. 2) отсутствует связь с точкой № 5, поскольку движение транспорта, обозначенного синим цветом, до следующего узла не предполагается.

Полученный внутриузловой граф может быть классифицирован как двудольный граф (или биграф) [8], то есть это граф, узлы которого разделены на две группы таким образом, что узлы одной группы (A) соединяются связями только с узлами другой группы (B) и не имеют связей внутри групп (рис. 3).

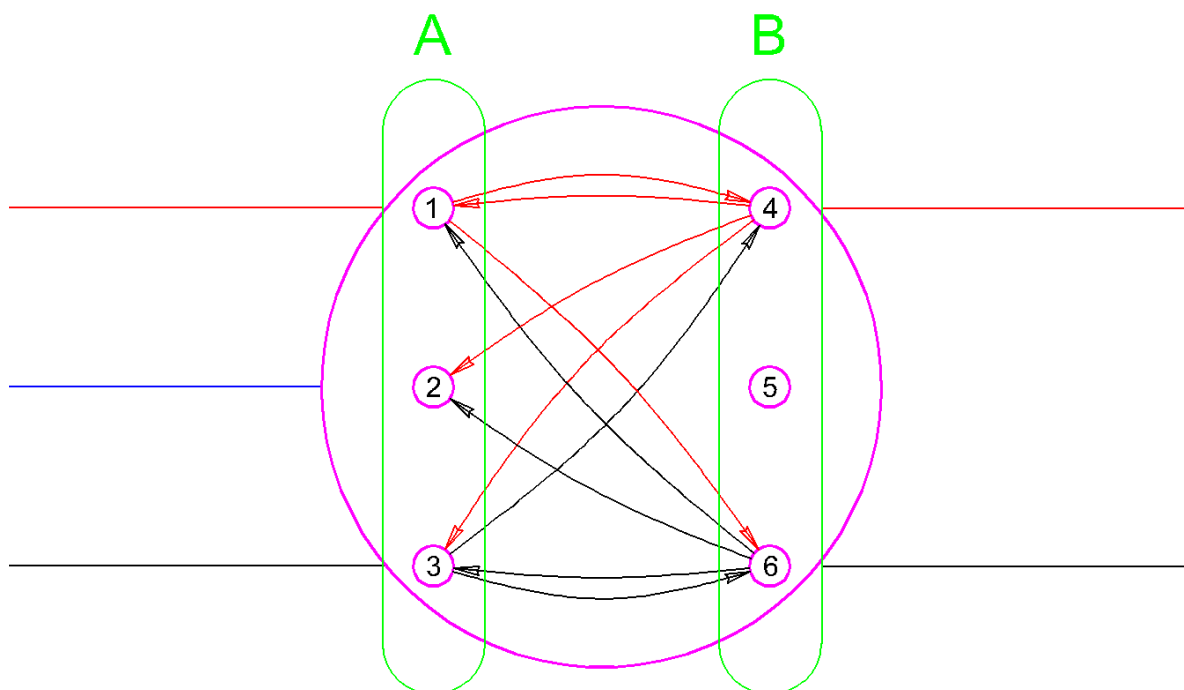


Рис. 3. Двудольный граф (биграф)

В созданной модели двудольные графы, расположенные внутри узлов, могут обладать следующими свойствами:

- взвешенный граф — все связи характеризуются весами;
- граф может быть полным двудольным — все вершины одной группы соединены со всеми вершинами другой группы, то есть для каждой пары вершин $a \in A$ и $b \in B$ существует связь $(a, b) \in l$ для $|A| = i$, $|B| = j$;
- мультиграф — узлы могут соединяться несколькими связями (направления движения и виды транспорта).

В итоге внутриузловые графы являются взвешенными полными или неполными двудольными мультиграфами.

Рассматриваемая транспортная сеть, которая использовалась для моделирования процесса перевозок, представляет собой двухуровневый ориентированный мультиграф, связи которого по своему функциональному назначению делятся следующим образом:

- перемещение между узлами;
- остановка транспорта;
- ожидание транспорта на остановочном пункте;
- переход между остановочными пунктами.

Последние три связи реализуются во внутриузловом графе.

Алгоритмов, предназначенных для решения графов (поиска кратчайших путей), достаточно много. К наиболее распространенным можно отнести следующие алгоритмы: Дейкстры, Флойда — Уоршелла, Беллмана — Форда, Джонсона,

Левита, алгоритм поиска A^* и другие [9, 10]. Для реализации в проводимом исследовании были рассмотрены следующие алгоритмы:

– алгоритм Дейкстры [11] — это алгоритм для нахождения кратчайшего расстояния от указанной вершины графа до всех остальных. Алгоритм предназначен для работы только с графами, не имеющими отрицательных связей. Это наиболее распространенный метод, но с достаточно высокой сложностью (время работы алгоритма зависит от длины пути) [9, 12]: $O(n^2 + m)$, где n — количество узлов, m — количество связей;

– алгоритм Беллмана — Форда — в отличие от алгоритма Дейкстры, может работать со связями, имеющими отрицательные веса, которые в проводимом исследовании отсутствовали;

– алгоритм Флойда — Уоршелла — динамический алгоритм, предназначенный для нахождения кратчайших расстояний между всеми вершинами взвешенного ориентированного графа, но не сохраняющий информацию о кратчайших путях;

– алгоритм Левита — отличается от алгоритма Дейкстры необходимостью повторной обработки узлов графа, что можно отнести к недостаткам;

– алгоритм A^* — алгоритм поиска, который находит во взвешенном графе маршрут наименьшего веса от начального узла до выбранного конечного. Порядок поиска кратчайшего пути требует проведения эвристической оценки.

В итоге по совокупности условий подходящим выбором из перечня кратко описанных алгоритмов по своим характеристикам принят алгоритм Дейкстры: решение взвешенных графов, отсутствие связей с отрицательным весом (не используются), сохранение информации о кратчайших путях (необходимо получить последовательность узлов пути). В дополнение к указанному — выбранный алгоритм является единственным, который при соответствующей его модификации позволяет работать с динамически изменяемым весом связей, вычисляемых в процессе его работы.

Результаты

Модель перевозочного процесса была реализована в виде расчетной программы [13], в которой исходными данными служили расписание движения всех рассматриваемых видов транспорта между учитываемыми узловыми точками. Схема с размещением части таких точек представлена на рис. 4.

Кроме узловых точек исходными данными являлись «проблемы», сформулированные в табличном виде и приведенные в табл. 2.

Отдельная «проблема» представляет собой задание на решение маршрута мультимодальной перевозки: определяет начальную точку — остановочный пункт определенного вида транспорта и суточное время отсчета начала поездки, целевой узел и, при необходимости, вид транспорта в целевом узле, на котором

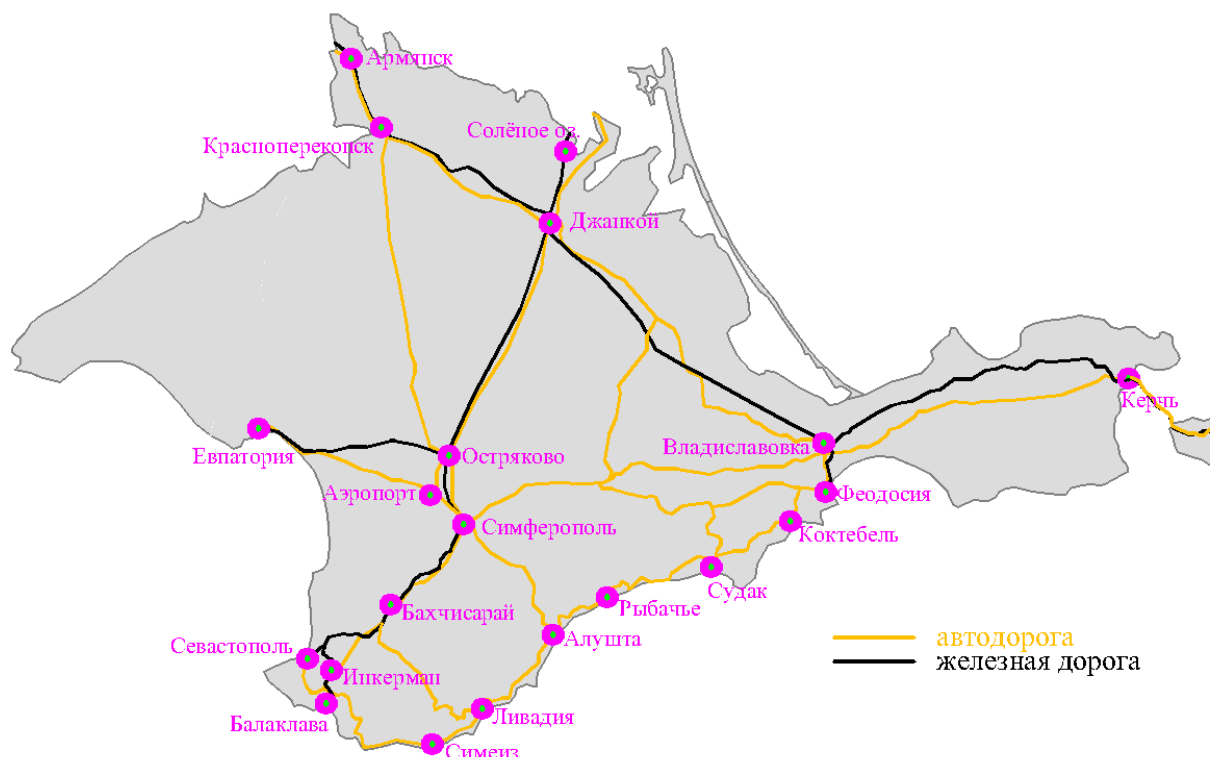


Рис. 4. Узловые точки, учтенные в модели регионального транспортного обслуживания пассажиров на территории Крыма

ТАБЛИЦА 2. Форма представления «проблем»

№ проблемы	Начальное время	Начальный узел	Начальный транспорт	Конечный узел	Конечный транспорт
1	8:30	Керчь	Поезд	Евпатория	
2	7:00	Феодосия	Поезд	Севастополь	Автобус

предполагается дальнейшее движение. Последнее условие необходимо для уточнения весовой характеристики получаемого пути в целом, с учетом перехода на конечный остановочный пункт со сменой вида транспорта. Например, после приезда в аэропорт на автобусе до времени вылета по расписанию необходимо иметь время на переход в здание аэропорта, регистрацию, сдачу багажа, предполетный досмотр и запас на возможное опоздание автобуса.

Расчетная программа [13] составлена из нескольких модулей, реализующих в общем виде следующий функционал: считывание данных из файлов, содержащих расписание движения всех видов транспорта и «проблемы», формирование массива связей для рассматриваемой проблемы, поиск решения и вывод полученных данных с сохранением в файл.

Основную практическую сложность при создании расчетной программы представляли затраты времени на вычисления, которые прежде всего определил

алгоритм этапа формирования перечня всех связей для дальнейшего поиска кратчайших путей по заданиям, описанным в таблице проблем (табл. 2), поскольку для получения всего перечня связей без исключения требуется неоднократный просмотр всего массива данных, содержащих расписание, и в случае увеличения объема растет и затрачиваемое время.

Как известно, связь на графе формируется парой узлов. Однако формат хранения расписания не отражает в явном виде истинного количества узлов, что хорошо видно на примере строки, описывающей пересадку со сменой вида транспорта, т. е. переход на другой остановочный пункт (4-я строка в табл. 1). Данная запись только участвует в формировании связей, реализующих пересадку с одного вида транспорта на другой, совокупная численность которых будет зависеть от количества прибытий на остановочный пункт отдельного вида транспорта. Другие строки в таблице также участвовали в формировании от одной до двух связей.

Решение проблемы длительности обработки исходных материалов видится такими путями, как, например, однократная обработка данных с расписаниями и получение всех возможных вариантов связей, что может занять значительное количество времени, но в дальнейшем, в случае изменения, удаления или добавления новых данных, потребуется выполнить обработку только вносимых данных. Другой вариант заключается в формировании связей на этапе поиска решений на графе, что потребует использования модифицированного алгоритма, но позволит исключить бросовые работы по формированию массива всех возможных связей, включающих в том числе связи, которые не будут нигде задействованы. Этот подход также пригоден для задач с динамически изменяющимися весами связей, не требует предварительного создания массива связей, что упрощает внесение изменений в базу с расписанием или иными данными.

В проведенном исследовании упомянутая проблема решалась путем формирования на основе исходных данных сортированного массива с полным перечнем узлов, что позволило в дальнейшем при создании связей исключить повторное чтение узлов. Кроме этого, логически отбрасывались узлы, не удовлетворяющие требованиям формирования связей, что также сокращало время работы. Однако такой подход применим к небольшим объемам исходных данных, а с их ростом его использование не приведет к ощутимому сокращению затрат времени на обработку.

Разработанная модель, при необходимости, может быть модифицирована, что позволит исключать из рассмотрения определенные узловые точки и отдельные виды транспорта, тем самым сужая возможности поиска решений в рассматриваемых вариантах, также возможно выполнять расчет «с конца», т. е., например, такой расчет характерен для задач, сформулированных следующим образом: в какое время необходимо выйти из дома, чтобы достичь цели к определенному моменту (например, не опоздать на поезд или самолет в конце рассматриваемого мультимодального маршрута). В настоящем исследовании приведенные

ТАБЛИЦА 3. Формат результатов работы расчетной программы

1	узел А	узел А	узел Б	узел Б	узел Б	узел В	...
1		поезд	поезд	поезд	автобус	автобус	
1		п10	п10		25	25	
1		6742	6742		8	8	
1	8:00	8:30	9:15	9:50	10:05	10:35	
...							

Примечание. В первой колонке приводится номер проблемы, далее построчно: в первой строке — название узла, во второй — вид транспортного средства, в третьей — маршрут, в четвертой — рейс и в пятой строке — модельное время.

дополнительные условия не использовались и поэтому не были реализованы в расчетной программе.

Результат работы созданной расчетной программы представляет собой массив данных, в котором по каждой проблеме приводится информация о достижимости заданных узлов, а также подробно расписанные кратчайшие пути с указанием всех пересадок, ожиданий, смены транспорта и прочая информация. Также в результатах представлены весовые характеристики для всех выводимых связей. Пример результатов представлен в табл. 3.

Полученный массив данных с результатами в дальнейшем анализировался с использованием табличного редактора *Microsoft Excel*. Такой подход был выбран по причине достаточной гибкости при выполнении разнообразного анализа данных и удобства графического представления результатов.

Таким образом, обработка исходных данных состоит из двух блоков: расчетного, представленного отдельной расчетной программой [13], и аналитического, реализованного на базе табличного редактора *MS Excel*.

Интерфейс расчетного блока позволяет интерактивно выбрать файл, содержащий данные с расписанием движения рассматриваемых видов транспорта, файл со списком проблем, а также запустить выполнение расчета, после завершения которого создается файл с результатами.

Интерфейс аналитического блока — окно программы *MS Excel* для анализа данных, выводит информацию о построенных маршрутах, а также в отдельном окне позволяет вводить дополнительные сведения для конкретизации запросов, связанных с исследованием.

Заключение

Выполненное исследование позволяет количественно оценить степень существующей несогласованности в расписании различных видов регионального и городского транспорта с расписанием магистрального железнодорожного

транспорта, что приводит к дополнительным потерям общего времени в течение поездки, которое может достигать нескольких часов. Предложенное в качестве практического результата исследования согласование расписаний поездов дальнего следования с региональными автобусами на маршруте Феодосия — Владиславовка — Алушта — Ялта позволит сократить временные издержки, что скажется на привлекательности и удобстве пользования железнодорожным транспортом, а также облегчит планирование поездок.

Экономической оценке потерь времени пассажиров на проезд в настоящее время уделяется очень мало внимания, и никто не может с приемлемой точностью привести подобные данные. На наш взгляд, подобные исследования должны однозначно проводиться при составлении и согласовании расписаний движения общественного транспорта разных уровней — местного, регионального и магистрального.

Библиографический список

1. Дорофеевский С. А. Эффективные параметры комплексной технологии транспортного узла / С. А. Дорофеевский, А. Н. Иванков, В. В. Костенко // *Железнодорожный транспорт*. — 2015. — № 4. — С. 49–53.
2. Binder S. The multi-objective railway timetable rescheduling problem / S. Binder, Y. Maknoon, M. Bierlaire // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — Vol. 78. — Pp. 78–94. — DOI: 10.1016/j.trc.2017.02.001.
3. Kostenko V. V. Optimization of regional transport networks based on a mathematical model of passenger preferences / V. V. Kostenko, V. A. Golubtsov, R. V. Pank et al. // *Journal of Physics Conference Series*. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032101
4. Zhuravleva N. Mathematical description and modelling of transportation of cargoes on the base digital railway / N. Zhuravleva, I. Guliy, M. Polyanichko // *Vide. Tehnologija. Resursi — Environment, Technology, Resources, Rezekne*, June 20–22, 2019. — Rezekne: Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija, 2019. — Pp. 175–179. — DOI: 10.17770/etr2019vol2.4049.
5. Harary F. *Graph Theory*. — Reprint 2013. Narosa Publishing House. — P. 298.
6. Egorov Y. The level of railway rates as a factor of sustainable development of territories (Conference Paper) / Y. Egorov, N. Zhuravleva, M. Poliak // *1st Conference on Sustainable Development: Industrial Future of Territories, IFT 2020*; Ural State University of Economics Yekaterinburg; Russian Federation; 28 September 2020 to 29 September 2020. — 2020. — Vol. 208.
7. Kotenko A. Analysis of the experience of operation and scope of application of direct connections to ensure passenger transportation on regional lines / A. Kotenko, T. Malakhova, T. Shchmanev // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — Vol. 49. — Pp. 363–372. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_37.
8. Bollobás B. *Modern Graph Theory* / B. Bollobás. — 2nd printing 2002. Graduate Texts in Mathematics. 184. Springer Publ. — 394 p. — DOI: 10.1007/978-1-4612-0619-4.

9. Cormen T. H. Introduction to Algorithms / T. H. Cormen, Ch. E. Leiserson, L. Rivest et al. — MIT Press, 2009.
10. Stuart J. Russel and Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach // J. Stuart. — Prentice Hall Publ., 2020.
11. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. — Springer Publ., 1959. — Vol. 1. — Iss. 1. — Pp. 269–271. — DOI: 10.1007/BF01386390
12. Fredman M. L. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms / M. L. Fredman, R. E. Tarjan // J. ACM. — 1987. — Vol. 34. — Iss. 3. — Pp. 596–615.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664574 Российская Федерация. Маршрут — программа построения транспортного маршрута по заданному критерию оптимизации: № 2023663295: заявл. 19.06.2023: опубл. 05.07.2023 / В. А. Голубцов, В. В. Костенко; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Дата поступления: 01.09.2023

Решение о публикации: 01.10.2023

Контактная информация:

КОСТЕНКО Владимир Васильевич — канд. техн наук, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы»; docentkostenko@yandex.ru

ГОЛУБЦОВ Владимир Анатольевич — ст. преподаватель кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; kipjd@mail.ru

A Model of the Regional Transport Network for Constructing Rational Multimodal Passenger Traffic Routes

V. V. Kostenko, V. A. Golubtsov

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

For citation: Kostenko V. V., Golubtsov V. A. A Model of the Regional Transport Network for Constructing Rational Multimodal Passenger Traffic Routes. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 158-172. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-158-172

Summary

Purpose: Adaptation of methods of constructing models of transport networks for the development of rational multimodal routes of regional passenger transportation, as well as the creation of a software product for the practical implementation of the proposed algorithms. **Methods:** Mathematical modeling; graph theory for solving regional transportation problems with construction of two-level oriented weighted multigraphs; Analysis of existing algorithms for optimizing the search for graph solutions; Dijkstra's algorithm. **Results:** The model of the regional passenger transport network has been implemented in the form of a calculation

program developed by the authors. In this program, the schedule of the movement of all transport points under consideration is the initial data, and the result is the construction of rational multimodal routes. The calculation program is compiled from several modules that implement the following functionality in general: reading input data from files; the formation of an array of connections for the problems under consideration; search for a rational solution and output of the received data while saving it to the file. The optimization criterion when choosing a route can be the minimum travel time, distance, or cost of the trip, depending on the task and input data provided. The resulting array of data with the results has been further analyzed using the MS Excel table editor. This approach is selected due to sufficient flexibility when performing a variety of data analysis and the convenience of graphic presentation of the results. **Practical significance:** The development of rational multimodal routes, relevant primarily for cases of abrupt changes in transport relations, in which the extrapolation methods of existing passenger flow do not provide reliable forecast data. Justification of the adjustment of the schedules of regional passenger routes based on the results of the analysis of the demand and the load of their specific segments.

Keywords: Multimodal route, passenger transportation, regional transport network, regional transport, graph theory, mathematical model.

References

1. Dorofeevskiy S. A., Ivankov A. N., Kostenko V. V. Effektivnye parametry kompleksnoy tekhnologii transportnogo uzla [Effective parameters of complex technology of a transport hub]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2015, Iss. 4, pp. 49–53. (In Russian)
2. Binder S., Maknoon Y., Bierlaire M. The multi-objective railway timetable rescheduling problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 78, pp. 78–94. DOI: 10.1016/j.trc.2017.02.001.
3. Kostenko V. V., Golubtsov V. A., Pank R. V. et al. Optimization of regional transport networks based on a mathematical model of passenger preferences. *Journal of Physics Conference Series*. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032101
4. Zhuravleva N., Guliy I., Polyanichko M. Mathematical description and modelling of transportation of cargoes on the base digital railway. *Vide. Tehnologija. Resursi — Environment, Technology, Resources, Rezekne*, June 20–22, 2019. *Rezekne: Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija*, 2019, pp. 175–179. DOI: 10.17770/etr2019vol2.4049.
5. Harary F. *Graph Theory*. Reprint 2013. Narosa Publishing House, p. 298.
6. Egorov Y., Zhuravleva N., Poliak M. The level of railway rates as a factor of sustainable development of territories (Conference Paper). 1st Conference on Sustainable Development: Industrial Future of Territories, IFT 2020; Ural State University of Economics Yekaterinburg; Russian Federation; 28 September 2020 to 29 September 2020, vol. 208.
7. Kotenko A., Malakhova T., Shchmanev T. Analysis of the experience of operation and scope of application of direct connections to ensure passenger transportation on regional lines. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, vol. 49, pp. 363–372. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_37.
8. Bollobás B. *Modern Graph Theory*. 2nd printing 2002. Graduate Texts in Mathematics. 184. Springer Publ, 394 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0619-4.
9. Cormen T. H., Leiserson Ch. E., Rivest L. et al. *Introduction to Algorithms*. MIT Press, 2009.

10. Stuart J. Russel and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. J. Prentice Hall Publ., 2020.
11. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. — Springer Publ., 1959, vol. 1, Iss. 1, pp. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390
12. Fredman M. L., Tarjan R. E. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. *J. ACM*, 1987, vol. 34, Iss. 3, pp. 596–615.
13. Golubtsov V. A., Kostenko V. V. *Marshrut — programma postroeniya transportnogo marshruta po zadannomu kriteriyu optimizatsii* [Route — a program for constructing a transport route according to a given optimization criterion]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2023663295. (In Russian)

Received: September 01, 2023

Accepted: October 01, 2023

Author's information:

Vladimir V. KOSTENKO — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department “Railway Stations and Hubs”; docentkostenko@yandex.ru.

Vladimir A. GOLUBTSOV — Senior Lecturer of the Department “Surveys and Design of Railways”; kipjd@mail.ru.

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 338.47

Оценка возможности использования механизма ship-or-pay для финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона

Ю. В. Егоров

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

Для цитирования: Егоров Ю. В. Оценка возможности использования механизма ship-or-pay для финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 173-186. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-173-186

Аннотация

Цель: Количественная оценка возможности использования механизма ship-or-pay для финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона в среднесрочной и долгосрочной перспективах. **Методы:** Применялись обобщение, анализ, систематизация, сравнительный метод, статистический метод, эконометрическое моделирование. **Результаты:** Разработана методика оценки покрытия потребного финансирования модернизации Восточного полигона с использованием договоров ship-or-pay. С помощью разработанной методики произведена прогнозная оценка покрытия финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона в среднесрочной и долгосрочной перспективах. Также произведено сравнение полученной оценки с оценкой, рассчитанной на основе данных ОАО «РЖД» по объему запрашиваемого финансирования из Фонда национального благосостояния. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут использоваться в целях формирования политики использования контрактов ship-or-pay для финансирования модернизации объектов железнодорожной инфраструктуры, а также в ходе дальнейших исследований возможностей использования механизма ship-or-pay на транспорте.

Ключевые слова: Механизм ship-or-pay, железнодорожная инфраструктура, финансирование, модернизация, Восточный полигон, прогноз.

Введение

В мировой практике механизм ship-or-pay представляет собой соглашение (договор на перевозку), предусматривающее обязательство перевозчика по перевозке заранее согласованного объема груза клиента (грузоотправителя) плюс обязательство клиента оплатить данную перевозку, даже если этот груз не будет поставлен. Такие договоры могут применяться в случае необходимости гарантировать загрузку строящейся транспортной инфраструктуры грузами крупных грузоотправителей в основном в долгосрочной перспективе.

В настоящее время усилия ОАО «РЖД» по развитию железнодорожной инфраструктуры во многом сосредоточены на модернизации Восточного полигона, что

позволит расширить его провозную способность и удовлетворить резко выросший и продолжающий расти спрос на грузоперевозки в восточном направлении. Стоимость второго этапа модернизации Восточного полигона (который сейчас реализуется ОАО «РЖД») оценивается на сегодня приблизительно в 1,1 трлн руб. Эти средства до конца 2025 г. будут потрачены на строительство и реконструкцию 280 объектов инфраструктуры, что позволит поднять провозную способность Восточного полигона до 180 млн тонн в 2024 г. При этом железнодорожная монополия уже планирует третий этап модернизации Восточного полигона, который сам, в свою очередь, разделен на 3 подэтапа: 3.1, 3.2 и 3.3. Подэтап 3.1 включает в себя строительство участка от Улака до Ванино и рост провозной способности Транссиба и БАМа до 197 млн тонн в 2027 г. (включая возможность вывоза дополнительных объемов угля из Эльги, итого 84 объекта инфраструктуры). Подэтап 3.2 включает 45 объектов и нацелен на рост провозной способности до 210 млн тонн в 2030 г. Подэтап 3.3 задумывается для увеличения провозной способности до 255 млн тонн в 2032 г. На сегодня предварительно оценена стоимость реализации только этапа 3.1 — 460 млрд руб. для условий 2022 г. [1].

Из каких источников финансировать модернизацию железнодорожной инфраструктуры такой стоимости? Увеличение грузовых тарифов — одно из возможных решений, но оно приведет (при существующей системе грузовых железнодорожных тарифов) к распределению финансовой нагрузки на всех грузоотправителей. Использование механизма *ship-or-pay*, напротив, позволит переложить частично или полностью эти затраты на тех грузоотправителей, которые являются основными выгодоприобретателями модернизируемой инфраструктуры. Поэтому в настоящее время ОАО «РЖД» планирует заключение контрактов *ship-or-pay* на Восточном полигоне с грузоотправителями-выгодоприобретателями его модернизации, несмотря на проблемы с проработкой нормативной базы таких контрактов, а также с желанием этих грузоотправителей заключать такие договоры. При этом первым в очереди на средства, полученные от использования механизма *ship-or-pay*, рассматривается подэтап 3.1 модернизации [2].

На сегодня сравнительно небольшое количество авторов исследуют экономические и юридические аспекты применимости механизма *ship-or-pay* в российских условиях. Среди таких авторов можно выделить А. В. Гурьеву [3], А. Н. Сладкову и О. В. Князькину [4], С. А. Сеницына и других [5], В. И. Салыгина и других [6]. Косвенно эти вопросы затрагиваются в работах Н. А. Журавлевой и А. Ю. Панычева [7], И. М. Гулого [8], Е. М. Волковой [9], Л. Ф. Казанской и других [10]. Хотя некоторые из этих авторов затрагивают в своих работах вопросы финансирования модернизации Восточного полигона, тем не менее никто из них не пытается дать количественную оценку возможности использования механизма *ship-or-pay* для финансирования модернизации Восточного полигона (включая подэтап 3.1).

Вышесказанное делает данное исследование актуальным и помогает определить его цель: осуществить количественную оценку возможности использования механизма ship-or-ruy для финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона в среднесрочной и долгосрочной перспективах.

Методология исследования

Предложенная и использованная нами в данной работе методика оценки покрытия потребного финансирования модернизации Восточного полигона с использованием договоров ship-or-ruy состоит из отдельных частей, описанных в данном разделе работы ниже (данные части в основном используют уже существующие методы оценки и прогнозирования).

Для прогнозирования объем погрузки каменного угля на сети ОАО «РЖД» в 2024–2027 гг. использована модель авторегрессии вида:

$$\text{Coal_load}_t = b_0 + b_1 \text{Coal_load}_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где Coal_load_t — погрузка каменного угля на сети ОАО «РЖД» в год t , тыс. тонн;

Coal_load_{t-1} — погрузка каменного угля на сети ОАО «РЖД» в год $t-1$, тыс. тонн;

b_0, b_1 — коэффициенты модели;

ε_t — остатки модели.

Для построения данной модели и оценки ее коэффициентов использовался обобщенный метод наименьших квадратов (обобщенный метод Кохрейна — Оркатта). Значимость модели в целом оценивалась с помощью критерия Фишера, значимость ее коэффициентов — с помощью критерия Стьюдента. Верификация модели и ее параметров проводилась с использованием теста ARCH (авторегрессионная изменчивость условной дисперсии), теста PASF (автокорреляция остатков модели), критерия хи-квадрат (нормальность распределения остатков модели). При прогнозировании по модели был рассчитан точечный прогноз переменной Coal_load_t на период 2024–2027 гг. с 95 % доверительными интервалами прогноза. Во всех вычислениях по модели использован уровень статистической значимости 0,05.

Методика прогнозирования финансового результата ОАО «РЖД» в 2024–2027 гг. от перевозки каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона представлена в табл. 1 (результаты прогнозирования — в табл. 3).

Методика оценки покрытия потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона по договорам ship-or-ruy представлена в табл. 2 (результаты оценки представлены в таблице 4).

ТАБЛИЦА 1. Методика прогнозирования финансового результата ОАО «РЖД» в 2024–2027 гг. от перевозки каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона

№ п/п	Показатель	Метод расчета показателя
1	Погрузка каменного угля на инфраструктуре ОАО «РЖД», тыс. тонн	Точечный прогноз по модели (1)
2	Доходная ставка ОАО «РЖД» при перевозке каменного угля, руб/тонна	Рассчитана автором на основе фактических значений доходной ставки и среднего темпа ее изменения за 2014–2022 гг. на основе данных [11]
3	Доходы ОАО «РЖД» от перевозки каменного угля, млрд руб.	п. 1 Таблицы 1 × п. 2 Таблицы 1
4	Доля каменного угля в доходах ОАО «РЖД», %	Принята автором как среднее значение доли каменного угля в доходах ОАО «РЖД» за 2015–2022 гг. на основе данных [11]
5	Рентабельность продаж ОАО «РЖД» по виду деятельности «Грузовые перевозки», %	Принята автором как среднее значение рентабельности продаж ОАО «РЖД» по виду деятельности «Грузовые перевозки» за 2015–2021 гг.; данная рентабельность продаж рассчитана автором на основе данных по финансовому результату ОАО «РЖД» по виду деятельности «Грузовые перевозки» за 2015–2021 гг. (по данным финансовой отчетности [12]) и доходам ОАО «РЖД» от перевозки грузов за 2015–2021 гг. (рассчитаны на основе фактических данных показателей пп. 3, 4 Таблицы 1))
6	Финансовый результат ОАО «РЖД» от перевозки каменного угля, млрд руб.	(п. 3 Таблицы 1 × п. 5 Таблицы 1) / 100
7	Провозная способность Восточного полигона (БАМ и Транссиб) в % от объема погрузки на инфраструктуре ОАО «РЖД»	Рассчитана автором как среднее отношений провозной способности Восточного полигона в 2023 г./объем погрузки на сети ОАО «РЖД» каменного угля, нефти и нефтепродуктов, черных металлов в 2023 г. и провозная способность Восточного полигона в 2027 г./объем погрузки на сети ОАО «РЖД» каменного угля, нефти и нефтепродуктов, черных металлов в 2023 г.; прогнозная провозная способность Восточного полигона в 2027 г. взята по данным источников [13, 14]
8	Прогноз финансового результата ОАО «РЖД» в 2024–2027 гг. от перевозки каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона, млрд руб.	(п. 6 Таблицы 1 × п. 7 Таблицы 1) / 100

Отметим, что для оценки по методике табл. 2 нами выбраны каменный уголь, нефть и нефтепродукты, черные металлы по двум причинам: 1) на доходы от перевозки данных грузов приходится большая доля доходов ОАО «РЖД» (в 2022 г., к примеру, доля данных грузов в доходах ОАО «РЖД» составила 56,4 % согласно [11]); 2) ОАО «РЖД» планирует заключение контрактов ship-or-pay на Восточном полигоне в основном именно с грузоотправителями каменного угля, нефти и нефтепродуктов, черных металлов [2].

Также в исследовании использовались такие общенаучные методы, как обобщение, анализ, систематизация, сравнительный метод, а также статистический метод.

ТАБЛИЦА 2. Методика оценки покрытия потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона по договорам ship-or-pay

№ п/п	Показатель	Метод расчета показателя
1	Прогноз финансового результата ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона, млрд руб.	П. 8 Таблицы 1
2	Отношение суммы долей черных металлов, нефти и нефтепродуктов в доходах ОАО «РЖД» к доле каменного угля в доходах ОАО «РЖД», доли	Для расчетов показателей 2024–2027 гг. автором рассчитаны средняя доля нефти и нефтепродуктов в доходах ОАО «РЖД» в 2015–2022 гг., средняя доля черных металлов в доходах ОАО «РЖД» в 2015–2022 гг., средняя доля каменного угля в доходах ОАО «РЖД» в 2015–2022 гг. по данным источника [11]
3	Прогноз финансового результата ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов по инфраструктуре Восточного полигона, млрд руб.	П. 1 Таблицы 2 × п. 2 Таблицы 2
4	Итого прогноз финансового результата ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона, млрд руб.	П. 3 Таблицы 2 + п. 1 Таблицы 2
5	Потребное финансирование подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона, млрд руб.	Рассчитано автором на основе оценки потребного финансирования подэтапа 3.1 согласно источникам [13, 14] в предположении, что данное финансирование распределено равномерно в 2023–2027 гг. (460 млрд руб. итого за 4 года подэтапа 3.1)
6	Покрытие потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона, %	(П. 4 Таблицы 2 / П. 5 Таблицы 2) × 100)
7	Дефицит потребного финансирования, %	100 – п. 6 Таблицы 2
8	Дефицит потребного финансирования, млрд руб.	п. 5 Таблицы 2 – п. 4 Таблицы 2
9	Итого дефицит потребного финансирования в 2024–2027 гг., млрд руб.	Сумма значений дефицита по годам по п. 8

Результаты исследования

Для оценки возможности использования механизма ship-or-pay для финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона мы, во-первых, спрогнозировали объем погрузки каменного угля на сети ОАО «РЖД» в 2024–2027 гг. с использованием модели авторегрессии на основании фактических данных за

2005–2023 гг. (погрузка 2023 г. рассчитана путем деления погрузки за январь — сентябрь 2023 г. на отношение погрузки за январь — сентябрь 2022 г. к погрузке 2022 г. с последующим умножением полученного результата на 100). Модель авторегрессии и коэффициент при факторной переменной значимы; качество модели высокое (коэффициент детерминации 0,86); авторегрессионная изменчивость условной дисперсии отсутствует (тест ARCH); автокорреляция остатков модели отсутствует (тест PASF); остатки модели распределены нормально (критерий хи-квадрат). Результаты данного прогноза в графическом виде с 95 % доверительными интервалами прогноза представлены на рис. 1.

Далее с использованием данных прогноза рис. 1 мы оценили прогнозные значения финансового результата ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона (табл. 3).

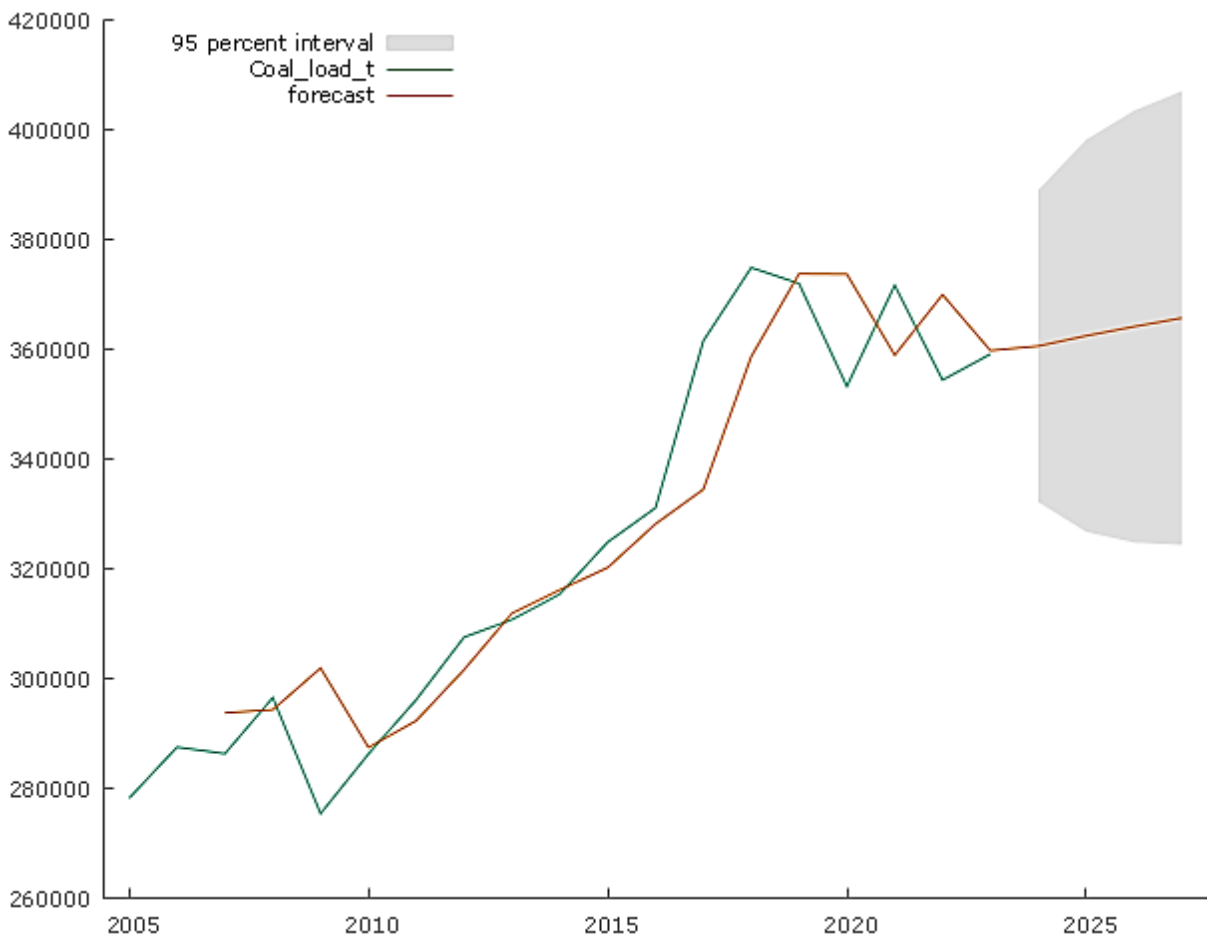


Рис. 1. Результаты прогнозирования погрузки каменного угля на сети ОАО «РЖД» в 2024–2027 гг. с помощью модели авторегрессии, тыс. тонн: синяя линия — фактические значения погрузки, красная линия — расчетные значения погрузки по модели (включая точечный прогноз в 2024–2027 гг.), серая область на графике за 2024–2027 гг. — 95 % доверительные интервалы значений точечного прогноза (оценка автора на основе данных источника [15])

ТАБЛИЦА 3. Прогноз финансового результата ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона

№ п/п	Показатель	2024	2025	2026	2027
1	Погрузка каменного угля на инфраструктуре ОАО «РЖД» (прогноз по модели (1)), тыс. тонн	360 596,0	362 469,0	364 132,0	365 701,0
2	Доходная ставка ОАО «РЖД» при перевозке каменного угля, руб/тонна	937,8	1030,4	1132,1	1243,9
3	Доходы ОАО «РЖД» от перевозки каменного угля, млрд руб.	338,2	373,5	412,2	454,9
4	Доля каменного угля в доходах ОАО «РЖД», %	19,3	19,3	19,3	19,3
5	Рентабельность продаж ОАО «РЖД» по виду деятельности «Грузовые перевозки», %	4,9	4,9	4,9	4,9
6	Финансовый результат ОАО «РЖД» от перевозки каменного угля, млрд руб.	16,4	18,1	20,0	22,1
7	Провозная способность Восточного полигона (БАМ и Транссиб) в % от объема погрузки на инфраструктуре ОАО «РЖД»	28,8	28,8	28,8	28,8
8	Прогноз финансового результата ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона, млрд руб.	4,7	5,2	5,8	6,4

Примечание. Оценка автора на основе данных источников [2, 11–15]

ТАБЛИЦА 4. Оценка покрытия потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона по договорам ship-or-pay

№ п/п	Показатель	2024	2025	2026	2027
1	Прогноз финансового результата ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона, млрд руб.	4,7	5,2	5,8	6,4
2	Отношение суммы долей черных металлов, нефти и нефтепродуктов в доходах ОАО «РЖД» к доле каменного угля в доходах ОАО «РЖД», доли	2,0	2,0	2,0	2,0
3	Прогноз финансового результата ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов по инфраструктуре Восточного полигона, млрд руб.	9,4	10,4	11,5	12,7
4	Итого прогноз финансового результата ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона, млрд руб.	14,2	15,6	17,3	19,1
5	Потребное финансирование подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона, млрд руб.	115	115	115	115
6	Покрытие потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона, %	12,32	13,61	15,02	16,57
7	Дефицит потребного финансирования, %	87,68	86,39	84,98	83,43
8	Дефицит потребного финансирования, млрд руб.	100,83	99,35	97,73	95,94
9	Итого дефицит потребного финансирования в 2024–2027 гг., млрд руб.	393,85			

Примечание. Оценка автора на основе данных источников [2, 11–15]

Далее на основе результатов табл. 3 мы оценили покрытие потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона по договорам ship-or-raw (табл. 4). В ходе этой оценки мы предположили, что данный финансовый результат формируется как итог исполнения платежных обязательств грузоотправителей по всем договорам перевозки данных грузов по инфраструктуре Восточного полигона ОАО «РЖД»; при этом все эти договоры заключены с использованием механизма ship-or-raw.

Обсуждение результатов

Из полученных результатов следует, что возможности использования механизма ship-or-raw для финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона достаточно скромные в среднесрочной перспективе: покрытие потребного финансирования данной модернизации финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона по контрактам ship-or-raw составляет от 12,32 % до 16,57 % ежегодно, итого дефицит потребного финансирования — 393,85 млрд руб., или 85,62 % от необходимого (табл. 4).

Отметим, что в табл. 4 представлена оценка покрытия контрактами ship-or-raw потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона только для точечного прогноза погрузки каменного угля на сети ОАО «РЖД» в 2024–2027 гг. Но данная оценка может варьировать, если использовать не точечный прогноз, а его доверительные интервалы (рис. 1). В табл. 5 представлена такая оценка (аналогичная оценке табл. 4) для данных доверительных интервалов.

Как следует из табл. 5, покрытие потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона по контрактам ship-or-raw составляет (для доверительных интервалов прогноза рис. 1) от 11,37–13,31 % до 14,72–18,47 % ежегодно с итоговым дефицитом потребного финансирования от 387,06 до 400,44 млрд руб. (т. е. от 84,14 до 87,05 % от необходимого).

Можно ли сравнить полученный результат с похожими оценками? Из общего объема потребного финансирования подэтапа 3.1 в 460 млрд руб. ОАО «РЖД» планирует получить 300 млрд руб. из ФНБ [13, 14], т. е. 160 млрд руб. компания намеревается получить из других источников. Она планирует использовать в числе других источников контракты ship-or-raw, но непонятно, какую долю последние составят в данных источниках [2]. Если предположить, что эта доля составляет 100 %, то покрытие потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации

ТАБЛИЦА 5. Оценка покрытия потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона по договорам ship-or-put (для верхней и нижней границ доверительных интервалов прогноза погрузки каменного угля на инфраструктуре ОАО «РЖД» в 2024–2027 гг.)

№ п/п	Показатель	2024	2025	2026	2027
Верхняя граница доверительного интервала (рис. 1)					
1	Покрытие потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона, %	13,31	14,97	16,67	18,47
2	Дефицит потребного финансирования, %	86,69	85,03	83,33	81,53
3	Дефицит потребного финансирования, млрд руб.	99,69	97,78	95,83	93,75
4	Итого дефицит потребного финансирования в 2024–2027 гг., млрд руб.	387,06			
Нижняя граница доверительного интервала (рис. 1)					
5	Покрытие потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки нефти и нефтепродуктов, черных металлов, каменного угля по инфраструктуре Восточного полигона, %	11,37	12,29	13,42	14,72
6	Дефицит потребного финансирования, %	88,63	87,71	86,58	85,28
7	Дефицит потребного финансирования, млрд руб.	101,93	100,87	99,57	98,07
8	Итого дефицит потребного финансирования в 2024–2027 гг., млрд руб.	400,44			

Примечание. Оценка автора на основе данных источников [2, 11–15]

Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. от перевозки грузов по контрактам ship-or-put по инфраструктуре Восточного полигона составит $(160 / 460) 100 \% = 34,78 \%$ (отталкиваясь от данных ОАО «РЖД»), что в 1,8–3 раза превышает полученные нами оценки (табл. 5).

Однако результат любого прогнозирования зависит от использованной методики (мы не знаем, какую методику использовало ОАО «РЖД» для своей оценки финансовых ресурсов, запрашиваемых из ФНБ на подэтап 3.1 модернизации Восточного полигона) и от использованных предпосылок. К примеру, если предположить, что провозная способность Восточного полигона составит в 2024–2027 гг. 45 % от объема погрузки на инфраструктуре ОАО «РЖД» по перевозке каменного угля, нефти и нефтепродуктов, черных металлов (а не 28 %, как заложено нами в расчеты — табл. 3, т. е. будет расти быстрее, что согласуется с текущими реалиями резкого изменения географии грузопотоков), то покрытие потребного финансирования этапа 3.1 модернизации Восточного полигона контрактами ship-or-put составит, по нашим оценкам, от 17,74–20,77 % до 22,97–28,82 % ежегодно с итоговым дефицитом потребного финансирования от 346,20 до 367,07 млрд руб. (т. е. от 75,26 до

79,90 % от необходимого), что существенно ближе к оценке, основанной на расчете ОАО «РЖД» дополнительного потребного финансирования из ФНБ [13, 14].

Несмотря на скромные размеры полученной нами оценки возможности финансирования модернизации Восточного полигона с помощью контрактов ship-or-raw в среднесрочной перспективе, следует подчеркнуть, что классический механизм ship-or-raw предполагает использование долгосрочных контрактов продолжительностью до 20–30 лет [16]. Поэтому если ОАО «РЖД» сможет (при разработке соответствующей нормативной базы) заключить (и реализовать) подобные контракты с крупными грузоотправителями, использующими Восточный полигон, то появятся определенные гарантии полного возврата многомиллиардных инвестиций из бюджета ФНБ и других источников финансирования.

Предложенная и использованная нами в данной работе методика оценки покрытия потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом ОАО «РЖД» 2024–2027 гг. по инфраструктуре Восточного полигона по договорам ship-or-raw может быть улучшена путем совершенствования методов и предпосылок прогнозирования финансового результата от перевозок каменного угля, нефти и нефтепродуктов, черных металлов. Улучшенная методика, а также уточнение исходных количественных данных (прежде всего в части общего объема потребного финансирования) могут быть использованы для уточнения оценок покрытия потребного финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона финансовым результатом от контрактов ship-or-raw, в том числе и в долгосрочной перспективе.

Заключение

Данная работа посвящена оценке возможности использования механизма ship-or-raw для финансирования подэтапа 3.1 модернизации Восточного полигона. Для осуществления такой оценки мы использовали предложенную нами методику оценки покрытия потребного финансирования модернизации Восточного полигона с использованием договоров ship-or-raw. Согласно полученной оценке данное прогнозное покрытие составляет приблизительно (в среднем) от 1/6 до 1/4 от необходимого в среднесрочной перспективе (2024–2027 гг.) и уступает оценке, полученной на основе данных ОАО «РЖД» (до 1/3 от необходимого в среднесрочной перспективе). В долгосрочной перспективе (20–30 лет) данное прогнозное покрытие может составить до 100 % от необходимого.

Полученные результаты могут использоваться в целях формирования политики использования контрактов ship-or-raw для финансирования модернизации объектов железнодорожной инфраструктуры, а также для дальнейших исследований возможностей использования механизма ship-or-raw на транспорте.

Библиографический список

1. РЖД рассчитывают на 300 млрд руб. из ФНБ для третьего этапа развития Восточного полигона. Новости Интерфакс от 11 июля 2023 г. — URL: <https://www.interfax.ru/business/911046> (дата обращения: 20.10.2023).
2. Задорожный М. «Третьим будешь? А вторым?» РЖД не против оплатить третью очередь Восточного полигона за счет клиентов через принцип «вези или плати» / М. Задорожный, А. Войцеховский // Vgudok от 4 июля 2023 г. — URL: <https://vgudok.com/tarifnye-voyny/tretim-budesh-vtorym-rzhd-ne-protiv-oplatit-tretyu-ochered-vostochnogo-poligona-za> (дата обращения: 20.10.2023).
3. Гурьева А. В. Как приблизить Дальний Восток: пути снижения транспортных издержек / А. В. Гурьева // Экономика и инновации: сборник статей дипломантов межвузовской научно-практической конференции. — М., 2022. — С. 19–23.
4. Сладкова А. Н. Поставка каменного угля из Кемеровской области на восток. Принцип ship-or-pay / А. Н. Сладкова, О. В. Князькина // Поколение будущего: взгляд молодых ученых — 2021: сборник научных статей 10-й Международной молодежной научной конференции. — Курск, 2021. — С. 238–241.
5. Сеницын С. А. Механизм take or pay в транспортных обязательствах: вопросы правовой квалификации и развития законодательства / С. А. Сеницын, М. О. Дьяконова, П. Д. Багрянская // Законы России: опыт, анализ, практика. — 2022. — № 1. — С. 78–84.
6. Салыгин В. И. Зарубежный опыт применения принципа «качай или плати» в сфере трубопроводного транспорта / В. И. Салыгин, И. А. Гулиев, А. О. Хубаева // Вестник МГИМО-Университета. — 2015. — № 4(43). — С. 46–52.
7. Журавлева Н. А. Финансирование проектов развития железнодорожной инфраструктуры: актуальные решения для России / Н. А. Журавлева, А. Ю. Панычев // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. — 2015. — № 2. — С. 122–141.
8. Гулый И. М. Методология оценки экономических эффектов инвестирования в цифровые технологии на транспорте / И. М. Гулый // Транспортные системы и технологии. — 2019. — Т. 5. — № 4. — С. 124–133.
9. Волкова Е. М. Факторы, определяющие успех реализации проектов строительства высокоскоростных магистралей / Е. М. Волкова // Транспортные системы и технологии. — 2020. — Т. 6. — № 2. — С. 5–19.
10. Kazanskaya L. F. Supersulfated cement applied to produce lightweight concrete / L. F. Kazanskaya, O. M. Smirnova, A. Palomo et al. // Materials — 2021. — Vol. 14. — Iss. 2. — Pp. 1–14.
11. Хусаинов Ф. Доходность перевозок различных грузов (для РЖД) по итогам 2014–2022 гг. / Ф. Хусаинов. — URL: <https://f-husainov.livejournal.com/> (дата обращения: 20.10.2023).
12. Финансовая отчетность ОАО «РЖД» по РСБУ за 2015–2021 гг. — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9471> (дата обращения: 20.10.2023).
13. Потаева К. РЖД скорректировала программу модернизации БАМа и Транссиба. Ведомости от 11 июля 2023 г. / К. Потаева, А. Литова. — URL: <https://www.vedomosti.ru/business/>

articles/2023/07/11/984674-rzhd-skorrektirovala-programmu-modernizatsii-bama (дата обращения: 20.10.2023).

14. Скорлыгина Н. Третий пошел. ОАО «РЖД» готовится к третьему этапу модернизации БАМа и Транссиба / Н. Скорлыгина // Коммерсантъ от 11 сентября 2023 г. — URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6197185> (дата обращения: 20.10.2023).

15. Объем погрузки основных видов грузов на железнодорожном транспорте (с 2005 г.). Данные Росстата. — URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31076> (дата обращения: 20.10.2023).

16. Lorentzsen N. M. Coal Slurry Pipelines: A Railroad Perspective / N. M. Lorentzsen // *Transp. LJ.* — 1978. — Vol. 10. — Iss. 1. — Pp. 153–169.

Дата поступления: 08.09.2023

Решение о публикации: 11.11.2023

Контактная информация:

ЕГОРОВ Юрий Владимирович — канд. экон. наук, доц.; orion56@mail.ru

Assessment of the Possibility of Using the “Ship-or-Pay” Mechanism to Finance Substage 3.1 of the Modernization of the Eastern Polygon

Yu. V. Egorov

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

For citation: Egorov Yu. V. Assessment of the Possibility of Using the “Ship-or-Pay” Mechanism to Finance Substage 3.1 of the Modernization of the Eastern Polygon. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 173-186. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-173-186

Summary

Purpose: Quantitative assessment of the possibility of using the “ship-or-pay” mechanism to finance substage 3.1 of the modernization of the Eastern polygon in the medium and long term. **Methods:** Generalization, analysis, systematization, comparative method, statistical method, econometric modeling have been used. **Results:** A methodology has been developed for assessing the coverage of the required financing for the modernization of the Eastern polygon using ship-or-pay agreements. Using the developed methodology, a forecast assessment of the financing coverage for substage 3.1 of the modernization of the Eastern polygon has been made in the medium and long term. The obtained estimate is also compared with the estimate calculated on the basis of data from JSCo “Russian Railways” on the volume of requested funding from the National Welfare Fund. **Practical significance:** The results obtained can be used to formulate a policy for using ship-or-pay contracts to finance the modernization of railway infrastructure, as well as in further research into the possibilities of using the ship-or-pay mechanism on transport.

Keywords: Ship-or-pay mechanism, railway infrastructure, financing, modernization, Eastern polygon, forecast.

References

1. RZhD rasschityvayut na 300 mlrd rub. iz FNB dlya tret'ego etapa razvitiya Vostochnogo poligona. *Novosti Interfaks ot 11 iyulya 2023 g.* [Russian Railways are counting on 300 billion rubles. from the National Welfare Fund for the third stage of development of the Eastern training ground. Interfax news dated July 11, 2023]. Available at: <https://www.interfax.ru/business/911046> (accessed: October 20, 2023). (In Russian)
2. Zadorozhnyy M., Voytsekhovskiy A. “Tret'im budesh'? A vtorym?” RZhD ne protiv oplatit' tret'yu ochered' Vostochnogo poligona za schet klientov cherez printsip “vezi ili plati” [Will you be third? And the second? Russian Railways is not against paying for the third stage of the Eastern range at the expense of customers through the “take or pay” principle]. *Vgudok ot 4 iyulya 2023 g.* [Vgudok dated July 4, 2023]. Available at: <https://vgudok.com/tarifnye-voyny/tretim-budesh-vtorym-rzhd-ne-protiv-oplatit-tretyu-ochered-vostochnogo-poligona-za> (accessed: October 20, 2023). (In Russian)
3. Gur'eva A. V. Kak priblizit' Dal'niy Vostok: puti snizheniya transportnykh izderzhek [How to bring the Far East closer: ways to reduce transport costs]. *Ekonomika i innovatsii: sbornik statey diplomantov mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Economics and Innovation: a collection of articles by graduates of the interuniversity scientific-practical conference]. Moscow, 2022, pp. 19–23. (In Russian)
4. Sladkova A. N., Knyaz'kina O. V. Postavka kamennogo uglya iz Kemerovskoy oblasti na vostok. Printsip ship-or-pay [Supply of coal from the Kemerovo region to the east. Ship-or-pay principle]. *Pokolenie budushchego: vzglyad molodykh uchenykh — 2021: sbornik nauchnykh statey 10-y Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii* [Generation of the future: the view of young scientists — 2021: collection of scientific articles of the 10th International Youth Scientific Conference]. Kursk, 2021. pp. 238–241. (In Russian)
5. Sinitsyn S. A., D'yakonova M. O., Bagryanskaya P. D. Mekhanizm take or pay v transportnykh obyazatel'stvakh: voprosy pravovoy kvalifikatsii i razvitiya zakonodatel'stva [The take or pay mechanism in transport obligations: issues of legal qualification and development of legislation]. *Zakony Rossii: opyt, analiz, praktika* [Laws of Russia: experience, analysis, practice]. 2022, Iss. 1, pp. 78–84. (In Russian)
6. Salygin V. I., Guliev I. A., Khubaeva A. O. Zarubezhnyy opyt primeneniya printsipa “kachay ili plati” v sfere truboprovodnogo transporta [Foreign experience in applying the “pump or pay” principle in the field of pipeline transport]. *Vestnik MGIMO-Universiteta* [Bulletin of MGIMO-University]. 2015, Iss. 4(43), pp. 46–52. (In Russian)
7. Zhuravleva N. A., Panychev A. Yu. Finansirovanie projektov razvitiya zheleznodorozhnoy infrastruktury: aktual'nye resheniya dlya Rossii [Financing projects for the development of railway infrastructure: current solutions for Russia]. *ETAP: ekonomicheskaya teoriya, analiz, praktika* [STAGE: economic theory, analysis, practice]. 2015, Iss. 2, pp. 122–141. (In Russian)
8. Gulyy I. M. Metodologiya otsenki ekonomicheskikh effektiv investirovaniya v tsifrovye tekhnologii na transporte [Methodology for assessing the economic effects of investing in digital

technologies in transport]. *Transportnye sistemy i tekhnologii* [Transport systems and technologies]. 2019, vol. 5, Iss. 4, pp. 124–133. (In Russian)

9. Volkova E. M. Faktory, opredelyayushchie uspekhi realizatsii proektov stroitel'stva vysokoskorostnykh magistralei [Factors determining the success of the implementation of projects for the construction of high-speed highways]. *Transportnye sistemy i tekhnologii* [Transport systems and technologies]. 2020, vol. 6, Iss. 2, pp. 5–19. (In Russian)

10. Kazanskaya L. F., Smirnova O. M., Palomo Á. et al. Supersulfated cement applied to produce lightweight concrete. *Materials*, 2021, vol. 14, Iss. 2, pp. 1–14.

11. Khusainov F. *Dokhodnost' perezovozok razlichnykh gruzov (dlya RZhD) po itogam 2014–2022 gg.* [Profitability of transportation of various cargoes (for Russian Railways) based on the results of 2014–2022]. Available at: <https://f-husainov.livejournal.com/> (accessed: October 20, 2023).

12. *Finansovaya otchetnost' OAO "RZhD" po RSBU za 2015–2021 gg.* [Financial statements of JSC Russian Railways according to RAS for 2015–2021]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9471> (accessed: October 20, 2023).

13. Potaeva K., Litova A. *RZhD skorrektirovala programmu modernizatsii BAMa i Transsiba. Vedomosti ot 11 iyulya 2023 g.* [Russian Railways adjusted the modernization program of the BAM and Trans-Siberian Railway. Gazette of July 11, 2023]. Available at: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/07/11/984674-rzhd-skorrektirovala-programmu-modernizatsii-bama> (accessed: October 20, 2023).

14. Skorlygina N. Tretiy poshel. OAO "RZhD" gotovitsya k tret'emu etapu modernizatsii BAMa i Transsiba [The third one went. JSC Russian Railways is preparing for the third stage of modernization of the BAM and Trans-Siberian Railways]. *Kommersant* ot 11 sentyabrya 2023 g. [Kommersant dated September 11, 2023]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/6197185> (accessed: October 20, 2023).

15. *Ob'em pogruzki osnovnykh vidov gruzov na zheleznodorozhnom transporte (s 2005 g.). Dannye Rosstata* [Volume of loading of main types of cargo by rail (since 2005). Rosstat data]. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/31076> (accessed: October 20, 2023).

16. Lorentzen N. M. Coal Slurry Pipelines: A Railroad Perspective. *Transp. LJ.*, 1978, vol. 10, Iss. 1, pp. 153–169. (In Russian)

Received: September 08, 2023

Accepted: November 11, 2023

Author's information:

Yuriy V. EGOROV — PhD in Economics, Associate Professor; orion56@mail.ru

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 621.54

Исследование возможностей снижения энергоемкости адсорбционных процессов при высоких требованиях к влагосодержанию сжатого воздуха

Т. Л. Риполь-Сарагоси¹, А. А. Воробьев², А. А. Соболев², А. Н. Цыбульский²

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

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

Для цитирования: Риполь-Сарагоси Т. Л., Воробьев А. А., Соболев А. А., Цыбульский А. Н. Исследование возможностей снижения энергоемкости адсорбционных процессов при высоких требованиях к влагосодержанию сжатого воздуха // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 187-200. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-187-200

Аннотация

Цель: Исследование возможности снижения энергоемкости адсорбционных процессов при высоких требованиях к влагосодержанию сжатого воздуха. **Результаты:** Показано, что молекулярное сито RS-144M имеет наименьшую массу среди всех представленных адсорбентов благодаря своей низкой плотности, что позволяет снизить вес адсорбционной установки. **Практическая значимость:** Использование молекулярных сит, произведенных на основе цеолита, способствует снижению энергоемкости процесса осушки сжатого воздуха. Наиболее эффективным является молекулярное сито RS-144M. Оно позволяет осушать сжатый воздух до соответствия требованиям самых высоких классов чистоты по влаге, гарантируя при этом наименьшие энергозатраты.

Ключевые слова: Сжатый воздух, адсорбция, влагосодержание, молекулярное сито, энергозатраты, осушка.

Введение

Сжатый воздух является широко используемым технологическим энергоносителем на подвижном составе магистрального и промышленного транспорта, промышленных предприятиях и предприятиях железнодорожного транспорта. Как правило, сжатый воздух, поступающий в пневмосистемы подвижного состава магистрального и промышленного транспорта, а также системы УЗОТ ПТО

вагонных депо, содержит в своем составе взвешенные вещества, масло (при наличии поршневых компрессоров) и влагу. Наличие влаги в пневматических магистралях локомотивов как железнодорожного, так и промышленного подвижного состава опасно тем, что, попадая в приборы, управляющие процессами торможения, — воздухораспределители, при отрицательной температуре наружного воздуха замерзает, образуя ледяные пробки, закупоривающие калиброванные отверстия воздухораспределителей, что реально угрожает безопасности движения поездов [1]. В случае с локомотивами промышленного транспорта к проблемам, связанным с перемерзанием тормозных магистралей и приборов, добавляется проблема перемерзания разгрузочных магистралей и клапанов опрокидывания думпкаров, что приводит к снижению безопасности движения в карьерах, имеющих 40 ‰ уклоны и возникновению существенных финансовых затрат при обслуживании данного типа подвижного состава. Следовательно, качественная подготовка сжатого воздуха на подвижном составе железных дорог, предприятий железнодорожного и промышленного транспорта, особенно в части снижения его влагосодержания в соответствии с ГОСТ Р 53977—2010, 32202—2013 и ИСО 8573-3 является важнейшей задачей, решение которой позволит как повысить безопасность движения подвижного состава, так и снизить затраты на его внеплановые ремонты. Решение данного вопроса представлено в виде возможности использования трех основных технологий осушки сжатого воздуха, разработанных учеными Советского Союза и Российской Федерации, а именно технологии звуковой коагуляции [2], технологии термодинамической осушки [3], технологии адсорбционной осушки [4]. Технология звуковой коагуляции ввиду наличия дорогостоящего оборудования и сложности управления его работой не имела промышленного внедрения, технология термодинамической осушки сжатого воздуха была внедрена на серийно выпускаемых Днепропетровским электровозостроительным заводом грузовых, пассажирских локомотивах, а также локомотивах промышленного транспорта, пяти УЗОТ ПТО вагонных депо Северо-Кавказской железной дороги [5]. Широкие возможности внедрения получила технология адсорбционной осушки сжатого воздуха [6, 7]. Эффективность осушки сжатого воздуха при применении адсорбционной технологии выше, чем у предыдущих технологий, однако ее недостатком является высокая энергоемкость процесса, что не согласуется с приоритетами энергетической стратегии России до 2035, а именно — ее пунктов, касающихся перехода к энергосберегающим технологиям и энергоэффективной энергетике во всех отраслях промышленности [8]. Таким образом, актуальность представленных исследований, связанных с определением факторов влияния на энергоэффективность адсорбционной осушки сжатого воздуха для высоких классов чистоты при использовании в качестве адсорбента цеолита различных марок очевидна и представляет интерес для широкого круга специалистов.

Анализ имеющихся исследований

Вопросами осушки сжатого воздуха в пневмосистемах подвижного состава занимались в Советском Союзе такие ученые, как И. Я. Виноходов — автор установки для осушения сжатого воздуха методом звуковой коагуляции, Ю. Н. Головач — автор и разработчик систем осушки сжатого воздуха с помощью адсорбции влаги силикагелем и древесными опилками, а также Л. Ф. Риполь-Сарагоси — предложивший систему осушки сжатого воздуха с помощью жалюзийных сепараторов, встроенных в резервуары на УЗОТ ПТО вагонных депо [9]. Адсорбционная осушка сжатого воздуха может быть реализована при использовании адсорбентов различных видов, таких как: силикагель, цеолит, алюмогель, активированный уголь [10]. Как выявлено в работах [11, 12], энергетические затраты на проведение адсорбционной осушки сжатого воздуха связаны как с физическими свойствами самих адсорбентов, которые определяют величину падения давления при прохождении сжатым воздухом адсорбционного слоя, так и со скоростью движения сжатого воздуха, величиной относительной влажности атмосферного воздуха, поступающего на сжатие в компрессор, а также иными факторами влияния, определенными как в работах автора, так и других исследователей. В работах различных авторов, датируемых 70–80 годами прошлого столетия, а также работах [13, 14], связанных с изучением энергозатратности адсорбционной осушки сжатого воздуха, был рассмотрен в качестве фактора влияния исключительно способ засыпки адсорбента-силикагеля. Исследований с выявлением иных факторов влияния и других адсорбентов до 2018 года не проводилось. Начало их можно датировать результатами, представленными в работе [10]. Следовательно, определение в ходе аналитических исследований широкого спектра факторов влияния на энергозатратность процесса осушки сжатого воздуха, как и расширение списка представленных адсорбентов, несомненно, представляет научный интерес для широкого круга специалистов. Сама по себе осушка сжатого воздуха является процессом энергоемким вследствие неизбежности потерь энергии при его проведении. Как было установлено [10, 15], возникающие в процессе адсорбционной осушки энергетические потери связаны не только с гидравлическими потерями, но и с физическими свойствами адсорбента, относительной влажностью атмосферного воздуха и др. [16].

Таким образом, представленный в статье материал исследований, связанный с определением энергетических затрат на проведение процесса адсорбционной осушки для второго и первого классов чистоты, в соответствии с нормативными документами актуален, обладает признаками новизны и является вкладом в разработку энергоэффективных технологий.

Обсуждение

Среди наиболее распространенных адсорбентов, широко используемых в процессах осушки сжатого воздуха, можно выделить четыре — активированный уголь, силикагель, алюмогель, цеолиты.

Очевидно, что для выбора марки исследуемого адсорбента с целью определения его энергетической эффективности первоначально сформулируем критерии выбора. К ним относятся:

- получаемая точка росы и класс чистоты сжатого воздуха после осушки;
- насыпная плотность и размер пор;
- влагоемкость;
- порозность;
- стоимость.

Для аналитического сравнения свойств наиболее применяемых в промышленности видов адсорбентов составим таблицу их характеристик. Безусловно, для обоснованного выбора исследуемого адсорбента необходимо проанализировать перечень их физических характеристик, представленных в табл. 1.

Анализ данных, представленных в табл. 1, позволяет отметить, что среди наиболее используемых адсорбентов на сети железных дорог можно выделить силикагель, алюмогель, цеолиты и активные угли. Очевидно также, что по своим теплофизическим характеристикам наибольшее предпочтение при использовании их в технологиях адсорбционной осушки сжатого воздуха можно отдать цеолитам. Именно они и произведенные на их основе молекулярные сита широко применяются в качестве адсорбентов, например, благодаря способности к высокой избирательной адсорбции веществ по размеру и форме молекул.

Для исследования вопроса о выборе наиболее энергоэффективной марки цеолита с точки зрения энергозатрат при проведении процесса осушки сжатого воздуха были выбраны следующие адсорбенты:

- синтетический цеолит NaA;
- синтетический цеолит Ka-CO;
- молекулярное сито RS-CMS;
- молекулярное сито RS-144M.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные характеристики адсорбентов

Вид адсорбента	Силикагель	Алюмогель	Цеолит	Активный уголь
Характеристика				
Температура точки росы, °С	От –40 до –70	Выше –40	От –60 до –90	—
Насыпная плотность, кг/м ³	500–800	450–800	600–800	300–600
Температура регенерации, °С	140–200	170–320	190–320	200–350
Влагоемкость, %	40–50	35–45	50–60	30–40
Объем пор, см ³ /г	0,3–1,2	0,4–0,7	0,4–1,0	0,67–1,0

ТАБЛИЦА 2. Основные характеристики исследуемых цеолитов и молекулярных сит

Вид адсорбента	Цеолит NaA	Цеолит Ka-CO	MC RS-CMS	MC RS-144M
Характеристика				
Размер пор, Å	4	3	3,5–4	3
Насыпная плотность, кг/м ³	850 ± 50	850 ± 50	650 ± 50	500 ± 50
Влагоемкость, %	58	58,5	56	64

Основные характеристики данных цеолитов и произведенных на их основе молекулярных сит приведены в табл. 2.

Исходя из данных, приведенных в табл. 2, очевидно, что молекулярное сито RS-144M обладает наименьшей насыпной плотностью и наиболее высоким значением влагоемкости. Примерно одинаковое значение насыпной плотности у двух исследуемых марок цеолитов, но при этом они отличаются значениями влагоемкости и размерами пор. Наименьшей влагоемкостью обладает молекулярное сито RS-CMS, но при этом имеет значение насыпной плотности ниже, чем у цеолитов.

У каждого из этих адсорбентов есть свои преимущества и недостатки.

Расчеты по определению энергозатрат на привод компрессора при использовании каждого из представленных адсорбентов произведем по алгоритму [16], в котором конечное влагосодержание d_k принимается в зависимости от класса чистоты сжатого воздуха по ГОСТ Р ИСО 8573-1—2016. Для 2-го класса — 0,01 г/м³ (точка росы –40 °C).

Аэродинамическое сопротивление Δp слоя адсорбента с учетом влияния межгранульного пространства определяется по формуле:

$$\Delta p = 9,81 \cdot w^2 \cdot H \cdot \varepsilon,$$

где ε — порозность слоя адсорбента;

w — скорость движения сжатого воздуха через адсорбер м/сек;

H — высота слоя адсорбента в адсорбционной колонне, м.

Наличие в формуле величины порозности позволяет учесть влияние пустот между гранулами, входящих в значение насыпной плотности адсорбента, на потери скорости движения сжатого воздуха. На основе знания потерь, определяемых по величине аэродинамического сопротивления, рассчитываются потери мощности на привод компрессора ΔN [16].

Фрагмент расчета Δp и ΔN в программе Excel представлен на рис. 1.

Результаты расчетов характеристик, названных выше, при изменении скорости движения потока от 0,2 до 0,5 м/с и относительной влажности от 50 до 100 % для цеолита NaA, цеолита KA-CO, молекулярного сита RS-144M и MC-CMS рассчитаны и визуализированы в виде гистограмм, представленных на рис. 2, 3. Анализ полученных данных показал, что минимальные затраты энергии на привод

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Цеолит NaA					Цеолит Ka-CO			
2	Расход влажного сж. воздуха Q , л/мин; м ³ /с	750	0,75	0,0125		Расход влажного сж. воздуха Q , л/мин; м ³ /с	750	0,75	0,0125
3	Начальное влагосодержание C_0 , г/кг	3,6564923	33,4825			Начальное влагосодержание C_0 , г/кг	3,65649	33,4825	
4	Конечное влагосодержание C_1 , г/кг	0,01	(по классу чистоты)			Конечное влагосодержание C_1 , г/кг	0,01	(по классу чистоты)	
5	Время адсорбции t , мин	60				Время адсорбции t , мин	60		
6	Динамическая влагоемкость, A_d	0,58				Динамическая влагоемкость, A_d	0,585		
7	Масса адсорбента, M , кг	282,91751				Масса адсорбента, M , кг	280,499		
8	Объем адсорбента, V_c , м ³	0,3328441				Объем адсорбента, V_c , м ³	0,33		
9	Насыпная и кажущаяся плотности, кг/м ³	850	1240			Насыпная и кажущаяся плотности, кг/м ³	850	1360	
10	Диаметр колонны, D , м	0,1902365				Диаметр колонны, D , м	0,20489	(одинаков для всех)	
11	Скорость движения газов, w , м/с	0,2				Скорость движения газов, w , м/с	0,2		
12	Толщина слоя, H , м	11,72				Толщина слоя, H , м	10,01		
13	Доля свободного пространства	0,3145161				Доля свободного пространства	0,375		
14	Сопротивление, ΔP , бар	1,446				Сопротивление, ΔP , бар	1,474		
15	Затраты мощности на привод ΔN , Вт	2832,7214				Затраты мощности на привод ΔN , Вт	2881,37		
16	$\lg(p_2+\Delta P/p_1)$	0,9266489	8,446			$\lg(p_2+\Delta P/p_1)$	0,92806	8,4735	
17	Влажность, %	50				Влажность, %	50		
	MC RS-144M					MC RS-CMS			
19	Расход влажного сж. воздуха Q , л/мин; м ³ /с	750	0,75	0,0125		Расход влажного сж. воздуха Q , л/мин; м ³ /с	750	0,75	0,0125
21	Начальное влагосодержание C_0 , г/кг	3,6564923	33,4825			Начальное влагосодержание C_0 , г/кг	3,65649	33,4825	
22	Конечное влагосодержание C_1 , г/кг	0,01	(по классу чистоты)			Конечное влагосодержание C_1 , г/кг	0,01	(по классу чистоты)	
23	Время адсорбции t , мин	60				Время адсорбции t , мин	60		
24	Динамическая влагоемкость, A_d	0,64				Динамическая влагоемкость, A_d	0,56		
25	Масса адсорбента, M , кг	256,39399				Масса адсорбента, M , кг	293,022		
26	Объем адсорбента, V_c , м ³	0,4661709				Объем адсорбента, V_c , м ³	0,4508		
27	Насыпная плотность, кг/м ³	550	600			Насыпная плотность, кг/м ³	650	840	
28	Диаметр колонны, D , м	0,204891	аков для всех)			Диаметр колонны, D , м	0,20489	аков для всех)	
29	Скорость движения газов, w , м/с	0,2				Скорость движения газов, w , м/с	0,2		
30	Толщина слоя, H , м	14,15				Толщина слоя, H , м	13,68		
31	Доля свободного пространства	0,0833333				Доля свободного пространства	0,22619		
32	Сопротивление, ΔP , бар	0,463				Сопротивление, ΔP , бар	1,214		
33	Затраты мощности на привод ΔN , Вт	965,14664				Затраты мощности на привод ΔN , Вт	2412,48		
34	$\lg(p_2+\Delta P/p_1)$	0,87	7,4626			$\lg(p_2+\Delta P/p_1)$	0,91456	8,2142	
35	Влажность, %	50				Влажность, %	50		

Рис. 1. Фрагмент полученных результатов определения аэродинамического сопротивления и потерь мощности компрессора при адсорбции влаги из сжатого воздуха на различных марках цеолита

компрессора получены при использовании молекулярного сита RS-144M, а максимальные — у цеолита KA-CO.

Исходя из формулы определения потерь давления, за счет возникающего аэродинамического сопротивления при прохождении через различные марки цеолитов следует, что чем меньше произведение высоты колонны и порозности слоя, тем ниже должны быть значения данных сопротивлений. Однако результаты произведенных расчетов показывают, что величины аэродинамических сопротивлений не всегда имеют прямую зависимость от высоты слоя и порозности. При этом порозность зависит только от насыпной и кажущейся плотности адсорбента и является величиной постоянной, она задана характеристиками адсорбента. А высота слоя зависит от нескольких показателей, один из которых, это масса адсорбента. Масса адсорбента связана с его адсорбционной емкостью, которая стоит в знаменателе формулы ее определения. То есть для определения высоты слоя адсорбента и его порозности необходимо задействовать различные физические величины. Высота слоя и порозность определяются в соответствии с [17]. Порозность будет тем меньше, чем меньше насыпная плотность, а масса тем меньше, чем больше адсорбционная емкость. Учитывая все вышесказанное, получаем, что в формуле расчета аэродинамических сопротивлений при значении порозности меньше примерно 0,15 влияние высоты слоя адсорбента на величину аэродинамического сопротивления при прохождении сжатого воздуха через адсорбционную колонну незначительно.

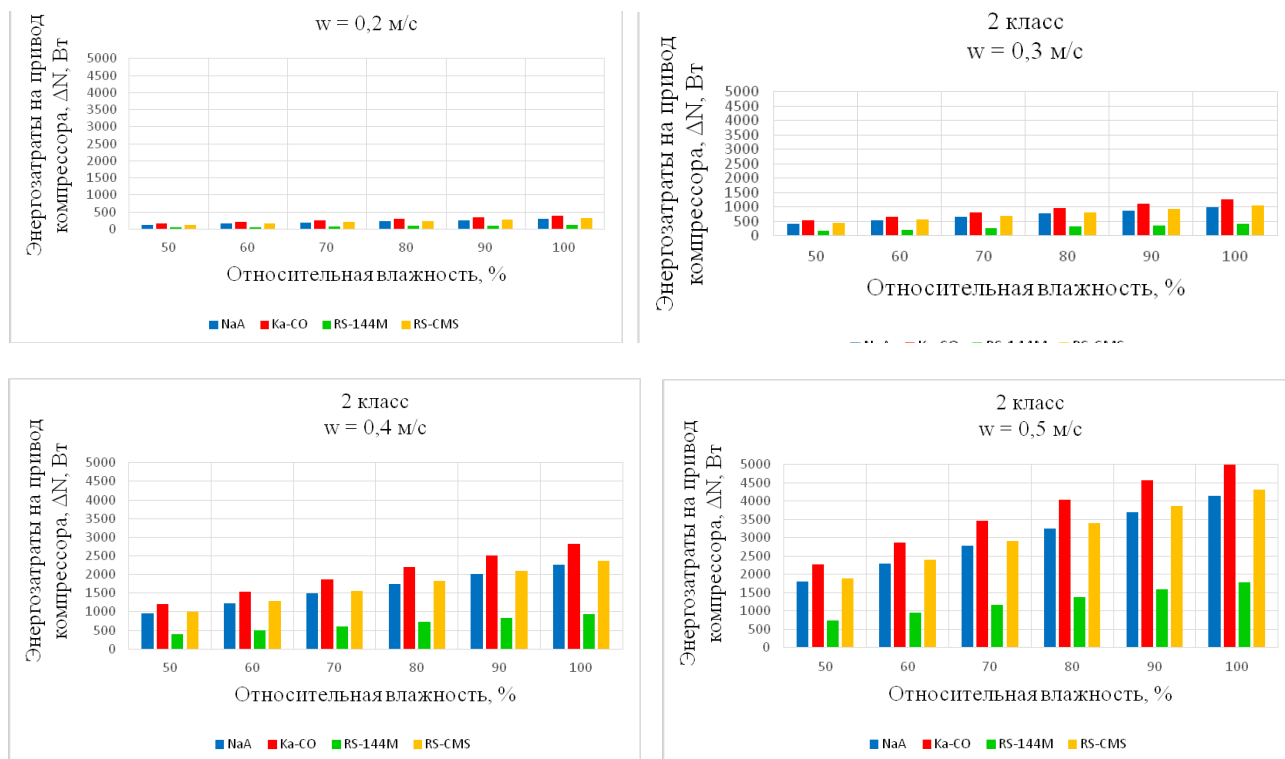


Рис. 2. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида цеолита и относительной влажности атмосферного воздуха (2-й класс частоты)

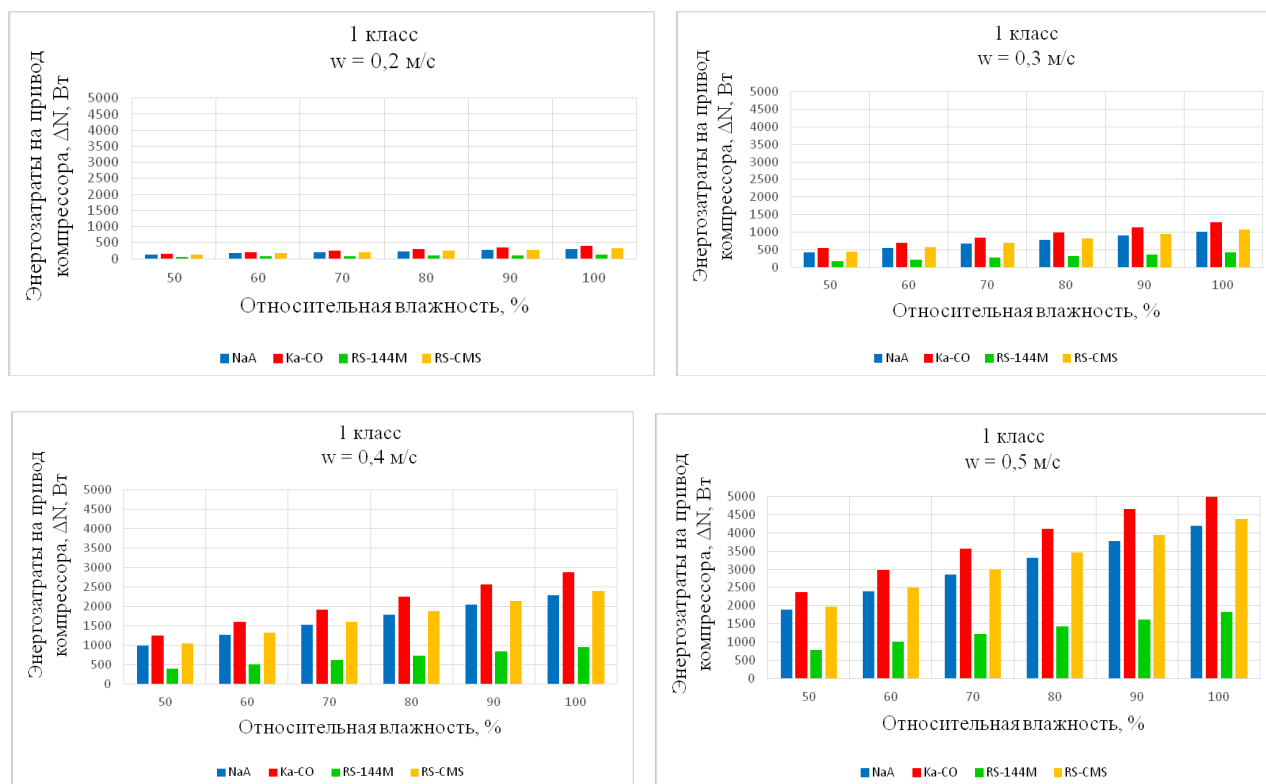


Рис. 3. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида цеолита и относительной влажности атмосферного воздуха (1 класс частоты)

При увеличении значения порозности выше 0,15 на величину аэродинамического сопротивления начинает оказывать существенное влияние высота слоя адсорбента. Для уточнения результатов и получения определенной тенденции произведем аналогичные расчеты при разных скоростях движения воздуха (от 0,2 до 0,5 м/с), классах чистоты (с 1-го по 2-й) и относительной влажности воздуха (от 50 до 100 %) (рис. 2, 3).

Анализ полученных результатов

На приведенных выше графиках отчетливо видно, что наименьшие затраты на привод компрессора обеспечивает использование в качестве адсорбента молекулярного сита RS-114M. Такое различие значений потребляемой энергии при использовании различных марок цеолитов объясняется влиянием величины порозности, которая входит в зависимость определения потерь давления при движении сжатого воздуха через колонну адсорбера.

Зависимость потерь энергии на привод компрессора при использовании в качестве осушителей сжатого воздуха исследуемых видов адсорбента для первого и второго классов чистоты при скорости движения воздуха 0,3 м/с (как наиболее часто используемой при движении сжатого воздуха через адсорбер) и относительной влажности воздуха 50 % представлена на рис. 4.

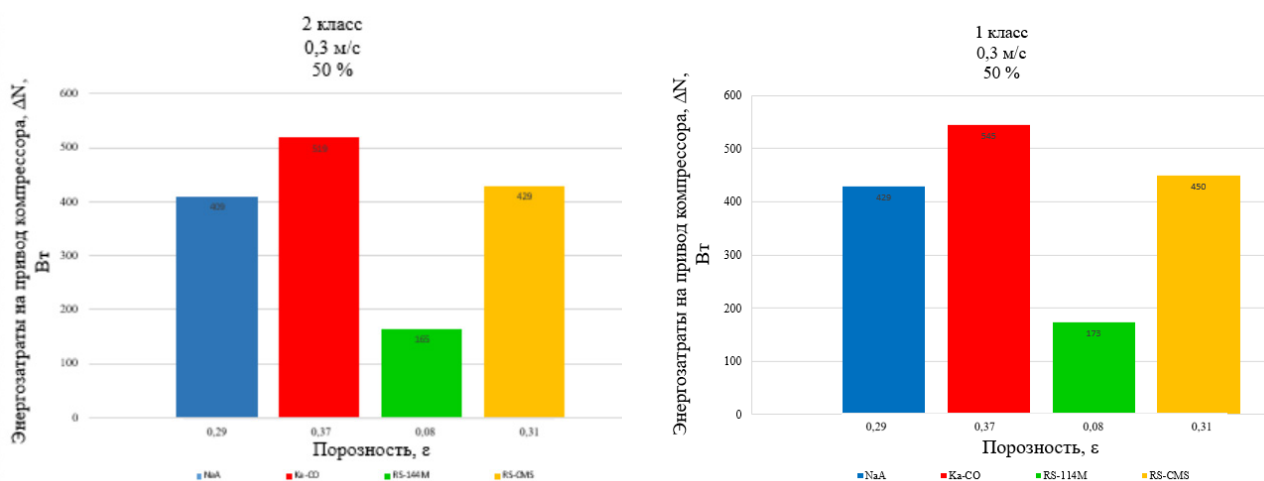


Рис. 4. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида цеолита и значения порозности

Таким образом, с повышением класса чистоты сжатого воздуха происходит увеличение энергозатрат на адсорбционную осушку сжатого воздуха. При низких значениях порозности высота слоя не оказывает заметного влияния на гидравлические сопротивления.

Выводы и рекомендации

1. Молекулярное сито RS-144M имеет наименьшую массу среди всех представленных адсорбентов благодаря своей низкой плотности, что позволяет снизить вес адсорбционной установки.

2. Наименьший объем и высоту адсорбционной засыпки в колонне имеют цеолиты NaA и Ka-CO, после него следуют молекулярные сита.

3. Применение молекулярных сит, в частности сита RS-144M, в качестве адсорбента в адсорбционных процессах осушки сжатого воздуха целесообразно, так как:

– обеспечивает одинаковую скорость движения сжатого воздуха по всей высоте адсорбционной колонны за счет низкой насыпной плотности и порозности слоя;

– позволяет произвести глубокую, избирательную осушку сжатого воздуха за счет высокой адсорбционной емкости и размера пор, соответствующего размеру молекул воды.

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

Библиографический список

1. Балон Л. В. Применение технологии механической осушки сжатого воздуха на подвижном составе железных дорог / Л. В. Балон, Т. Л. Риполь-Сарагоси // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: IV Международная научно-техническая конференция, Новочеркасск, 17–19 июня 2003 года. — Новочеркасск, 2003. — С. 350–352.

2. Виноходов И. Я. Исследование осушения сжатого воздуха на локомотивах способом звуковой коагуляции: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Ростов-на-Дону: Рост. ин-т инженеров ж.-д. транспорта, 1973. — 22 с.

3. Риполь-Сарагоси Т. Л. Повышение безопасности движения подвижного состава при использовании главных резервуаров с жалюзийными сепараторами на локомотивах / Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: тезисы 65 Международной научно-практической конференции, Днепропетровск, 19–20 мая 2005 года. — Днепропетровск: Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, 2005. — С. 55–56.

4. Головач Ю. Н. Пневмоавтоматика локомотивов / Ю. Н. Головач, И. В. Скогорев, В. О. Кубил. — Новочеркасск: Геликон, 2006, 276 с.

5. Пат. №2514871. Резервуар для осаждения и удаления влаги из сжатых газов / Т. Л. Риполь-Сарагоси.

6. Головач Ю. Н. Исследование и разработка устройств для предотвращения замерзания влаги в пневматических магистралях электроподвижного состава железнодорожного транспорта: дисс. ... канд. техн. наук / Ю. Н. Головач. — Новочеркасск, 1979. — 191 с.
7. Редин А. Л. Совершенствование устройств осушки сжатого воздуха для тормозных систем подвижного состава железных дорог: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. Л. Редин. — М., 2010. — 24 с.
8. Распоряжение от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».
9. Риполь-Сарагоси Л. Ф. Совершенствование технологии подготовки сжатого воздуха для зарядки и опробования тормозов в пунктах технического обслуживания вагонов: дисс. ... канд. техн. наук / Л. Ф. Риполь-Сарагоси. — Ростов-на-Дону, 2007. — 189 с.
10. Риполь-Сарагоси Л. Ф. Пути снижения энергоемкости процессов подготовки сжатого воздуха / Л. Ф. Риполь-Сарагоси, А. В. Борисенко // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23–26 апреля 2019 года. — Т. 1. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. — С. 360–363.
11. Риполь-Сарагоси Т. Л. Формирование критериев выбора адсорбента для осушки сжатого воздуха / Т. Л. Риполь-Сарагоси, М. А. Гладких // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–02 марта 2023 года. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. — С. 155–158.
12. Риполь-Сарагоси Т. Л. Анализ энергоэффективности различных схем адсорбционной осушки сжатого воздуха на подвижном составе / Т. Л. Риполь-Сарагоси, М. А. Гладких // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 06–07 октября 2020 года. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. — С. 81–83.
13. Редин А. Л. Совершенствование устройств осушки сжатого воздуха для тормозных систем подвижного состава железных дорог: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Л. Редин; Моск. гос. ун-т путей сообщения (МИИТ). — М., 2010. — 279 с.
14. Риполь-Сарагоси Л. Ф. Исследование энергоэффективности адсорбентов / Л. Ф. Риполь-Сарагоси, А. А. Клименко // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 20–22 апреля 2020 года. Т. 2. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. — С. 176–180.
15. Риполь-Сарагоси Л. Ф. Обоснование выбора технологии регенерации адсорбента с позиций энергоэффективности / Л. Ф. Риполь-Сарагоси, А. В. Потапов // Транспорт: наука, образование, производство: труды Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 25–27 апреля 2022 года. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2022. — С. 352–356.

16. Риполь-Сарагоси Т. Л. Исследование энергоэффективности процессов осушки сжатого воздуха с использованием цеолитов различных марок / Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2023. — № 2(90). — С. 132–138. — DOI: 10.46973/0201-727X_2023_2_132.

17. Пузырев И. С. Темплатный синтез и сорбция паров воды пористыми силикагелями с высокой удельной площадью поверхности / И. С. Пузырев, Е. П. Собина, С. В. Медведевских // Бултеровские сообщения. — 2013. — Т. 36. — № 10. — С. 141–145.

Дата поступления: 25.10.2023

Решение о публикации: 10.11.2023

Контактная информация:

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — д-р техн. наук, проф.; ripol-saragosi@mail.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; 79219751198@yandex.ru

СОБОЛЕВ Александр Албертович — канд. техн. наук, доц.; a89213194387@yandex.ru

ЦЫБУЛЬСКИЙ Артем Николаевич — аспирант; artemavatar@mail.ru

Study of the Possibilities of Reducing the Energy Intensity of Adsorption Processes with High Requirements for the Moisture Content of Compressed Air

T. L. Ripoll-Saragosi¹, A. A. Vorobyev², A. A. Sobolev², A. N. Tsybulsky²

¹Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

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

For citation: Ripoll-Saragosi T. L., Vorobyev A. A., Tsybulsky A. N. Study of the Possibilities of Reducing the Energy Intensity of Adsorption Processes with High Requirements for the Moisture Content of Compressed Air. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 187-200. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-187-200

Summary

Purpose: Study of the possibility of reducing the energy intensity of adsorption processes with high requirements for the moisture content of compressed air. **Results:** It has been shown that the molecular sieve RS-144M has the lowest weight among all the adsorbents represented due to its low density, which makes it possible to reduce the weight of the adsorption unit; the smallest volume and height of adsorption filling in the column have zeolites NaA and Ka-CO, followed by molecular sieves; due to the release of the molecular sieve RS-144M in the form of a powder the size of the working pores of 3Å, it has a low bulk density and the smallest intergranular spaces, which provides a low value of porosity of the granules, a total of 8.3% of the total fill volume. **Practical significance:** The use of molecular sieves produced on the basis of zeolite helps to reduce the energy capacity of the compressed air drying process. The most effective is the molecular

sieve RS-144M. It allows you to dry compressed air to meet the requirements of the highest moisture purity classes, while guaranteeing the lowest energy consumption. The remaining adsorbents will also allow the compressed air to be dried to the desired purity grade, but will have an energy consumption greater than that of the RS-144M, making their use not always expedient.

Keywords: Compressed air, adsorption, moisture content, molecular sieve, energy consumption, drying.

References

1. Balon L. V., Ripol'-Saragosi T. L. *Primenenie tekhnologii mekhanicheskoy osushki szhatogo vozdukha na podvizhnom sostave zheleznykh dorog* [Application of technology for mechanical drying of compressed air on railway rolling stock]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektropodvizhnogo sostava: IV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, Novochoerkassk, 17–19 iyunya 2003 goda* [State and prospects for the development of electric rolling stock: IV International Scientific and Technical Conference, Novochoerkassk, June 17–19, 2003]. Novochoerkassk, 2003, pp. 350–352. (In Russian)

2. Vinokhodov I. Ya. *Issledovanie osusheniya szhatogo vozdukha na lokomotivakh sposobom zvukovoy koagulyatsii: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Study of compressed air drying on locomotives using the sound coagulation method: abstract. diss. ... cand. tech. Sci]. Rostov-on-Don: Rost. in-izhenerov zh.-d. transporta Publ., 1973, 22 p. (In Russian)

3. Ripol'-Saragosi T. L., Ripol'-Saragosi L. F. *Povyshenie bezopasnosti dvizheniya podvizhnogo sostava pri ispol'zovanii glavnykh rezervuarov s zhalyuziynymi separatorami na lokomotivakh* [Increasing traffic safety of rolling stock when using main tanks with louvered separators on locomotives]. *Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta: tezisy 65 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Dnepropetrovsk, 19–20 maya 2005 goda* [Problems and prospects for the development of railway transport: abstracts 65 International scientific and practical conference, Dnepropetrovsk, May 19–20, 2005]. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovskiy natsional'nyy universitet zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazaryana Publ., 2005, pp. 55–56. (In Russian)

4. Golovach Yu. N., Skogorev I. V., Kubil V. O. *Pnevmoavtomatika lokomotivov* [Pneumatic automation of locomotives]. Novochoerkassk: Gelikon Publ., 2006, 276 p. (In Russian)

5. Ripol'-Saragosi T. L. *Rezervuar dlya osazhdeniya i udaleniya vlagi iz szhatykh gazov* [Reservoir for sedimentation and removal of moisture from compressed gases]. Patent RF, no. 2514871. (In Russian)

6. Golovach Yu. N. *Issledovanie i razrabotka ustroystv dlya predotvrashcheniya zamerzaniya vlagi v pnevmaticheskikh magistralyakh elektropodvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Research and development of devices to prevent moisture freezing in pneumatic lines of electric rolling stock of railway transport: diss. ... cand. tech. Sciences]. Novochoerkassk, 1979, 191 p. (In Russian)

7. Redin A. L. *Sovershenstvovanie ustroystv osushki szhatogo vozdukha dlya tormoznykh sistem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog: avtoref. disc. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of compressed

air drying devices for brake systems of railway rolling stock: abstract. diss. ...cand. tech. Sciences]. Moscow, 2010, 24 p. (In Russian)

8. *Rasporyazhenie ot 9 iyunya 2020 g. № 1523-r "Ob utverzhdenii Energeticheskoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda"* [Order № 1523-r dated June 9, 2020 "On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period until 2035"]. (In Russian)

9. Ripol'-Saragosi L. F. *Sovershenstvovanie tekhnologii podgotovki szhatogo vozdukha dlya zaryadki i oprobvaniya tormozov v punktakh tekhnicheskogo obsluzhivaniya vagonov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the technology of preparing compressed air for charging and testing brakes at car maintenance points: diss. ...cand. tech. Sciences]. Rostov-on-Don, 2007, 189 p. (In Russian)

10. Ripol'-Saragosi L. F., Borisenko A. V. *Puti snizheniya energoemkosti protsessov podgotovki szhatogo vozdukha* [Ways to reduce the energy intensity of compressed air preparation processes]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov, Rostov-na-Donu, 23–26 aprelya 2019 goda* [Transport: science, education, production: collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 23–26, 2019]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2019, vol. 1, pp. 360–363. (In Russian)

11. Ripol'-Saragosi T. L., Gladkikh M. A. *Formirovanie kriteriev vybora adsorbenta dlya osushki szhatogo vozdukha* [Formation of criteria for choosing an adsorbent for drying compressed air]. *Energetika transporta. Aktual'nye problemy i zadachi: sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Rostov-na-Donu, 01–02 marta 2023 goda* [Transport Energy. Current problems and tasks: collection of scientific papers of the VII International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, March 01–02, 2023]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2023, pp. 155–158. (In Russian)

12. Ripol'-Saragosi T. L., Gladkikh M. A. *Analiz energoeffektivnosti razlichnykh skhem adsorbtsionnoy osushki szhatogo vozdukha na podvizhnom sostave* [Analysis of the energy efficiency of various schemes for adsorption drying of compressed air on rolling stock]. *Energetika transporta. Aktual'nye problemy i zadachi: sbornik nauchnykh trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Rostov-na-Donu, 06–07 oktyabrya 2020 goda* [Transport Energy. Current problems and tasks: collection of scientific papers of the IV International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, October 06–07, 2020]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2020, pp. 81–83. (In Russian)

13. Redin A. L. *Sovershenstvovanie ustroystv osushki szhatogo vozdukha dlya tormoznykh sistem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improvement of compressed air drying devices for brake systems of railway rolling stock: dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Moscow: Mosk. gos. un-t putey soobshcheniya (MIIT) Publ., 2010, 279 p. (In Russian)

14. Ripol'-Saragosi L. F., Klimenko A. A. *Issledovanie energoeffektivnosti adsorbentov* [Study of the energy efficiency of adsorbents]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov, Rostov-na-Donu, 20–22 aprelya 2020 goda* [Transport: science, education, production: collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 20–22 2020]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2020, vol. 2, pp. 176–180. (In Russian)

15. Ripol'-Saragosi L. F., Potapov A. V. Obosnovanie vybora tekhnologii regeneratsii adsorbenta s pozitsiy energoeffektivnosti [Justification for the choice of adsorbent regeneration technology from the standpoint of energy efficiency]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Rostov-na-Donu, 25–27 aprelya 2022 goda* [Transport: science, education, production: proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don on-Don, April 25–27, 2022]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2022, pp. 352–356. (In Russian)

16. Ripol'-Saragosi T. L., Ripol'-Saragosi L. F. Issledovanie energoeffektivnosti protsessov osushki szhatogo vozdukha s ispol'zovaniem tseolitov razlichnykh marok [Study of the energy efficiency of compressed air drying processes using zeolites of various grades]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University]. 2023, Iss. 2(90), pp. 132–138. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_2_132. (In Russian)

17. Puzyrev I. S., Sobina E. P., Medvedevskikh S. V. Templatnyy sintez i sorbtsiya parov vody poristymi silikagelyami s vysokoy udel'noy ploshchad'yu poverkhnosti [Template synthesis and sorption of water vapor by porous silica gels with a high specific surface area]. *Butlerovskie soobshcheniya* [Butlerov Communications]. 2013, vol. 36, Iss. 10, pp. 141–145. (In Russian)

Received: October 25, 2023

Accepted: November 10, 2023

Author's information:

Tatyana L. RIPOLL-SARAGOSI — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ripol-saragosi@mail.ru

Alexander A. VOROBYEV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor;
79219751198@yandex.ru

Alexander A. SOBOLEV — PhD in Engineering, Associate Professor; a89213194387@yandex.ru

Artem N. Tsybul'sky — Postgraduate Student; artemavatar@mail.ru