

Главный редактор Д. П. Кононов, докт. техн. наук, доцент
Editor-in-chief D. Kononov, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Заместитель главного редактора А. К. Канаев, докт. техн. наук, профессор

Deputy chief editor A. Kanayev, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Научный редактор Т. С. Титова, докт. техн. наук, профессор
Scientific Editor T. Titova, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Перевод на английский язык А. А. Лобанова
English translation Anastasia A. Lobanova

Литературное редактирование и корректура Н. А. Ванеева
Editing and proofreading Nonna A. Vaneeva

Верстка В. В. Боткина
Layout Victoriya V. Botkina

Учредитель

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

Издатель

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

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Media Service LLC № ЭА00271, 19.12.2023

Контакты

190031, СПб., Московский пр., 9, тел. (812) 457-85-36;

e-mail: brni@pgups.ru;

111116, Москва, ул. Энергетическая, 16, корп. 2, пом. 67, комн. 1

Contacts

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 457-85-36;

e-mail: brni@pgups.ru;

111116, Moscow, Energeticheskaya str., 16/2, building 67, room 1

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

Подписано в печать 29.03.2024.

Формат 60×84/16. Уч.-изд. л. 21,5.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

INTERNATIONAL EDITORIAL

Валинский Олег Сергеевич, канд. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель Совета

Oleg Valinskiy, PhD Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Хамидов Отабек Рустамович, докт. техн. наук, доцент, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан

Otabek Khamidov, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Tashkent State Technical University, Tashkent, The Republic of Uzbekistan

Вэйли Ли, профессор, Институт электрических машин и приборов, Пекинский университет Цзяотун, Пекин, Китай

Weili Li, PhD Degree and Professor, School of Electrical Engineering, Director of Institute of Electrical Machinery and Appliances, Beijing Jiaotong University, Beijing, China

Ли Фушэн, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай

Li Fusheng, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China

Поляк Милош, профессор, Жилинский университет, Жилин, Словацкая Республика

Milos Poliak, Ing. PhD, Professor, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

Стыскала Витезслав, профессор, Остравский технический университет, Острава, Чешская Республика

Vitezslav Styskala, PhD, Associate Professor, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic

Чжан Чжунъян, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай

Zhang Zhongyang, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China

Владимир Грачев, докт. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Vladimir Beltyukov, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Блашко Людмила Сергеевна, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Liudmila Blazhko, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Бороненко Юрий Павлович, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Yuriy Boronenko, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грачев Владимир Васильевич, докт. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Vladimir Grachev, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грищенко Александр Васильевич, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Alexander Grishchenko, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Дудкин Евгений Павлович, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Evgeniy Dudkin, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Евстафьев Андрей Михайлович, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Andrey Evstafev, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Журавлева Наталья Александровна, докт. экон. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Natalya Zhuravleva, Dr. Econ. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Ким Константин Константинович, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Konstantin Kim, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Колпаჩьян Павел Григорьевич, докт. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Pavel Kolpakchyan, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Лapidус Лариса Владимировна, докт. экон. наук, профессор, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Larisa Lapidus, Dr. Econ. Sci., Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Никитин Александр Борисович, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Alexander Nikitin, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Никитин Виктор Валерьевич, докт. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Victor Nikitin, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Покровская Оксана Дмитриевна, докт. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Oksana Pokrovskaya, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Пудовиков Олег Евгеньевич, докт. техн. наук, доцент, РУТ, Москва, Россия

Oleg Pudovikov, Dr. Eng. Sci., Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia

Рачек Светлана Витальевна, докт. экон. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия

Svetlana Rachek, Dr. Econ. Sci., Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

Титова Таммила Семеновна, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Tamila Titova, Dr. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Штыков Валерий Иванович, член-корр. РАН, докт. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Valerij Shtykov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

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

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

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

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

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

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

Файл 1 — рукопись научной статьи в формате MS Word.

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

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

Файл 4 — информация об авторах:

- 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, кегль 14, интервал одинарный. На первой странице рукописи помещаются УДК, фамилии авторов (с указанием места обучения или работы), название статьи, аннотация и ключевые слова. Текст должен содержать введение, озаглавленные разделы, заключение.

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

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

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

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

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

Внимание! Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

Фотографии предоставляются в двух вариантах: в тексте статьи и в виде отдельных файлов TIFF и JPEG без сжатия. Название файла должно соответствовать 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. А. Беляев, Д. П. Кононов, С. В. Кротов	Проблемы диагностики современных тепловозных двигателей	7
А. Г. Отока, А. М. Лях, О. В. Холодилов	Анализ остаточной намагниченности наружных колец подшипников буксового узла колесной пары при их размагничивании на установке УМДП-01	21
И. А. Гребнев, О. Е. Пудовиков	Имитационная модель поезда для учета влияния ветровых нагрузок	30
Ф. А. Сорокин	Совершенствование структуры системы управления электроприводом переменного тока с асинхронными тяговыми электродвигателями на основе микропроцессорных вычислительных устройств	41
В. С. Пахомова, В. О. Иващенко	О совершенствовании взаимодействия локомотивных бригад пригородных поездов с ремонтными подразделениями	50
А. В. Давыдова, А. К. Канаев	Разработка методики формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена	56
Н. В. Богданов, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев, К. А. Сотников	Использование численного моделирования при анализе аэроупругого взаимодействия подвижного состава с тоннельными сооружениями	65
А. В. Кацай, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова	Определение объемов полезной и избыточной рекуперативной энергии электроподвижного состава городского электротранспорта	74
В. Г. Кондратенко, А. М. Будюкин, А. А. Воробьев, О. А. Ипполитов	Целесообразность применения цифровых трамваев на шинах в городах России	84
Т. Н. Кошелева, Т. Ю. Ксенофонтова, О. А. Гуляева	Управление дистрибуцией межрегиональных цепей поставок в рамках взаимодействия с технологиями искусственного интеллекта	97
Ф. А. Ярмолинский, О. Д. Покровская, Е. Д. Пасечник, Е. В. Пакулина, А. А. Трапезников	Особенности использования big data при исследовании грузопотоков на железнодорожном транспорте	107

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

А. М. Поликарпов, В. С. Меркушева, Д. А. Афонин	Переход от инвентаризационной стоимости объектов недвижимости к кадастровой при налогообложении недвижимости физических лиц: процесс и его последствия	123
Е. М. Волкова, А. В. Гурьянов	Развитие подходов к оценке эффективности функционирования пассажирских транспортно-пересадочных узлов	135

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Си Чжэньчао, К. В. Константинов	Обзор методов контроля и диагностики систем накопления электрической энергии	143
------------------------------------	--	-----

Contents

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

A. A. Beliaev, D. P. Kononov, S. V. Krotov	Problems of Diagnostics of Modern Diesel Engines	7
A. G. Otoka, A. M. Lyakh, O. V. Kholodilov	Analysis of the Residual Magnetization of the Outer Rings of the Bearings of the Axle Box Assembly of the Wheelset when Demagnetizing them on the UMDP-01 Installation	21
I. A. Grebnev, O. E. Pudovikov	Train Simulation Model to Take into Account the Influence of Wind Loads	30
F. A. Sorokin	Improving the Structure of the Control System for an AC Electric Drive with Asynchronous Traction Motors Based on Microprocessor Computing Devices	41
V. S. Pakhomova, V. O. Ivashchenko	On Improving the Interaction between Locomotive Brigades of Suburban Trains and Repair Units	50
A. V. Davydova, A. K. Kanaev	Development of a Methodology for Forming a Subsystem for Monitoring and Controlling the Metro Power Supply Network	56
N. V. Bogdanov, Ya. S. Vatulin, A. A. Vorob'ev, K. A. Sotnikov	Use of Numerical Modeling in Analysis of Aeroelastic Interaction of Rolling Stock with Tunnel Constructions	65
A.V. Katsay, V.A. Sharyakov, O.L. Sharyakova	Determination of the Volumes of Useful and Excess Regenerative Energy of the Electric Rolling Stock of the urban Electric Transport	74
V. G. Kondratenko, A. M. Budyukin, A. A. Vorob'ev, O. A. Ippolitov	The Feedability of Using Digital Trams on Tires in Russian Cities	84
T. N. Kosheleva, T. Yu. Ksenofontova, O. A. Gulyaeva	Interregional Supply Chain Distribution Management in the Framework of Interaction with Artificial Intelligence Technologies	97
F. A. Yarmolinsky, O. D. Pokrovskaya, E. D. Pasechnik, E. V. Pakulina, A. A. Trapezdnikov	Features of the Use of Big Data in the Study of Freight Traffic on Railway Transport	107

ECONOMICS AND MANAGEMENT

M. Polikarpov, V. S. Merkusheva, D. A. Afonin	The Transition from the Inventory Value of Real Estate to the Cadastral Value in the Taxation of Real Estate of Individuals: the Process and its Consequences	123
---	---	-----

E. M. Volkova, A. V. Guryanov	Development of Approaches for the Assessment of Passenger Transport Hubs Efficiency	135
----------------------------------	---	-----

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

Xi Zhenchao, K. V. Konstantinov	Review of Methods for Monitoring and Diagnosing Electrical Energy Storage Systems	143
------------------------------------	---	-----

УДК 629.424

Проблемы диагностики современных тепловозных двигателей

А. А. Беляев¹, Д. П. Кононов¹, С. В. Кротов²

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

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

Для цитирования: Беляев А. А., Кононов Д. П., Кротов С. В. Проблемы диагностики современных тепловозных двигателей // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1 — С. 7–20. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-7-20

Аннотация

Цель: рассмотреть вопрос диагностики современных тепловозных двигателей, в частности вибродиагностики. Рассмотреть современные стратегии и методы, основанные на виброакустических сигналах, которые позволяют осуществлять: контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа (неисправности), прогнозирование технического состояния тепловозных двигателей, а также оценку рабочего процесса в двигателе. Определить, какие средства измерения параметров вибрации и методы обработки вибросигналов можно считать наиболее надежными и информативными. Предложить внести корректировку в уже используемые в настоящее время методы обработки вибросигналов. **Методы:** сравнение эффективности средств измерения параметров вибрации и математических методов обработки вибросигналов. **Результаты:** указана необходимость выбора математических методов обработки вибросигнала как для отдельных узлов тепловозного двигателя, так и для оценки рабочего процесса. Современные математические методы применительно к вибродиагностике требуют актуализации вследствие увеличения вычислительной мощности, а также из-за развития мощных методов обработки сигналов. Для повышения достоверности результатов сравнения следует учитывать большую вариативность узлов и процессов тепловозного двигателя. Выявлена необходимость в проведении дополнительного изучения современных математических методов обработки вибросигналов. **Практическая значимость:** показана необходимость внедрения более современных методов обработки вибросигнала, что позволит оптимизировать долговечность конструкции компонентов с использованием длительных циклов эксплуатации, снизить затраты на техническое обслуживание, отслеживать сроки службы ДВС во время эксплуатации тепловоза, совершенствовать системы мониторинга и диагностики двигателя тепловоза. Представленный обзор существующих методов обработки вибросигналов, и оценка применения вейвлет-анализа может быть рекомендована для дальнейшего совершенствования вибродиагностики тепловозных дизелей.

Ключевые слова: диагностика, тепловоз, дизельный двигатель, вибродиагностика, виброакустический контроль.

Своевременная и качественная диагностика технического состояния узлов и деталей дизеля с последующим устранением обнаруженных неисправностей позволяет в значительной степени снизить большие временные и материальные затраты на

устранение этих неисправностей [1, 2]. Для выполнения операций по диагностике могут использоваться разные подходы (стратегии) в зависимости от условий эксплуатации: реостатные испытания или мониторинг в процессе эксплуатации [3–5]. Во время реостатных испытаний можно получить данные о состоянии двигателя с помощью анализа рабочих характеристик, анализа масла, визуального осмотра, анализа вибрации и акустического анализа. Во время эксплуатации это может быть наблюдение за термогазодинамическими параметрами: давлением, температурой, скоростью течения, расходом рабочих тел и др. и за эксплуатационными параметрами: давлением и температурой топлива, моторного масла, охлаждающей воды; перепадами давления на фильтрах; разрежением в картере дизеля; уровнями вибрации и т. п. Для достижения этой цели вибрационный анализ служит эффективным и мощным средством для обнаружения неисправностей на ранних этапах. Вибрация и звук, характерные для поршневых механизмов, таких как двигатели внутреннего сгорания, компрессоры и насосы, являются при этом наиболее сложными и трудно поддающимися анализу. В последние несколько лет заметно увеличилось количество работ, направленных на разработку методов обработки сигналов для мониторинга состояния не только из-за увеличения вычислительной мощности, но и большого количества методов математической обработки вибросигнала.

Вибродиагностика может применяться как для контроля вибраций дизельного двигателя в целом, так и для его основных узлов (или агрегатов). Также вибродиагностика позволяет контролировать отдельные рабочие процессы. Основные контролируемые узлы и показатели:

1) дизель-генератор (недопустимая вибрация ротора генератора и коленчатого вала дизеля из-за несоосности, дефекты крепления, вызванные изменением жесткости опорной системы и снижении ее демпфирующих свойств) [6, 7];

2) газораспределительный механизм (определение величин тепловых зазоров в приводе клапанов, фаз газораспределения, упругости пружин, величине зазора между направляющей втулкой и стержнем клапана, плотности прилегания клапанов к седлам) [8–10];

3) детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) (зазоры между поршнем и кольцом по высоте канавки, в замках поршневых колец, между цилиндром и поршнем) [11];

4) привод масляного и водяного насосов, а также распределительного вала (износ шестерен, неправильный монтаж полумуфт на узлах сочленения валов);

5) кривошипно-шатунного механизм (КШМ) (зазоры в подшипниках коленчатого вала и во втулке поршневой головки шатуна);

6) турбокомпрессор (дисбаланс ротора, вибрация рабочих лопаток турбины и компрессора, дефекты крепления компрессора) [12, 13];

7) топливная аппаратура (оценка технического состояния форсунок и топливного насоса) [14];

8) оценка рабочего процесса (контроль технического состояния) дизеля (индикаторная диаграмма, разрегулировка цилиндров в ходе рабочего процесса — изменение количества подаваемого топлива по сравнению с номинальными значениями, изменение угла опережения подачи топлива, ухудшение качества смесеобразования и т. д.) [6].

Методы вибродиагностики включают в себя следующие этапы:

- 1) выбор инструментов (средств) измерения;
- 2) подбор местоположения и ориентации для вибрационного контроля;
- 3) выбор метода крепления датчика вибрации к объекту, подлежащему контролю;
- 4) определение интервала и частоты измерений;
- 5) выбор метода математической обработки вибросигнала.

Основной фактор при выборе средств измерения — это метод измерения параметров. Выделяют несколько классификаций средств измерения (датчиков), в зависимости от параметра, положенного в основу:

а) по принципу работы (генераторные осуществляют прямое преобразование механической энергии в электрическую; параметрические имеют внешние источники питания, позволяют изменять сопротивление, частоту и другие электрические параметры за счет механического воздействия);

б) по способу получения информации (контактные — связанные механически с исследуемым объектом; бесконтактные — то есть когда отсутствует механическое соединение с объектом);

в) по способу получения первичной информации (рис. 1).

Каждое из упомянутых средств измерений (измерительные преобразователи, датчики) находит применение в определенной области.

Датчики бесконтактного измерения вибрации не требуют механической связи с объектом. Зондирование объекта звуковыми, электромагнитными и световыми волнами является основой для этих методов.

Среди новейших разработок выделяются датчики, использующие метод ультразвуковой фазометрии. Метод заключается в измерении разницы фаз между опорным ультразвуковым сигналом и сигналом, который отражается от объекта, который исследуется. В данном случае применяется пьезоэлектрическая керамика в качестве чувствительных элементов.

Оптические датчики, использующие видимый свет для исследования объектов, получили широкое распространение и обладают выдающейся разрешающей способностью. Оптические датчики могут быть основаны на регистрации эффекта Доплера с использованием лазеров или могут использовать голографию.

Радиоволновые датчики основаны на анализе взаимосвязей между контролируемой величиной и разнообразными параметрами электромагнитных систем, используемыми в роли первичных измерительных преобразователей.



Рис. 1. Средства измерения параметров вибрации

Ключевые характеристики средств бесконтактного измерения вибраций приведены в табл. 1.

В табл. 2 представлена оценочная карта сравнительной эффективности наиболее распространенных средств измерения вибрации с позиции ресурсоэффективности.

Термин «ресурсоэффективность» в общем смысле означает способность эффективно использовать доступные ресурсы (такие как время, энергия, материалы и др.) для достижения определенных целей или результатов. В контексте методов вибродиагностики ресурсоэффективность означает использование минимального количества ресурсов (времени, средств и т. д.) для диагностирования состояния машин и оборудования на основе анализа и исследования их вибрационных характеристик. Применение ресурсоэффективных методов вибродиагностики позволяет сократить время, затрачиваемое на диагностику, уменьшить нагрузку на оборудование и снизить эксплуатационные расходы.

ТАБЛИЦА 1. Ключевые характеристики методов бесконтактного анализа вибраций

Характеристики	Вибрация		
	оптический	радиоволновой	ультразвуковой
1	2	3	4
Величины волн в зондирующем сигнале.	400–760 нм	3–8 мм	1–15 мм
Область перемещений	от 1,0 пм до 1,0 м	от 1,0 мкм до 5,0 м	10,0–50,0 мкм
Диапазон измеряемых частот	0–20 МГц	0–250 кГц	0–3000 Гц
Разрешающая способность	<1,0 пм	<1,0 мкм	10,0–30,0 мкм
Дистанция до объекта	0,1–10 м	0,2–10 м	Не более 1,5–2 м
Негативные аспекты	Сложности и высокие издержки при оборудовании, а также строгие критерии по поводу поверхности объекта и условий окружающей среды	Проблемы с настройкой (для амплитудных методов)	Низкое разрешение, ограниченный динамический диапазон и отсутствие возможности измерения перемещений
Позитивные аспекты	Высокая точность и разрешающая способность, возможность точечных измерений	Эффективное измерение динамических характеристик в разнообразных условиях, включая случаи, когда прямая видимость недоступна, а также возможность проведения комплексных измерений вибрации на различных поверхностях и в различных средах	Экономичность и малогабаритность оборудования

Оценка конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (1)$$

где K — уровень конкурентной эффективности вида; V_i — значимость критерия (в процентах от общей важности); B_i — оценка i -го показателя в баллах.

По данным оценочной карты можно увидеть, что для повышения конкурентоспособности с минимальными издержками более эффективно использовать оптические датчики контроля вибрации для проведения вибродиагностики, то есть, например, лазерный виброметр.

В целом выбор средств вибродиагностики зависит от особенностей и требований конкретной задачи.

Определение правильных точек контроля, направлений измерения вибрации и соответствующего способа крепления датчика являются неотъемлемой составляющей вибрационного контроля.

ТАБЛИЦА 2. Рейтинговая оценка средств вибродиагностики по их эффективности

Факторы оценки	Значимость критерия	Баллы			Уровень конкурентной эффективности		
		Бп	Бо	Бв	Кп	Ко	Кв
Технические критерии оценки							
1. Легкость выполнения	0,1	3	5	1	0,3	0,5	0,1
2. Расходы, связанные с предоставлением услуги	0,2	1	5	3	0,2	1	0,6
3. Погрешность измерения	0,2	4	5	3	0,8	1	0,6
4. Широкий спектр применения метода	0,15	3	4	3	0,45	0,6	0,45
5. Безопасность метода	0,15	5	4	5	0,75	0,6	0,75
Экономические критерии оценки							
6. Стоимость	0,1	3	5	4	0,3	0,5	0,4
7. Конкурентная эффективность	0,1	5	5	2	0,5	0,5	0,2
Итого	1	24	33	21	3,3	4,7	3,1

Примечания. Б_п — измерение вибрации пьезоэлектрическим датчиком; Б_о — измерение вибрации оптическим датчиком; Б_в — измерение вибрации вихретоковым датчиком.

В основном датчики вибрации настроены на измерение в одном направлении, однако существуют и специальные датчики, предназначенные для многопараметрического измерения в трех направлениях. Степень удобства зависит от нюансов механизма, но обычно выбор делается в пользу датчиков вибрации с одним направлением. Следовательно, наибольшая чувствительность датчика достигается в его основном (базовом) направлении.

Определение наиболее подходящего метода математической обработки вибросигнала в соответствии с конкретной ситуацией представляет собой сложную и ключевую научно-практическую задачу. Предъявляемые требования к методам обработки вибросигнала: высокая чувствительность, повышенная селективность, необходимость гарантировать информативность измерений на всех этапах эксплуатации машины, постоянство результатов измерения, возможность анализа динамики развития повреждения и прогнозирование работоспособности узла двигателя.

Основные методы обработки вибросигнала приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Методы обработки вибросигнала

Трендовый анализ (анализ изменения значений интегральной вибрации)	Анализ вибрации во временной области	Анализ вибрации в частотной области	Многомерный анализ
Оценка по максимально допустимому уровню	Метод ударных импульсов	Прямое спектральное оценивание	Анализ среднего положения центра вала
		Спектр огибающей вибрации	
Анализ амплитудно-частотных характеристик	Экссес	Вейвлет-анализ	Анализ траектории перемещения центра вала
Анализ регрессионных вибромоделей	Пик-фактор	Октавный анализ	
	Анализ процессов затухания	Преобразование Фурье	

Аналитическое исследование основных существующих методов обработки вибросигнала в отношении дизельного двигателя тепловоза по ряду критериев оценки показывает, что многие не удовлетворяют предъявляемым требованиям [15].

Безусловно, по чувствительности и избирательности, глубине и достоверности контроля наиболее эффективен вейвлет-анализ.

Многомерный анализ не всегда применим, так как требует размещения датчиков непосредственно на валу, хотя дает и наибольшую полноту контроля.

Вейвлет-анализ (ВА) — это метод анализа сигналов, который использует вейвлеты — кратковременные волновые пакеты, способные быть масштабированными и сдвинутыми по временной оси. Этот метод обладает рядом преимуществ перед другими методами анализа, среди которых:

1) при оценке по максимально допустимому уровню вейвлет-анализ позволяет более точно определить пики и спады сигнала, что может быть полезно при оценке допустимого уровня сигнала;

2) по сравнению с анализом амплитудно-частотных характеристик вейвлет анализ способен исследовать частотные характеристики сигнала в различных временных масштабах, что позволяет получить более полное представление о его свойствах;

3) при анализе регрессионных вибромоделей, вейвлеты могут быть использованы, поскольку они способны представлять сигналы сложной формы с высокой точностью, хотя уступают нейронному исследованию, которое часто оказывается более мощным и гибким, позволяя представлять сложные модели вибрации с высокой точностью;

4) ВА предоставляет более точные результаты при анализе сигналов с ударными импульсами;

- 5) ВА лучше подходит для определения эксцесса, так как он обеспечивает более точное разделение между сигналами и шумами;
- 6) ВА может быть использован для измерения пик-фактора сигнала;
- 7) ВА дает возможность исследовать процессы затухания колебаний, что не всегда доступно при использовании других методов;
- 8) по отношению к спектральному оцениванию ВА предлагает более детальное представление спектра сигнала;
- 9) вейвлет-спектр огибающей позволяет исследовать вибрации, которые содержат несколько частот и могут изменяться во времени, то есть обрабатывать нестационарные сигналы, которые присутствуют в процессе эксплуатации, например, когда скорость вращения вала не является постоянной величиной;
- 10) по сравнению с октавным анализом ВА более эффективен для анализа сложных сигналов, таких как шум, который имеет широкий спектр частот;
- 11) сравнительный анализ преобразования Фурье и вейвлет-преобразования может быть выполнен на основе различных параметров, таких как разрешение в частотной области, способность обнаруживать временные изменения и способность различать разные типы дефектов.

Преобразование Фурье является одним из классических методов анализа, который преобразует сигнал из временной области в частотную область. Он основан на представлении сигнала в виде суммы синусоидальных компонентов с различными частотами. Преимуществом преобразования Фурье является его простота и широкое использование. Однако он имеет недостаток в том, что не обеспечивает информацию о временной локализации событий и может создавать артефакты при анализе сигналов с высоким уровнем шума.

Вейвлет-преобразование, с другой стороны, позволяет анализировать сигналы не только в частотной, но и во временной области. Оно основано на использовании вейвлет-функций, которые являются компактными во временной и частотной областях. Вейвлет-преобразование позволяет обнаруживать временные изменения в сигнале и имеет хорошую способность различать неодинаковые типы дефектов. Однако оно может быть более сложным в реализации и требовать вычислительных ресурсов для обработки сигналов.

Таким образом, по своей сути преобразование Фурье дает представление о том, какие частоты в спектре сигнала присутствуют, но не может ответить на вопрос, каково время существования спектральных составляющих сигнала. Для временной локализации спектральных компонентов необходимо сконструировать частотно-временное представление сигнала. Эту задачу в некоторой степени решает так называемое оконное преобразование Фурье, однако наиболее полно ее решает вейвлет-преобразование.

Оконное преобразование Фурье позволяет в целом выявить информацию, заключенную в изучаемом сигнале, как по времени, так и по частоте. Разрешающая

способность локализации особенностей сигнала имеет ограничения, которые заложены в самой логике алгоритма и определяются условием, аналогичным принципу неопределенности Гейзенберга в квантовой механике. Из требований, накладываемых на ширину окна, следует, что невозможно получить точное частотно-временное представление сигнала, т. е. нельзя определить для конкретного момента времени, какие спектральные компоненты присутствуют в сигнале. Чем короче окно, тем точнее разрешение по времени, но хуже разрешение по частоте и наоборот. Кроме того, чем короче окно, тем более справедливым становится заложенное в логику алгоритма предположение о стационарности сигнала в пределах окна.

При нестационарности сигнала более эффективен вейвлет-анализ, так как вейвлеты могут быть локализованы как во временной, так и в частотной области представления. При создании таких функций опять имеет значение принцип, аналогичный принципу неопределенности Гейзенберга, который связывает эффективные значения длительности функций и ширины их спектра. Чем точнее осуществлять локализацию временного положения функции, тем шире будет становиться ее спектр.

Особенностью вейвлет-анализа является то, что в нем можно использовать большое число основных вейвлет-функций, реализующих различные варианты соотношения между частотой и локализацией при анализе сигнала. Поэтому при исследовании имеется возможность выбора между семействами вейвлетных функций и гибкого применения тех, которые наиболее эффективно решают конкретную задачу.

Вейвлет-анализ является одним из наиболее универсальных и мощных инструментов для анализа сигналов и функций. Он имеет ряд преимуществ перед другими методами, которые делают его привлекательным для использования при вибродиагностике:

1. Локализация во времени и частоте: вейвлеты обеспечивают возможность локализовать события как во временной, так и в частотной областях. Это позволяет идентифицировать и анализировать вибрационные аномалии, проявляющиеся в определенные моменты времени и определенных частотах.

2. Высокая разрешающая способность: вейвлет-преобразование обладает лучшей разрешающей способностью по сравнению с классическими методами анализа сигналов, такими как преобразование Фурье.

3. Работа с нестационарными сигналами: вейвлет-преобразование эффективно работает с нестационарными сигналами, которые меняются во времени. Это особенно полезно в вибродиагностике, так как вибрационные сигналы обычно являются нестационарными из-за вариативности дефектов и рабочих условий оборудования.

4. Устойчивость к шуму: вейвлет-преобразование демонстрирует хорошую устойчивость к шумам в вибрационных сигналах. Вейвлеты могут фильтровать

нежелательные шумы или помехи, что позволяет более точно анализировать частотные составляющие вибрационного сигнала и выделять сигналы дефектов от фонового шума, что способствует повышению точности диагностики.

Использование вейвлет-анализа приведет к более точным и детальным результатам при вибродиагностике основных узлов дизельного двигателя тепловоза. Это поможет диагностировать даже слабые или скрытые неисправности, позволит выделять и анализировать временные изменения вибрации для предотвращения отказов и прогнозирования технического состояния оборудования.

Библиографический список

1. Грачев В. В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов: автореф. дис. ... докт. техн. наук. СПб.: ПГУПС, 2020. 32 с.
2. Ходжиев Ж. Д., Хамидов О. Р., Грачев В. В. Современные методы диагностики узлов локомотивов // Материалы I Международной научно-технической конференции «Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы». Ташкент, ТашИИТ, 2022. С. 189–194.
3. Федотов М. В., Клименко Ю. И., Грачев В. В. Интеллектуальное управление техническим состоянием локомотива // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте (ИММВ-2021). Сб. научных трудов X Международной научно-технической конференции. Смоленск, 2021. С. 356–368.
4. Федотов М. В., Грачев В. В. Предиктивная аналитика технического состояния систем тепловозов с использованием нейросетевых прогнозных моделей // Бюллетень результатов научных исследований. СПб.: ПГУПС. 2021. № 3. С. 102–114.
5. Грищенко А. В., Хамидов О. Р., Камалов И. С. и др. Диагностирование и обнаружение неисправностей подшипников качения тягового электродвигателя подвижного состава с применением искусственных нейронных сетей // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век. Материалы VII Международной научно-технической конференции. СПб.: ПГУПС, 2020. С. 220–225.
6. Зигельман Е. Б. Исследование возможности вибродиагностики среднеоборотных дизель-генераторов / Е. Б. Зигельман, И. А. Лощинин, Д. Ф. Скворцов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 6. С. 42–48.
7. Грачев В. В. О причинах низкочастотных колебаний рамы тепловоза на холостом ходу силовой установки / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский и др. // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию Белорусской железной дороги. В 2 ч. Гомель, 24–25 ноября 2022 года / Под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. Ч. 1. Гомель: Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2022. С. 101–102.

8. Грачев В. В., Федотов М. В., Грищенко А.В. и др. Диагностирование газоздушного тракта тепловозного дизеля с использованием интеллектуального классификатора // Бюллетень результатов научных исследований. СПб.: ПГУПС. 2022. № 2. С. 124–140.

9. Четвергов В. А. Использование виброакустического метода контроля для оценки качества функционирования газораспределительного механизма дизелей / В. А. Четвергов, А. И. Володин, В. Р. Ведрученко, Ю. Н. Хмельницкий // Диагностика повышения эффективности, экономичности и долговечности двигателей: тез. докл. науч.-техн. семинара стран СНГ. СПб., 1993. С. 45–49.

10. Грищенко А. В. Исследование параметров работы газораспределительного механизма при виброакустическом контроле в режиме тестового диагностирования / А. В. Грищенко, К. В. Глемба, А. С. Балясников // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3 (47). С. 65–73.

11. Панченко М. Н., Грачев В. В., Грищенко А. В. Определение технического состояния цилиндро-поршневой группы дизеля ПД1М по спектру мгновенной угловой скорости коленчатого вала // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век. Материалы VII Международной научно-технической конференции. СПб.: ПГУПС, 2020. С. 315–324.

12. Волков А. В. Виброакустическая диагностика турбокомпрессоров тепловозных дизелей: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону. 2005. 215 с.

13. Аксенов С. П. Исследование путей снижения виброперегрузок многороторных систем ГТД / С. П. Аксенов, С. Г. Валюхов, А. И. Зубко и др. // Насосы. Турбины. Системы. 2017. № 4. (25). С. 59–63.

14. Володин А. И. Диагностирование форсунок по параметрам вибрационных процессов / А. И. Володин, В. В. Попков, В. В. Вихирев // Тезисы научно-технической конференции кафедр Омского института инженеров железнодорожного транспорта / Омский институт инженеров железнодорожного транспорта. Омск: ОмИИТ, 1986. С. 39.

15. Федотов М. В., Шарапов А. Л., Грачев В. В. Способы повышения качества обучения нейросетевых диагностических моделей сложных технических объектов // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте ИММВ-2022. Сб. науч. трудов XI Международной научно-практической конференции. В 2 т. Коломна, 2022. С. 258–267.

Дата поступления: 19.12.2023

Решение о публикации: 02.02.2024

Контактная информация

БЕЛЯЕВ Андрей Александрович — аспирант; belyaevaa@list.ru

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

КРОТОВ Сергей Викторович — канд. техн. наук, доцент; svk-19587@yandex.ru

Problems of diagnostics of modern diesel engines

A. A. Beliaev¹, D. P. Kononov¹, S. V. Krotov²

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

² Rostov State Transport University, 2, Rostov Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia sq., Rostov-na-Donu, 344038, Russia

For citation: *Beliaev A. A., Kononov D. P., Krotov S. V. Problems of diagnostics of modern diesel engines // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 7-20. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-7-20*

Abstract

Objective: to consider the issue of diagnostics of modern diesel engines, in particular vibration diagnostics. Consider modern strategies and methods based on vibroacoustic signals that allow you to track and diagnose diesel engine malfunctions, as well as an assessment of the working process in the engine. To determine which means of measuring vibration parameters and methods of processing vibration signals can be considered the most reliable and informative. Propose to make adjustments to the currently used methods of processing vibration signals. **Methods:** comparison of the effectiveness of vibration measurement tools and mathematical methods of vibration signal processing. **Results:** the necessity of choosing mathematical methods of vibration signal processing is indicated, both for individual components of a diesel locomotive engine and for evaluating the workflow. Modern mathematical methods, applied to vibration diagnostics, require updating, due to an increase in computing power, as well as due to the development of powerful signal processing methods. To increase the reliability of the comparison results, it is necessary to take into account the large variability of the components and processes of the diesel engine. The need for additional study of modern mathematical methods of vibration signal processing is revealed. **Practical importance:** the necessity of introducing more modern methods of vibration signal processing is shown, which will optimize the durability of the components' design using long operating cycles, reduce maintenance costs, track the service life of the internal combustion engine during the operation of the locomotive, improve the monitoring and diagnostics systems of the locomotive engine. The presented methods of assessing the use of certain methods of vibration diagnostics for diesel locomotives can be recommended for practical use.

Keywords: diagnostics, diesel locomotive, diesel engine, vibration diagnostics, vibration acoustic control.

References

1. Grachev V. V. Nauchnye osnovy primeneniya metodov intellektual'nogo analiza dannyh dlja kontrolja tehničeskogo sostojanija lokomotivov: avtoref. dis. ... dokt. tehn. nauk. SPb.: PGUPS, 2020. 32 s. (In Russian)

2. Hodzhiev Zh. D., Hamidov O. R., Grachev V. V. Sovremennye metody diagnostiki uzlov lokomotivov // Materialy I Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii "Zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav: problemy, reshenija, perspektivy". Tashkent, TashIIT, 2022. S. 189–194. (In Russian)

3. Fedotov M. V., Klimenko Ju. I., Grachev V. V. Intellektual'noe upravlenie tehničeskim sostojaniem lokomotiva // Integrirovannye modeli i mjagkie vychislenija v iskusstvennom intellekte (IMMV-2021). Sb. nauchnyh trudov X Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii. Smolensk, 2021. S. 356–368. (In Russian)

4. Fedotov M. V., Grachev V. V. Prediktivnaja analitika tehničeskogo sostojanija sistem teplovozov s ispol'zovaniem nejrosetevyh prognoznyh modelej // Bjuleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. SPb.: PGUPS. 2021. № 3. S. 102–114. (In Russian)

5. Grishhenko A. V., Hamidov O. R., Kamalov I. S. i dr. Diagnostirovanie i obnaruzhenie neispravnostej podshipnikov kachenija tjagovogo jelektrodivigatelja podvizhnogo sostava s primeneniem iskusstvennyh nejronnyh setej // Lokomotivy. Jelektricheskij transport. XXI vek. Materialy VII Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii. SPb.: PGUPS, 2020. S. 220–225. (In Russian)

6. Zigel'man E. B. Issledovanie vozmozhnosti vibrodiagnostiki sredneoborotnyh dizel'-generatorov / E. B. Zigel'man, I. A. Loshhinin, D. F. Skvorcov // Izvestija vysshiz uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie. 2013. № 6. S. 42–48. (In Russian)

7. Grachev V. V. O prichinah nizkochastotnyh kolebanij ramy teplovoza na holostom ходу silovoj ustanovki / V. V. Grachev, A. V. Grishhenko, F. Ju. Bazilevskij i dr. // Problemy bezopasnosti na transporte : Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii, posvjashhennoj 160-letiju Belorusskoj zheleznoj dorogi. V 2 ch. Gomel', 24–25 nojabrja 2022 goda / Pod obshh. red. Ju. I. Kulazhenko. Ch. 1. Gomel': Uchrezhdenie obrazovanija "Belorusskij gosudarstvennyj universitet transporta", 2022. S. 101–102. (In Russian)

8. Grachev V. V., Fedotov M. V., Grishhenko A. V. i dr. Diagnostirovanie gazovozdushnogo trakta teplovoznogo dizelja s ispol'zovaniem intellektual'nogo klassifikatora // Bjuleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. SPb.: PGUPS. 2022. № 2. S. 124–140. (In Russian)

9. Chetvergov V. A. Ispol'zovanie vibroakustičeskogo metoda kontrolja dlja ocenki kachestva funkcionirovanija gazoraspredivitel'nogo mehanizma dizelej / V. A. Chetvergov, A. I. Volodin, V. R. Vedruchenko, Ju. N. Hmel'nickij // Diagnostika povyshenija jeffektivnosti, jekonomičnosti i dolgovechnosti dvigatelej: tez. dokl. nauch.-tehn. seminaru stran SNG. SPb., 1993. S. 45–49. (In Russian)

10. Gricenko A. V. Issledovanie parametrov raboty gazoraspredivitel'nogo mehanizma pri vibroakustičeskom kontrole v rezhime testovogo diagnostirovanija / A. V. Gricenko, K. V. Glemba, A. S. Baljasnikov // Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija. 2020. № 3 (47). S. 65–73. (In Russian)

11. Panchenko M. N., Grachev V. V., Grishhenko A. V. Opredivlenie tehničeskogo sostojanija cilindro-porshnevoj gruppy dizelja PD1M po spektru mgnovennoj uglovoj skorosti kolenchatogo vala // Lokomotivy. Jelektricheskij transport. XXI vek. Materialy VII Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii. SPb.: PGUPS, 2020. S. 315–324. (In Russian)

12. Volkov A. V. Vibroakustičeskaja diagnostika turbokompressorov teplovoznnyh dizelej: dis. ... kand. tehn. nauk. Rostov-na-Donu. 2005. 215 s. (In Russian)

13. Aksenov S. P. Issledovanie putej snizhenija vibroperegruzok mnogorotornyh sistem GTD / S. P. Aksenov, S. G. Valjuhov, A. I. Zubko i dr. // Nasosy. Turbiny. Sistemy. 2017. № 4. (25). S. 59–63. (In Russian)

14. Volodin A. I. Diagnostirovanie forsunok po parametram vibracionnyh processov / A. I. Volodin, V. V. Popkov, V. V. Vihirev // Tezisy nauchno-tehničeskoj konferencii kafedr Omskogo

instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta / Omskij institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta. Omsk: OmIIT, 1986. S. 39. (In Russian)

15. Fedotov M. V., Sharapov A. L., Grachev V. V. Sposoby povysheniya kachestva obucheniya nejrosetevykh diagnosticheskikh modelej slozhnykh tehnikeskikh obektov // Integrirovannye modeli i mjagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte IMMV-2022. Sb. nauch. trudov XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. V 2 t. Kolomna, 2022. S. 258–267. (In Russian)

Received: 19.12.2023

Accepted: 02.02.2024

Author's information:

Andrei A. BELIAEV — postgraduate student; belyaevaa@list.ru

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

Sergey V. KROTOV — PhD Sci. in Engineering, Associate Professor; svk-19587@yandex.ru

УДК 629.4.023:620.179.14

Анализ остаточной намагниченности наружных колец подшипников буксового узла колесной пары при их размагничивании на установке УМДП-01

А. Г. Отока¹, А. М. Лях², О. В. Холодилов³

¹ Гомельское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», 246014, Гомель, ул. Телегина, 1а

² Могилевское вагонное депо РУП «Могилевское отделение Белорусской железной дороги», 212016, Могилев, ул. Первомайская, 128а

³ УО «Белорусский государственный университет транспорта», 246653, Гомель, ул. Кирова, 34

Для цитирования: Отока А. Г., Лях А. М., Холодилов О. В. Анализ остаточной намагниченности наружных колец подшипников буксового узла колесной пары при размагничивании их на установке УМДП-01 // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 21–29. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-21-29

Аннотация

Цель: сравнение значений остаточной намагниченности наружного кольца подшипника при различной его ориентации по отношению к намагничивающему полю на примере установки УМДП-01. Показать на практике неэффективность использования технологии размагничивания наружных колец подшипников буксовых узлов при расположении их в горизонтальной плоскости. **Методы:** сравнение полученных значений остаточной намагниченности методом прямых измерений при размагничивании наружных колец в горизонтальной и вертикальной плоскости по отношению к магнитному полю. На практике соблюдались одинаковые условия по намагничиванию и размагничиванию одного и того же наружного кольца путем пропускания импульсного тока по соленоиду и контактному стержню в режиме намагничивания и плавного снижения переменного тока в соленоиде для режима размагничивания. **Результаты:** эксперимент показал, что значения остаточной намагниченности наружного кольца при полном цикле размагничивания его в горизонтальной плоскости на установке УМДП-01 выше, чем при размагничивании его в вертикальной плоскости. Вертикальное размещение кольца по центру соленоида позволило размагнитить его с первого раза в положении А при неполном цикле размагничивания. **Практическая значимость:** показано, что технология размагничивания колец подшипников в горизонтальной плоскости так, как требует руководство по эксплуатации 9402.00.000 РЭ, зачастую приводит к нарушению требований нормативных документов в части допустимых значений остаточной намагниченности. Размагничивание наружных колец в вертикальной плоскости приведет к полному удовлетворению требований нормативных документов, увеличению производительности магнитопорошкового контроля в целом за счет сокращения цикла размагничивания и упрощения технологических переходов, связанных со сложностью установки объекта контроля в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: колесная пара, буксовый узел, наружное кольцо подшипника, размагничивание, остаточная намагниченность, магнитная установка УМДП-01, соленоид, переменный ток, импульсный ток.

Введение

На сегодняшний день кольца подшипников буксового узла на наличие поверхностных и подповерхностных дефектов проверяют магнитопорошковым или автоматизированным вихретоковым методом.

На предприятиях вагонного и локомотивного хозяйств чаще используют магнитопорошковый метод, что связано в первую очередь с его высокой чувствительностью, простотой, наглядностью и низкой стоимостью оборудования. Для намагничивания колец используются такие установки, как УМДП-01, ТПС9706 и другие типы УДПП, РЭ2667, изготовленные собственными силами предприятий [1].

Особые требования предъявляются к операции размагничивания колец подшипников, так как кольца, изготовленные из ферромагнитных материалов, в процессе обработки подвергаются воздействию внешних магнитных полей и намагничиваются. Остаточная намагниченность колец способствует попаданию внутрь подшипников металлических частиц, что приводит к увеличению коэффициента трения деталей подшипников, повышенному износу и уменьшению ресурса. Для уменьшения остаточной намагниченности деталей их необходимо размагничивать. Вследствие высокой эффективности на практике широкое применение получил способ размагничивания деталей воздействием на них переменным магнитным полем с уменьшающейся до нуля амплитудой [2]. Размагничивание колец подшипников таким способом может происходить разными путями:

- плавным уменьшением амплитуды магнитного поля при неподвижности объекта контроля и намагничивающего устройства;
- уменьшением амплитуды магнитного поля в результате перемещения намагничивающего устройства (соленоида) от объекта контроля на определенное расстояние;
- уменьшением амплитуды магнитного поля в результате перемещения объекта контроля через неподвижное намагничивающее устройство (соленоид) или стационарный демагнитизатор.

При таких способах на размагничиваемое кольцо подшипника воздействует переменное магнитное поле, которое, замыкаясь через объект контроля, разориентирует области спонтанной намагниченности (домены) материала, что приводит к его размагничиванию.

На качество размагничивания влияют различные факторы, такие как параметры намагничивания (вид намагничивающего поля или тока, частота и длительность импульса, ориентация намагничивающего поля), характеристики металла (состав стали, твердость, коэрцитивная сила, магнитная вязкость) и др. [3].

На практике подмечено, что остаточная намагниченность наружных колец зачастую превышает допустимый порог 3 А/см, регламентированный требованиями нормативного документа [4]. При этом следует отметить, что производитель установки УМДП-01 устанавливает требования на размагничивание внутреннего кольца подшипника в вертикальном положении, как и при намагничивании, а наружного — в горизонтальном.

В соответствии с требованиями [5, 6] размагничивание колец в свободном состоянии производится согласно руководству по эксплуатации (РЭ) используе-

мого оборудования. Так, на основании РЭ [7] размагничивание наружного кольца проводится в четырех точках при вращении кольца по горизонтали на 90° .

Результаты исследований и их обсуждение

Сравним на практике результаты размагничивания наружного кольца подшипника в двух плоскостях: в горизонтальной (рис. 1, а) на основании РЭ и в вертикальной, как и при намагничивании (рис. 1, б).

Намагничивание осуществлялось импульсами тока путем разряда предварительно заряженной конденсаторной батареи через намагничивающие устройства установки при вертикальном расположении кольца (полюсный способ намагничивания за счет продольного магнитного поля соленоида и при циркулярном способе полем, возникающим при прохождении импульса тока через контактный стержень). Количество циклов намагничивания задавалось переключателем SA4 и равнялось трем. В соответствии с РЭ амплитудное значение импульса тока намагничивания в соленоиде без детали составляло не менее 3 кА (продольное намагничивание) и не менее 4 кА — для циркулярного. Размагничивание кольца осуществлялось в том же соленоиде в режиме плавного уменьшения тока в намагничивающих обмотках соленоида до 0 А.

Остаточная намагниченность при намагничивании и размагничивании на установке УМДП-01 определялась на наружной поверхности кольца в положениях А, Б, В, Г измерителем магнитного поля ИМП-6 путем измерения нормальной составляющей напряженности магнитного поля H_n три раза в каждом положении (поз. 1 — левый край, поз. 2 — центр кольца; поз. 3 — правый край).

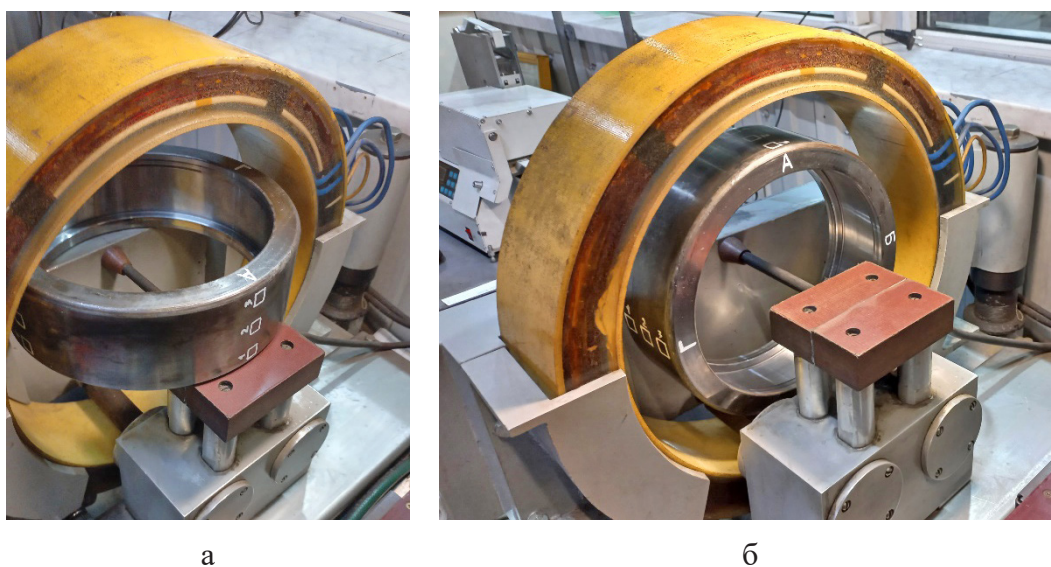


Рис. 1. Положение наружного кольца по отношению к намагничивающему полю
а – в горизонтальном положении в соответствии с РЭ; б – в вертикальном положении

Остаточная намагниченность определялась в режиме прямого измерения для горизонтального расположения наружного кольца при размагничивании после намагничивания № 3 (измерение № 3), в то время как для вертикального расположения после намагничивания № 2 (измерение № 2).

В целях сопоставления разброса показаний при намагничивании наружного кольца измерения проводились четыре раза. Намагничивание кольца осуществлялось в положении А. Размагничивание кольца проводилось, начиная с положения А и заканчивая положением Г (кольцо вращалось четыре раза против часовой стрелки на 90°). Результаты измерения остаточной намагниченности приведены в табл. 1.

С помощью прибора ИМП-6 фиксировали значения нормальной составляющей магнитного поля с указанием полярности (знак « \leftarrow » или его отсутствие) [8].

Эксперимент показал, что после цикла размагничивания (поворот четыре раза на 90°) кольцо было размагничено как при горизонтальном расположении, так и при вертикальном.

Однако показания при размагничивании кольца подшипника в горизонтальной плоскости, как требует РЭ на установку УМДП-01, выше, чем при размагничивании в вертикальной.

В соответствии с полученными результатами наружное кольцо было размагничено при вертикальной ориентации с первого раза в положении А. В то время как при горизонтальном расположении кольца значения остаточной намагниченности при размагничивании на установке не превысили 3 А/см только после поворота кольца на 180° в положении В.

На рис. 2 показано, как проводилось прямое измерение остаточной намагниченности H_n на поверхности кольца после размагничивания (а) и намагничивания (б).

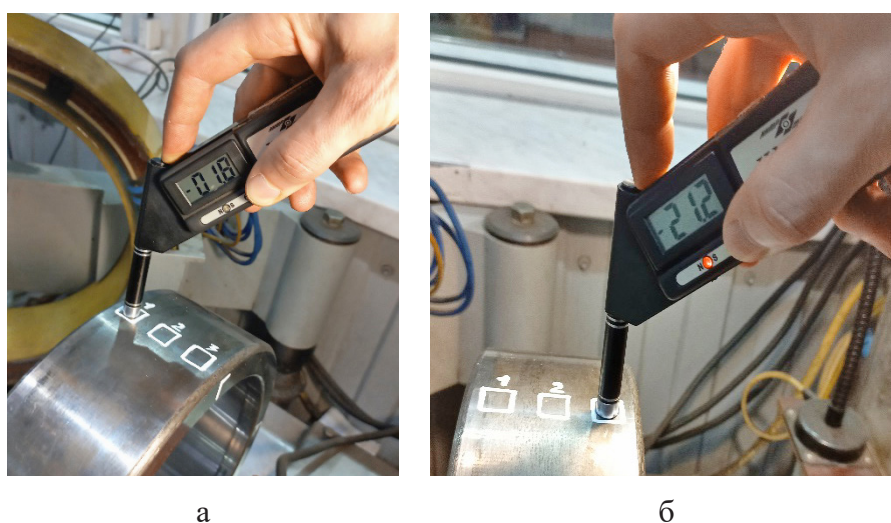


Рис. 2. Измерение остаточной намагниченности H_n на наружном кольце

а – результат размагничивания в вертикальной плоскости, положение Г, поз. № 1 (№ 4Г);

б – результат намагничивания в горизонтальной плоскости, измерение 1, положение Г, поз. № 3 (№ 4Г)

В ходе эксперимента было установлено, что в результате намагничивания (пропускание импульсов тока по соленоиду и контактному стержню одновременно) остаточное магнитное поле на наружной поверхности кольца распределяется неравномерно.

ТАБЛИЦА 1. Результаты измерений остаточной намагниченности наружного кольца при намагничивании и размагничивании на установке УМДП-01

Точки измерения напряженности магнитного поля после намагничивания кольца импульсным током, А/см				Точки измерения напряженности магнитного поля после размагничивания кольца переменным током в соответствии с РЭ в горизонтальном положении (измерение 3), А/см				Точки измерения напряженности магнитного поля после размагничивания кольца переменным током в вертикальном положении (измерение 2), А/см															
Измерение 1				Положение А				Положение А															
№1А	№2Б	№3В	№4Г	№1А	№2Б	№3В	№4Г	№1А	№2Б	№3В	№4Г												
1	23,7	1	25,4	1	-4,2	1	1,5	1	9,4	1	0,4	1	1,8	1	-1,3	1	-0,5	1	1,6	1	-3,0	1	-3,0
2	9,0	2	10,1	2	-11,1	2	-8,5	2	1,6	2	0,2	2	-1,4	2	-1,2	2	0,6	2	1,8	2	-2,1	2	-2,0
3	-3,2	3	4,1	3	-23,6	3	-21,2	3	-5,0	3	0,4	3	-6,9	3	-1,4	3	1,9	3	3,0	3	-1,9	3	-1,8
Измерение 2				Положение Б (поворот на 90°)				Положение Б (поворот на 90°)															
№1А	№2Б	№3В	№4Г	№1А	№2Б	№3В	№4Г	№1А	№2Б	№3В	№4Г												
1	21,4	1	26,5	1	-2,4	1	3,5	1	-0,0	1	2,3	1	-1,0	1	-3,2	1	-0,8	1	-1,0	1	-1,8	1	-1,4
2	7,0	2	10,7	2	-10,5	2	-8,3	2	-0,1	2	1,9	2	-0,7	2	-2,4	2	0,1	2	-0,3	2	-0,8	2	-0,8
3	-4,2	3	3,7	3	-23,1	3	-22,2	3	0,0	3	3,1	3	-0,7	3	-2,4	3	1,1	3	0,5	3	-0,0	3	-0,4
Измерение 3				Положение В (поворот на 180°)				Положение В (поворот на 180°)															
№1А	№2Б	№3В	№4Г	№1А	№2Б	№3В	№4Г	№1А	№2Б	№3В	№4Г												
1	20,7	1	25,3	1	-1,4	1	4,8	1	-2,8	1	-0,0	1	1,9	1	-0,9	1	-0,7	1	-0,7	1	-1,9	1	-1,7
2	6,6	2	10,3	2	-9,9	2	-7,2	2	-2,3	2	-0,0	2	1,6	2	-0,6	2	0,0	2	-0,1	2	-0,9	2	-1,0
3	-4,5	3	2,1	3	-22,2	3	-20,6	3	-2,9	3	0,2	3	2,0	3	-0,6	3	0,9	3	0,7	3	-0,1	3	-0,5
Измерение 4				Положение Г (поворот на 270°)				Положение Г (поворот на 270°)															
№1А	№2Б	№3В	№4Г	№1А	№2Б	№3В	№4Г	№1А	№2Б	№3В	№4Г												
1	22,4	1	25,2	1	-3,6	1	2,6	1	-1,1	1	-2,8	1	-0,1	1	1,6	1	-1,2	1	-0,5	1	-1,5	1	-1,8
2	8,8	2	10,8	2	-10,2	2	-8,0	2	-0,9	2	-2,1	2	-0,0	2	1,5	2	-0,3	2	-0,0	2	-0,6	2	-1,1
3	-3,8	3	5,1	3	-22,8	3	-21,2	3	-0,9	3	-2,6	3	0,1	3	1,9	3	0,6	3	0,7	3	0,1	3	-0,5
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="margin-bottom: 5px;"> Минимальное значение остаточной намагниченности H_n на наружной поверхности кольца после намагничивания</div> <div style="margin-bottom: 5px;"> Значения остаточной намагниченности H_n по центру наружной поверхности кольца после намагничивания</div> <div style="margin-bottom: 5px;"> Максимальное значение остаточной намагниченности H_n на наружной поверхности кольца после намагничивания</div> <div style="margin-bottom: 5px;"> Допустимое значение остаточной намагниченности H_n на наружной поверхности кольца после размагничивания</div> <div style="margin-bottom: 5px;"> Недопустимое значение остаточной намагниченности H_n на наружной поверхности кольца после размагничивания</div> </div>																							

Если в положении А и Б остаточная намагниченность достигает максимальных значений по левому краю кольца поз. 1 и минимальных (в ряде случаев недостаточных для выявления дефектов) по правому краю поз. 3, то в положении В и Г наоборот. Таким образом, на одной половине кольца (на наружной поверхности) дефекты будут выявляться более уверенно с левой стороны, а на второй половине — с правой стороны. По центру кольца остаточное магнитное поле распределяется равномерно и остаточная намагниченность после намагничивания достигает в среднем ≈ 9 А/см. Это объясняется тем, что на практике, как правило, остаточная намагниченность наблюдается вблизи углов и выступов деталей.

Однако в наших исследованиях не ставился вопрос о корректности работы установки УМДП-01. Целью было оценить значения остаточной намагниченности кольца при его различной ориентации по отношению к намагничивающему полю.

Если сравнить максимальные значения остаточной намагниченности в положениях А, Б, В, Г, то можно сделать вывод о нецелесообразности размагничивания наружного кольца в горизонтальной плоскости (рис. 3). В положении А и Б значения остаточной намагниченности > 3 А/см (в положении А выше в 3 раза, в положении Б превышает на 0,2 А/см), в положении В и Г не превышают установленную норму. Однако данные значения близки к допустимой границе и отличаются на ≈ 1 А/см в отличие от показаний в положении В и Г при размагничивании кольца при вертикальном расположении.



Рис. 3. Максимальные значения остаточной намагниченности H_n при различной ориентации наружного кольца в режиме размагничивания

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что необязательно придерживаться технологии размагничивания наружных колец в соответствии с руководством [7] на установку УМДП-01, поскольку достаточно размагнитить кольцо при вертикальной ориентации в положениях А и Б (один поворот кольца через роликовые опоры на 90^0). При этом имеет место необходимое размагничивание наружного кольца в вертикальной плоскости, обеспечивающее требуемый уровень остаточной намагниченности. К тому же устанавливать наружное кольцо массой 7,5 кг в горизонтальной плоскости на кронштейн внутри соленоида и поворачивать четыре раза на 90^0 затруднительно при больших объемах ремонта подшипников.

Следствием изменения технологии размагничивания является увеличение производительности магнитопорошкового контроля наружных колец подшипников.

Библиографический список

1. Отока А. Г., Лях А. М. Обнаружение дефектов колец подшипников магнитопорошковым методом способом остаточной намагниченности // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25, № 7. С. 56–61. DOI: 10.14489/td.2022.07.pp.056-061.
2. Гульков Г. И., Мигдаленок А. А., Шайби Р. Преобразователь частоты демагнетизатора // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009. № 3. С. 21–27.
3. Шарин П. А., Чуприн А. В., Чуприн В. А. и др. Применение импульсного тока для размагничивания деталей из магнитотвердых материалов / Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. статей 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: БРУ, 2017. С. 194–199.
4. ПР НК В.2–2013. Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар при ремонте. Специальные требования (утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества, протокол от 19–20 ноября 2013 г. № 59). М.: АО «Кодекс». 2013. 88 с.
5. ТИ НК В.21-2.2019. Технологическая инструкция по неразрушающему контролю деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Магнитопорошковый метод (утверждена президентом НП «ОПЖТ»). 2019. 51 с.
6. ИШДЖ.25202.00017. Технологическая инструкция. Неразрушающий контроль деталей и составных частей колесных пар грузовых вагонов при ремонте. Магнитопорошковый метод (утверждена приказом гл. инженера Белорусской железной дороги от 03.04.2019 № 343НЗ). 2019. 74 с.
7. РЭ 9402.00.000. Руководство по эксплуатации. Установка для магнитной дефектоскопии свободных колец подшипников (УМДП-01). 2003. 43 с.

8. РЭ 422289-002-20872624-2003. Руководство по эксплуатации. Измеритель магнитного поля ИМП-6. 2014. 14 с.

Дата поступления: 08.11.2023

Решение о публикации: 23.02.2024

Контактная информация

ОТОНА Александр Генрикович — аспирант, otokaaleksandr@gmail.com

ЛЯХ Алексей Михайлович — инженер лаборатории, pharmacist009@mail.ru

ХОЛОДИЛОВ Олег Викторович — доктор техн. наук, профессор, olhol@tut.by

Analysis of the residual magnetization of the outer rings of the bearings of the axle box assembly of the wheelset when demagnetizing them on the UMDP-01 installation

A. G. Otoka¹, A. M. Lyakh², O. V. Kholodilov³

¹ Gomel car depot RUE “Gomel branch of the Belarusian Railway”, 1a, Telegina st., Gomel, 246014, Belarus

² Mogilev carriage depot RUE “Mogilev branch of the Belarusian Railway”, 128a, Pervomayskaya st., Mogilev, 212016, Belarus

³ Educational institution “Belarusian State University of Transport”, 34, Kirova st., Gomel, 246653, Belarus

For citation: Otoka A. G., Lyakh A. M., Kholodilov O. V. Analysis of the residual magnetization of the outer rings of the bearings of the axle box assembly of the wheelset during their demagnetization on the UMDP-01 Installation // Bulletin of the results of scientific research. — 2024. — Iss. 1. — P. 21–29. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-21-29

Abstract

Objective: to compare the readings of the residual magnetization of the outer ring of the bearing with its different orientation with respect to the magnetizing field on the example of the UMDP-01 installation. To show in practice the inefficiency of using the technology of demagnetization of the outer rings of the bearings of axle boxes when they are located in a horizontal plane. **Methods:** comparison of the obtained values of the residual magnetization by direct measurements during demagnetization of the outer rings in the horizontal and vertical planes with respect to the magnetic field. In practice, the same conditions for magnetization and demagnetization of the same outer ring were observed by passing a pulsed current through the solenoid and the contact rod in the magnetization mode and gradually reducing the alternating current in the solenoid for the demagnetization mode. **Results:** the experiment showed that the values of the residual magnetization of the outer ring during the full cycle of its demagnetization in the horizontal plane on the UMDP-01 installation are higher than when it is demagnetized in the vertical plane. The vertical placement of the ring in the center of the solenoid allowed it to be demagnetized from the first time in position A with an incomplete demagnetization cycle. **Practical significance:** the article shows that the technology of demagnetization of bearing rings in the horizontal plane, as required by the operating manual 9402.00.000 RE, often leads to a violation of the requirements of regulatory documents in terms of permissible values of residual magnetization. Demagnetization of the outer rings in the vertical plane will lead to full satisfaction of the requirements of regulatory documents, increase the productivity of magnetic powder control in general by reducing the demagnetization cycle and simplifying technological transitions associated with the complexity of installing the object of control in the horizontal plane.

Keywords: Demagnetization, residual magnetization, bearing outer ring, axle box, wheelset, magnetic installation UMDP-01, solenoid, alternating current, pulse current.

References

1. Otoka A. G., Ljah A. M. Obnaruzhenie defektov kolec podshipnikov magnitoporoshkovym metodom sposobom ostatochnoj namagnichennosti // Kontrol'. Diagnostika. 2022. Vol. 25, no. 7. P. 56–61. DOI: 10.14489/td.2022.07.pp.056-061 (In Russian)
2. Gul'kov G. I., Migdalenok A. A., Shaibi R. Preobrazovatel' chastoty demagnitizatora // Jenergetika. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij i jenergeticheskikh ob'edinenij SNG. 2009. No. 3. P. 21–27. (In Russian)
3. Sharin P. A., Chuprin A. V., Chuprin V. A. i dr. Primenenie impul'snogo toka dlja razmagnichivaniya detalej iz magnitotverdyh materialov / Sovremennye metody i pribory kontrolja kachestva i diagnostiki sostojanija ob'ektov: sb. statej 6-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Mogilev: BRU, 2017. P. 194–199. (In Russian)
4. PR NK V.2-2013. Pravila nerazrushajushhego kontrolja detalej i sostavnyh chastej kolesnyh par pri remonte. Special'nye trebovanija (utverzhdeny Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva, protokol ot 19–20 nojabrja 2013 g. No. 59). M.: AO "Kodeks". 2013. 88 p. (In Russian)
5. TI NK V.21-2.2019. Tehnologicheskaja instrukcija po nerazrushajushhemu kontrolju detalej i sostavnyh chastej kolesnyh par vagonov pri remonte. Magnitoporoshkovyj metod (utverzhdena prezidentom NP "OPZhT"). 2019. 51 p. (In Russian)
6. IshDZh.25202.00017. Tehnologicheskaja instrukcija. Nerazrushajushhij kontrol' detalej i sostavnyh chastej kolesnyh par gruzovyh vagonov pri remonte. Magnitoporoshkovyj metod (utverzhdena prikazom gl. inzhenera Belorusskoj zheleznoj dorogi ot 03.04.2019 No. 343NZ). 2019. 74 p. (In Russian)
7. RJe 9402.00.000. Rukovodstvo po jekspluatacii. Ustanovka dlja magnitnoj defektoskopii svobodnyh kolec podshipnikov (UMDP-01). 2003. 43 p. (In Russian)
8. RJe 422289-002-20872624-2003. Rukovodstvo po jekspluatacii. Izmeritel' magnitnogo polja IMP-6. 2014. 14 p. (In Russian)

Received: 08.11.2023

Accepted: 23.02.2024

Author's information

Alexander G. OTOKA — Postgraduate (Graduate) Student, otokaaleksandr@gmail.com

Alexey M. LYAKH — Laboratory engineer, pharmacist009@mail.ru

Oleg V. KHOLODILOV — Doctor of Technical Sciences, Professor, olhol@tut.by

УДК 629.4

Имитационная модель поезда для учета влияния ветровых нагрузок

И. А. Гребнев, О. Е. Пудовиков

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

Для цитирования: Гребнев И. А., Пудовиков О. Е. Имитационная модель поезда для учета влияния ветровых нагрузок // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 30–40. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-30-40

Аннотация

Цель: данная статья посвящена актуальным вопросам учета и нормирования топливных ресурсов на тягу поездов при наличии переменных факторов, влияющих на расход. Рассматривался метеозависимый участок Приволжской железной дороги Палласовка — Верхний Баскунчак с целью доказать опытным путем при помощи имитационного моделирования наличие влияния переменных факторов на расход топлива, которые зачастую бывают нормообразующими. Предложить методику их практического учета в локомотивных депо. **Методы:** в статье предложена имитационная модель поезда для учета влияния ветровых нагрузок. С этой целью тяговый электропривод тепловоза с передачей постоянно-переменного тока был представлен как задатчик скорости, который поддерживает движение поезда с постоянной скоростью, равной средней технической. Для определения расхода топлива с целью определения достоверности полученных результатов и возможности сравнения с опытными статистическими величинами были использованы электромеханические характеристики тягового электродвигателя ЭД133, генератора ГС501 и эксплуатационные характеристики дизеля Д49. **Результаты:** в результате моделирования работы энергетической установки тепловоза получены значения абсолютного и удельного расхода топлива. Полученные результаты обладают высокой степенью достоверности, о чем свидетельствуют полученные ранее статистические данные. **Практическая значимость:** полученные результаты еще раз продемонстрировали влияние ветра на тягу поездов, причем на ветрозависимых участках железных дорог они являются нормообразующими. Рассмотренная модель может быть применена для целей нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов при наличии переменных факторов, влияющих на расход.

Ключевые слова: имитационная модель поезда, ветровые нагрузки, тяга поездов, тяговая электрическая передача тепловоза, энергоэффективность.

Введение

Повседневный опыт эксплуатации локомотивных ресурсов дает многочисленные примеры существенного влияния ветра на движение поездов. Известно, что на многих дорогах, таких как Северо-Кавказская, Приволжская, Западно-Сибирская, сильные ветры вызывают задержки поездов и повышенный расход энергии [1–3].

В данной статье будет предложена имитационная модель поезда для учета расхода топлива тепловозом при наличии ветровых нагрузок применитель-

но к участку Верхний Баскунчак — Палласовка Приволжской железной дороги. Данный участок характеризуется равнинным профилем, движение поездов на нем осуществляется примерно с постоянной скоростью [4]. Расход топлива при этом будет определен в результате выполнения тягового расчета с использованием моделей поезда и элементов, его составляющих, которые будут рассмотрены далее [5].

Обзор и построение модели поезда

В работе использована многомассовая модель поезда, в которой каждая единица подвижного состава (вагоны или локомотив) представлены как сосредоточенные массы, объединенные в единую систему через межвагонные связи. Применение данной модели (рис. 1) позволило задать индивидуальные параметры и характеристики для каждого экипажа.

Движение каждого экипажа описывается следующей системой:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_i}{dt} = \frac{\sum F_i}{(1 + \gamma_i)m_i}, \\ \frac{dS_i}{dt} = v_i \end{array} \right., \quad (1)$$

где v_i — скорость i -го экипажа; m_i — масса i -го экипажа; γ_i — коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся частей i -го экипажа; $\sum F_i$ — суммарная внешняя сила, действующая на i -й экипаж.

В свою очередь, суммарная внешняя сила, действующая на i -й экипаж, вычисляется по формуле :

$$F_i = F_{\kappa i} - B_i \pm W_i, \quad (2)$$

где $F_{\kappa i}$ — сила тяги, реализуемая i -м экипажем; B_i — сила торможения i -го экипажа; W_i — сила сопротивления движению, действующая на i -й экипаж.

Основное сопротивление движению локомотива $w_{\text{л0}}$ вычисляется следующим образом [6]:

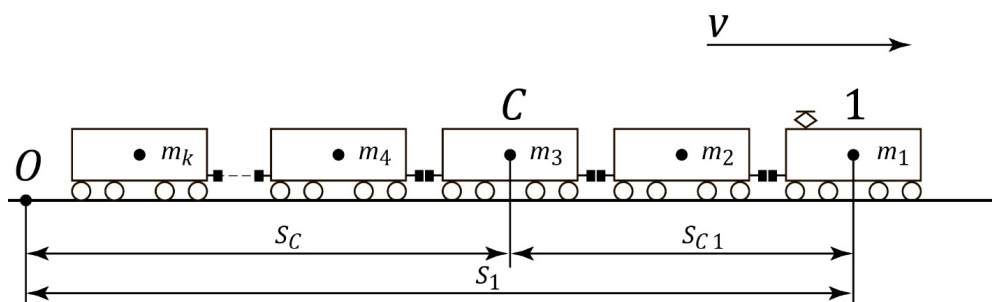


Рис. 1. Модель поезда для исследования

$$w_{л0} = (a_0 + b_0 v + c_0 v^2) \cdot m_0, \quad (3),$$

где a_0, b_0, c_0 — коэффициенты, которые зависят от серии локомотива, типа пути и режима ведения поезда — тяга (электрическое торможение) или выбег.

Величину силы основного сопротивления движению вагона w_0 можно вычислить по следующей формуле:

$$w_{0i} = \left(a_{li} + \frac{b_{li} + c_{li} \cdot v_i + d_{li} \cdot v_i^2}{q_{0i}} \right) \cdot m_i, \quad (4)$$

где $a_{li}, b_{li}, c_{li}, d_{li}$ — коэффициенты, зависящие от типа буксового узла вагона, его загрузки, характеристик пути для i -го экипажа, и принимаются в соответствии с начальными условиями; q_{0i} — осевая нагрузка i -го экипажа.

Известно, что составляющие формул (3) и (4) при v^2 соответствуют аэродинамической составляющей сопротивления движению. При моделировании движения поезда при отсутствии ветровой нагрузки для вычисления сил сопротивления движению экипажей были использованы формулы (3) и (4). При наличии ветровой нагрузки данные формулы были приведены к виду:

$$W_{л0} = (a_0 + b_0 v) \cdot m_0 + W_{вл}, \quad (3')$$

$$W_{0i} = \left(a_{li} + \frac{b_{li} + c_{li} \cdot v_i}{q_{0i}} \right) \cdot m_i + W_{vi}, \quad (4'),$$

$W_{вл}, W_v$ — сопротивление воздушной среды для локомотива и i -го вагона. Данные составляющие определены в результате выполнения аэродинамического расчета в программном пакете Solidworks Flow Simulation [7] для различных скоростей движения поезда, ветра и угла между направлением воздушного ветрового потока и скорости движения поезда [8].

В работе исследован участок, характеризующийся равнинным профилем и примерно постоянной скоростью движения. В этом случае для определения силы тяги, необходимой для движения поезда с заданной постоянной скоростью при действии переменных возмущающих сил, удобно использовать результат работы автоматического регулятора скорости движения поезда [9], работающего в режиме стабилизации скорости (рис. 2).

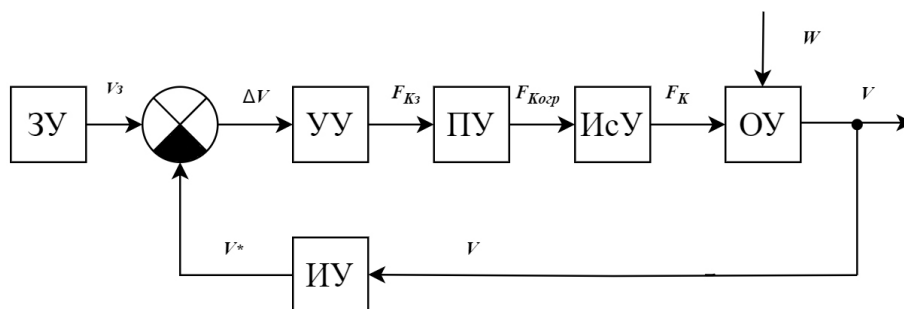


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема САУ регулятора скорости

При этом сделаем допущение, что сила тяги, реализуемая локомотивом, может принимать любое значение, ограниченное тяговыми характеристиками, соответствующими наибольшей мощности ДГУ на 15-й позиции контроллера (рис. 3).

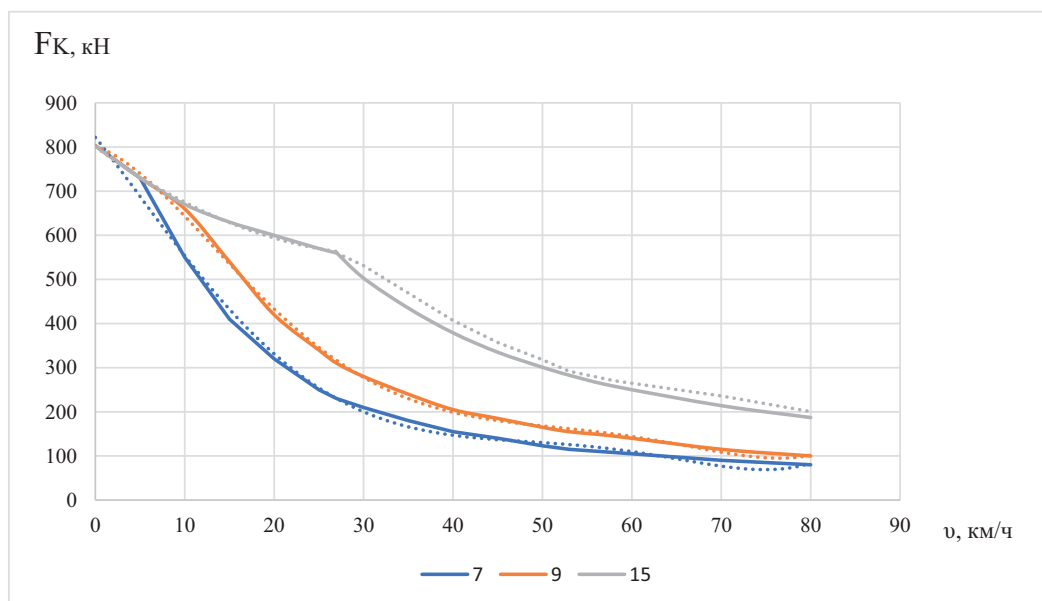


Рис. 3. Тяговые характеристики и аппроксимация их степенным полиномом на 7-й, 9-й, 15-й позициях контроллера

Определение потребной механической мощности дизеля было выполнено путем обратного моделирования энергетической цепи тепловоза с передачей переменного-постоянного тока, функциональная схема которой приведена на рис. 4, 5.

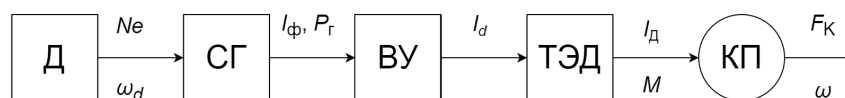


Рис. 4. Схема электрической передачи постоянно-переменного тока тепловоза

На рис. 4 использованы следующие обозначения: Д — дизель, СГ — синхронный генератор, ВУ — выпрямительная установка, ТЭД — тяговые электродвигатели, КП — колесные пары. Крутящий момент ω_d и эффективная мощность дизеля N_e передаются на синхронный генератор, который преобразует механическую энергию дизеля в электрическую I_ϕ, P_g и питает выпрямительную установку. Выпрямительная установка преобразует переменный ток генератора в постоянный I_d для питания тяговых электродвигателей. Тяговые электродвигатели преобразуют электрическую энергию I_d в механическую (крутящий момент M на валу якоря) и передают ее на колесные пары, которые реализуют касательную силу тяги F_k .

Определение расхода топлива на основе имитационной модели

На рис. 5 схематично изображен алгоритм нахождения расхода топлива тепловозом через мощность дизеля. Для определения мощности генератора и, соответственно, эффективной мощности дизеля необходимо смоделировать обратную цепочку. Пользуясь электротяговыми характеристиками ТЭД ЭД133 (рис. 6), можно найти силу тяги F_K и ток тяговых двигателей I_D и, соответственно, их мощность P_K , учитывая КПД тяговой передачи. Зная мощность ТЭД $P_{ТЭД}$, его ток, КПД η_D , можно определить ток $I_{ВУ}$ и мощность $P_{ВУ}$, выпрямительной установки, а затем, зная ток фазы I_ϕ синхронного генератора, — механическую мощность генератора с учетом КПД, которая будет равна эффективной мощности дизеля.

По полученной зависимости $F_K(v)$ (рис. 3) для каждого момента времени определялась касательная мощность тепловоза как:

$$P_K = F_K v. \quad (5)$$

Механическая мощность на валу тягового генератора определяется как отношение касательной мощности к КПД передачи тепловоза с учетом затрат энергии на собственные нужды тепловоза:

$$N_\Gamma = \frac{P_K}{\eta_{КМБ} \cdot \eta_{ТЭД} \cdot \eta_{ТГ} \cdot \eta_{ВУ}} + P_{СН}, \quad (6)$$

где $\eta_{КМБ}$ — КПД колесно-моторного блока тепловоза, при расчетах принят равным 0,98; $\eta_{ВУ}$ — КПД выпрямительной установки тепловоза, при расчетах принято 0,98; $\eta_{ТЭД}$ — КПД тягового электродвигателя, величина которого определяется из электромеханических характеристик двигателя; $\eta_{ТГ}$ — КПД тягового синхронного генератора (рис. 7).

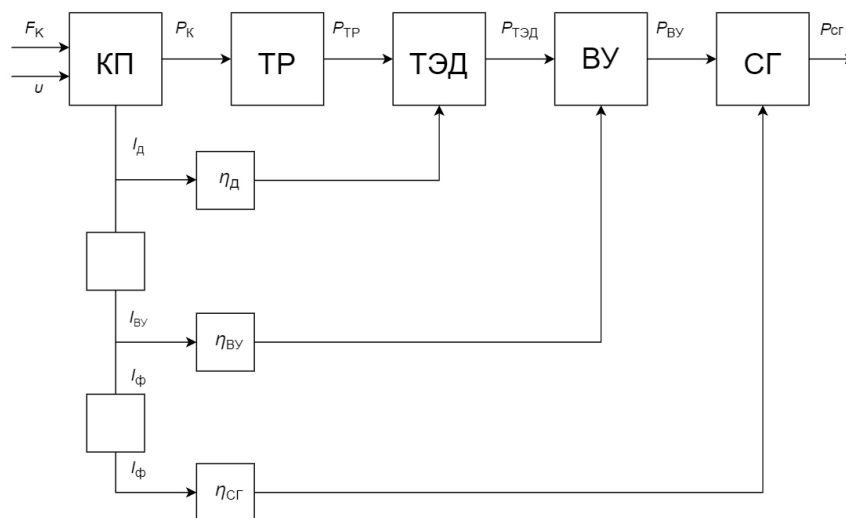


Рис. 5. Алгоритм нахождения расхода топлива

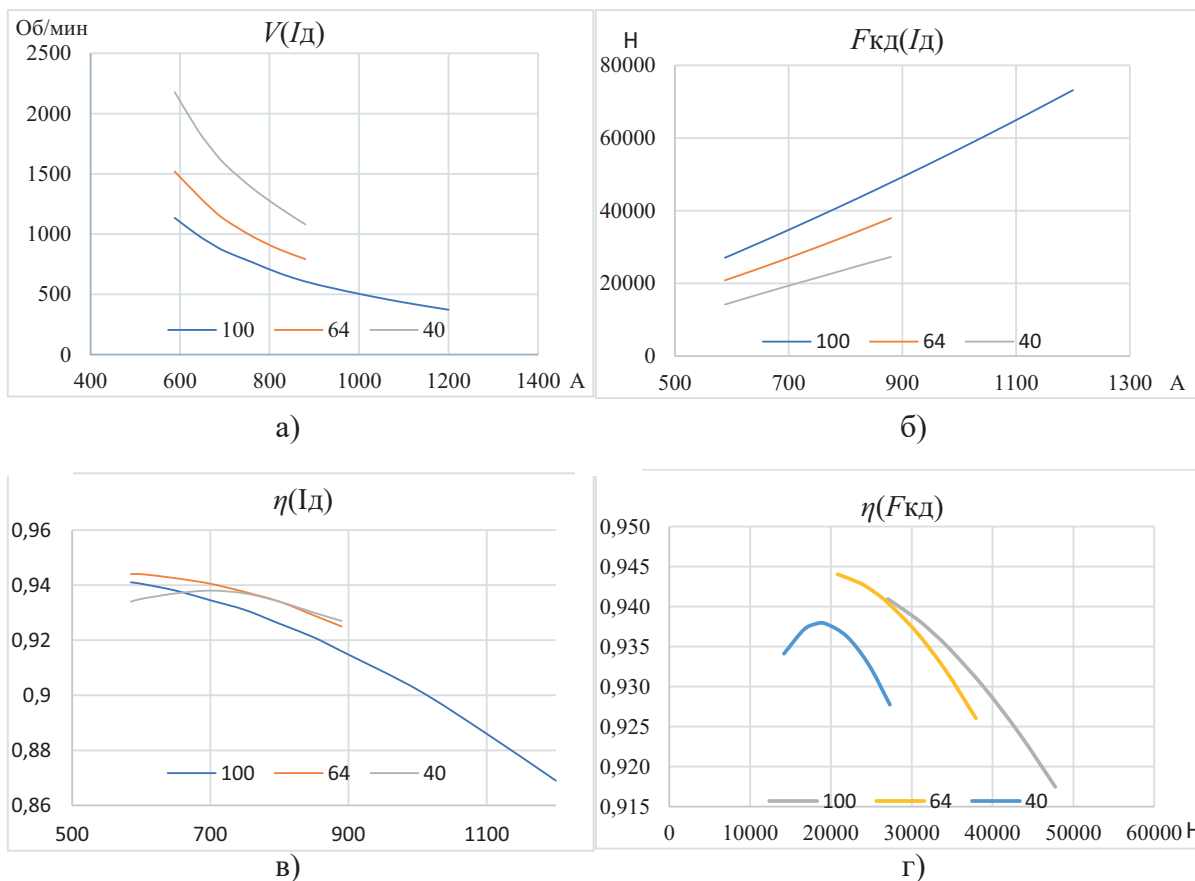


Рис. 6. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя ЭД133[10]

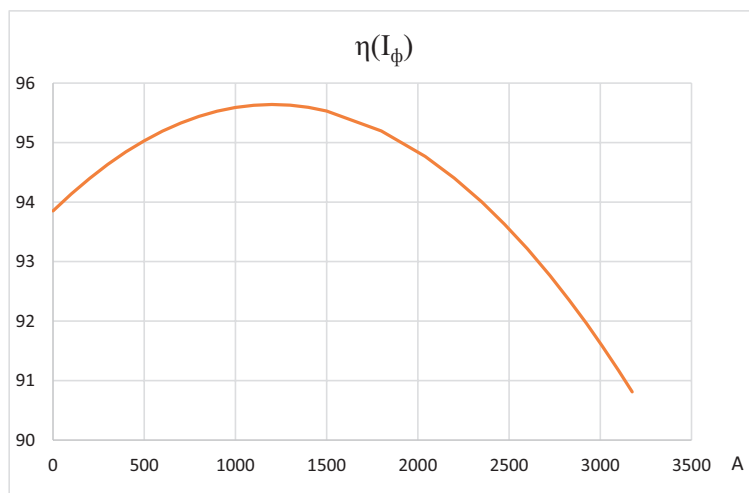


Рис. 7. Зависимость КПД тягового генератора ГС-501 от тока фазы

$$F_{кд} = \frac{F_{к}}{12}, \quad (7)$$

где $F_{к}$ — сила тяги Н, определенная задатчиком скорости для поддержания постоянной скорости движения; $F_{кд}$ — сила тяги одного тягового электродвигателя.

Для выполнения расчетов из электромеханических характеристик двигателя ЭД133 были найдены зависимости $v(I_d)$, $F_{кд}(I_d)$, $\eta(I_d)$, $\eta(F_{кд})$ (рис. 6) на всех позициях регулирования возбуждения двигателя. Из этих характеристик, зная силу тяги двигателя $F_{кд}$, можем найти его КПД $\eta_{ТЭД}$ и ток I_d .

Ток выпрямительной установки одной секции тепловоза будет равен:

$$I_d = I_d \cdot 6. \quad (8)$$

В свою очередь, ток фазы I_ϕ тягового генератора будет равен:

$$I_\phi = \frac{I_d}{2} \cos \gamma. \quad (9)$$

Зная ток фазы I_ϕ тягового генератора, определяем по характеристике на рис. 6 его КПД.

Мощность на валу тягового электродвигателя будет равна:

$$P'_{ТЭД} = \frac{P_k}{\eta_{КМБ} \cdot 12}. \quad (10)$$

Электрическая мощность двигателя:

$$P_{ТЭД} = \frac{P'_{ТЭД}}{\eta_{ТЭД}}. \quad (11)$$

Мощность на входе выпрямительной установки:

$$P_{ВУ} = \frac{P_{ТЭД}}{\eta_{ВУ}}. \quad (12)$$

Механическая мощность на валу генератора равна:

$$N_\Gamma = \frac{P_{ВУ}}{\eta_\Gamma}. \quad (13)$$

Затраты мощности генератора для обеспечения собственных нужд тепловоза вычисляются так:

$$P_{СН} = P_{МВ} + P_{ОхТД} + P_{ОхВУ} + P_{Комп}, \quad (14)$$

где $P_{МВ}$ — мощность мотор-вентиляторов охлаждения шахты холодильника. В расчетах равна 60 кВт; $P_{ОхТД}$ — мощность мотор-вентиляторов охлаждения тяговых электродвигателей 1-й и 2-й тележек. В расчетах равна 90 кВт; $P_{ОхВУ}$ — мощность мотор-вентиляторов охлаждения выпрямительной установки в расчетах равна 7 кВт; $P_{Комп}$ — мощность электродвигателя компрессора в расчетах 18 кВт.

На основе данных [11] получаем значение мощности генератора, которая отдается на обеспечение собственных нужд одной секции, равной 175 кВт.

Эффективная мощность дизеля будет равна:

$$N_e = N_{\Gamma} + P_{\text{СН}}. \quad (15)$$

В свою очередь, удельный расход топлива тепловозом, затраченный на вождение поезда заданной массы на рассматриваемом участке в любой момент времени и при заданной силе тяги локомотива можно найти из эксплуатационных характеристик тепловозного дизеля типа Д49 рисунок 7[12]



Рис. 8. Параметры расхода топлива дизеля Д49 16ЧН 26/26 в зависимости от мощности

Общий расход топлива тепловозом при выполнении работы на рассматриваемом участке будет равен интегральной сумме расходов по времени при движении с постоянной силой тягой

Результаты расхода топлива тепловозом при движении по участку со скоростями 40 км/ч, 60 км/ч представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Расход топлива тепловозом при движении по участку со скоростями 40 км/ч, 60 км/ч

Скорость ветра	Скорость движения поезда			
	$v = 40$ км/ч		$v = 60$ км/ч	
	Е	е	Е	е
0	1178 кг	27,4	1311 кг	30,5
6	1590 кг	37	1600 кг	37,3
9	1812 кг	42,2	1793 кг	41,8
13	2066 кг	48,1	2045 кг	47,6

Выводы

О достоверности полученных значений удельного расхода топлива с большой вероятностью говорит то, что значения соответствуют статистическим значениям, полученным в результате обработки маршрутов машинистов.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что скорость движения влияет на расход топлива, движение с большей скоростью в отсутствие ветровых нагрузок повышает расход. Ветер также увеличивает расход топлива, при этом его влияние больше при движении с меньшими скоростями. Это подтверждает вывод, что сопротивление движению от ветра (при его наличии) является основой аэродинамического сопротивления, так как из значений таблицы мы видим, что с ростом скорости ветра расход топлива при разных скоростях движения поезда остается примерно одинаковым.

Данная имитационная модель поезда может быть успешно применена для вопросов нормирования расхода топливных ресурсов на тягу поездов, обращающихся на участках со сложными метеорологическими условиями, а также с целью выявления влияния ветровых нагрузок на тягу поездов.

Библиографический список

1. Годовой отчет ОАО «РЖД» 2018 года [Электронный ресурс]. URL: <https://ar2018.rzd.ru/> (дата обращения: 21.03.2018).
2. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов: сб. тр. ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Л. А. Мугинштейн, А. И. Молчанов, С. А. Виноградов и др. М.: ВМГ-Принт, 2014. 144 с.
3. Розы ветров России [Электронный ресурс]. URL: <http://lakka-sails.ru/winds/>.
4. ГОСТ 16350-80 Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. утв. 01.07.1981.
5. Гребнев И. А., Сидорова Н. Н., Пудовиков О. Е. Статистический анализ поездопотока на участке Палласовка — Верхний Баскунчак с целью выявления ветровых нагрузок // Бюллетень научных исследований. ПГУПС. 2022. № 3. С. 75–87.
6. Гребенюк П. Т. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985, 287 с.
7. Алямовский А. А. Инженерные расчеты и SolidWorksSimulation. М.: ДМК Пресс, 2010. 464 с.
8. Гребнев И. А., Пудовиков О. Е. К оценке влияния ветровой нагрузки на грузовой поезд // Известия Транссиба. ОМГУПС. Омск. 2022. № 4. С. 13–21.
9. Пудовиков О. Е. Система автоматического управления скоростью движения грузового поезда с эталонной моделью объекта управления / О. Е. Пудовиков, М. Ю. Куликов, Е. В. Сердобинцев и др. // Прорывные технологии электрического транспорта: материалы Девятого Международного симпозиума «Элтранс-2017» (Eltrans-2017), посвященного 130-летию основания Г. К. Мерчингом электротехнической школы в России. 18–20 октября 2017 г., Санкт-Петербург. СПб.: ООО «ИПК «НП-Принт». 2019. С. 334–339.

10. Верещак Д. М. Электродвигатель тяговый постоянного тока ЭД 133 УХЛ1: протокол периодических испытаний. ТХ.218.1277. Харьков, 2015. 19 с.

11. Киржнер Д. Л., Кравченко О. В., Чикиркин О. В. и др. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации. Ч. 1–4. 2015. 526 с.

12. Никитин Е. А. Тепловозные дизели типа Д49 / В. М. Ширяев, В. Г. Быков, Г. В. Никон и др. Л.: Издательство «Транспорт», 1982. 254 с.

Дата поступления: 20.01.2024

Решение о публикации: 22.02.2024

Контактная информация:

ГРЕБНЕВ Иван Алексеевич — аспирант, lokomotiv197309@gmail.com

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич — докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропоезда и локомотивы» РУТ (МИИТ), oleger@mail.ru

Train simulation model to take into account the influence of wind loads

I. A. Grebnev, O. E. Pudovikov

Russian University of Transport, 9b9, Obrazcova St., Moscow, 127994, Russia

For citation: *Grebnev I. A., Pudovikov O. E.* Train simulation model to take into account the influence of wind loads // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 30–40. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-30-40

Abstract

Objective: this article is devoted to the problem of regulation of fuel resources for train traction in the presence of variable factors affecting consumption. As an example, the wind-dependent section of the Privolzhskaya railway Pallasovka–Verkhniy Baskunchak was considered, using simulation modeling, the presence of the influence of variable factors on fuel consumption, which are often standard-setting. To propose a methodology for their practical accounting in locomotive depots. **Methods:** the article proposes a train simulation model to take into account the influence of wind loads. For this purpose, the traction electric drive of a diesel locomotive with direct-alternating current transmission was presented as a speed controller that maintains the movement of the train at a constant speed equal to the technical average. To determine fuel consumption in order to determine the reliability of the results obtained and the possibility of comparison with experimental statistical values, the electromechanical characteristics of the ED133 traction motor, the GS501 generator and the operational characteristics of the D49 diesel engine were used. **Results:** as a result of modeling the operation of the diesel locomotive power plant, the values of absolute and specific fuel consumption were obtained. The results obtained have a high degree of reliability, as evidenced by earlier statistical data. **Practical significance:** the results obtained once again demonstrated the influence of wind on train traction, and on wind-dependent sections of railways they are standard-forming. The considered model can be applied for the purpose of rationing the consumption of fuel and energy resources in the presence of variable factors affecting consumption.

Keywords: train simulation model, wind Loads, train traction, diesel-electric locomotive, energy efficiency.

References

1. Godovoj otchet OAO "RZhD" 2018 goda [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://ar2018.rzd.ru/> (data obrashhenija: 21.03.2018). (In Russian)
2. Sovremennaja metodologija tehničeskogo normirovanija rashoda toplivno-jenergetičeskikh resursov lokomotivami na tjagu poezdov: sb. tr. učenyh OAO "VNIIZhT" / L. A. Muginshtejn, A. I. Molchanov, S. A. Vinogradov i dr. M.: VMG-Print, 2014. 144 s. (In Russian)
3. Rozy vetrov Rossii [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://lakka-sails.ru/winds/>. (In Russian)
4. GOST 16350-80 Klimat SSSR. Rajonirovanie i statističeskie parametry klimatičeskikh faktorov dlja tehničeskikh celej. utv. 01.07.1981. (In Russian)
5. Grebnev I. A., Sidorova N. N., Pudovikov O. E. Statističeskij analiz poezdopotoka na uchastke Pallasovka — Verhnij Baskunchak s cel'ju vyjavlenija vetrovyh nagruzok // Bjulleten' nauchnyh issledovanij. PGUPS. 2022. № 3. S. 75–87. (In Russian)
6. Grebenjuk P. T. Pravila tjagovyh raschetov dlja poezdnoj raboty. M.: Transport, 1985, 287 s. (In Russian)
7. Aljamovskij A. A. Inženernye rasčety i SolidWorksSimulation. M.: DMK Press, 2010. 464 s. (In Russian)
8. Grebnev I. A., Pudovikov O. E. K ocenke vlijanija vetrovoj nagruzki na gruzovoj poezd // Izvestija Transsiba. OMGUPS. Omsk. 2022. № 4. S. 13–21. (In Russian)
9. Pudovikov O. E. Sistema avtomatičeskogo upravlenija skorost'ju dvizhenija gruzovogo poezda s jetalonom model'ju ob#ekta upravlenija / O. E. Pudovikov, M. Ju. Kulikov, E. V. Serdobincev i dr. // Proryvnye tehnologii jelektričeskogo transporta: materialy Devjatogo Mezhdunarodnogo simpoziuma "Jeltras-2017" (Eltrans-2017), posvjashhennogo 130-letiju osnovanija G. K. Merchingom jelektrotechničeskoi shkoly v Rossii. 18–20 oktjabrja 2017 g., Sankt-Peterburg. SPb.: OOO "IPK "NP-Print". 2019. S. 334–339. (In Russian)
10. Vereshhak D. M. Jelektrodivigatel' tjagovyj postojannogo toka JeD 133 UHL1: protokol periodičeskikh ispytanij. TH.218.1277. Har'kov, 2015. 19 s. (In Russian)
11. Kirzhner D. L., Kravchenko O. V., Chikirkin O. V. i dr. Magistral'nyj gruzovoj dvuhsekcijnyj teplovoz 2TJe25KM. Rukovodstvo po jekspluatacii. Ch. 1–4. 2015. 526 s. (In Russian)
12. Nikitin E. A. Teplovoznye dizeli tipa D49 / V. M. Shirjaev, V. G. Bykov, G. V. Nikonov i dr. L.: Izdatel'stvo "Transport", 1982. 254 s. (In Russian)

Received: 20.01.2024

Accepted: 22.02.2024

Author's information:

Ivan A. GREBNEV — Postgraduate Student, lokomotiv197309@gmail.com

Oleg E. PUDOVIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, oleg@mail.ru

УДК 629.423

Совершенствование структуры системы управления электроприводом переменного тока с асинхронными тяговыми электродвигателями на основе микропроцессорных вычислительных устройств

Ф. А. Сорокин

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

Для цитирования: Сорокин Ф. А. Совершенствование структуры системы управления электроприводом переменного тока с асинхронными тяговыми электродвигателями на основе микропроцессорных вычислительных устройств // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 41–49. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-41-49

Аннотация

Цель: рассмотрение вопроса о совершенствовании структуры системы автоматического управления тяговым электроприводом переменного тока с асинхронными электродвигателями. Отказ от физического датчика частоты вращения колесной пары. Обзор производительности микропроцессорных вычислительных устройств в начале их появления в СССР. Обзор параметров производительности зарубежных и отечественных микропроцессорных вычислительных устройств как за рубежом, так и в России. Сравнение производительности вычислительных устройств в моменты времени их появления и на сегодняшний момент. **Методы:** сбор информации о возможных вариантах совершенствования структуры системы автоматического управления тяговым электроприводом переменного тока. Сбор информации об отечественных микропроцессорных вычислительных устройствах, применявшихся в начале их появления. Сбор информации об отечественных и зарубежных микропроцессорных вычислительных устройствах, применяющихся на сегодняшний день. Сравнение параметров производительности отечественных микропроцессорных вычислительных устройств, применявшихся в начале их появления, с устройствами, применяющимися на сегодняшний день. **Результаты:** указана возможность анализа реализации микропроцессорной СУ тяговым электроприводом с асинхронными электродвигателями без использования физического датчика частоты вращения при помощи наблюдателя состояния на основе адаптивного фильтра Люенбергера. **Практическая значимость:** заключается в получении экономической выгоды от ликвидации физического датчика частоты вращения колесной пары вследствие ликвидации затрат на производство и обслуживание.

Ключевые слова: фильтр Люенбергера, датчик частоты вращения, система управления, микропроцессорные устройства, бездатчиковый привод.

Введение

Одним из необходимых элементов системы управления (СУ) тягового привода является датчик частоты вращения колесной пары. При работе на него может влиять в худшую сторону множество факторов, такие как величины вибрации, перепады температуры окружающей среды, загрязненность воздушной среды, наводки от силовых кабелей на канал передачи информации от датчика

к процессору и т. д. [1]. Из-за некорректной работы данного датчика СУ тяговым приводом может работать некорректно, приводя до аварийных ситуаций. По этой причине возникает потребность в нахождении новых методов определения частоты вращения КП.

Одним из решений данной проблемы может являться построение наблюдателя состояния, косвенно определяющего величину частоты вращения колесной пары. В частности, в публикациях [2–4] были рассмотрены вопросы синтеза специализированных наблюдателей состояния бездатчиковых СУ тяговым приводом и получены достаточно удовлетворительные результаты по вопросам точности, не уступающие их величинам в датчиковых СУ. В конечном счете исключение датчика частоты вращения позволит вовсе исключить физический датчик частоты вращения из структуры СУ.

Однако на сегодняшний день не выяснено, есть ли вычислительные устройства (ВУ), необходимые для практической реализации, приведенные выше наблюдателей состояния. По этой причине необходимо сделать обзор ВУ, применявшихся ранее, с ныне выпускаемыми образцами для управления электроприводом локомотивов.

Реализация систем управления электроприводов переменного тока в СССР

Бурное развитие интегральных микросхем как в СССР, так и за рубежом в 70–80-х годах XX века сделало возможным реализацию первых СУ электроприводом с электродвигателями переменного тока. В СССР разработкой электропривода переменного тока занимались в Ленинградском институте инженеров транспорта имени академика В. Н. Образцова (ЛИИЖТ). В частности, над асинхронным электроприводом для тепловозов серий ВМЭ1А, ТЭ120 и 2ТЭ137 вели работы сотрудники научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) электрической тяги на переменном токе кафедры «Электрические машины» [5–7]. Конкретно для тепловоза ТЭ120 тяговый привод проектировался и реализовывался совместно с Таллинским электротехническим заводом имени М. И. Калинина (ТЭЗ) (изготовление силовых полупроводниковых элементов, шкафов инверторов и их комплектование) и Новосибирским институтом инженеров железнодорожного транспорта (НИИЖТ) (разработка системы автоматического управления тягового преобразователя ПЧТ-3У2, включавшим в себя 6 инверторов ШИ-1У2). СУ была реализована на основе схем жесткой логики с использованием микросхем серий К140 и КМ155.

Применение данных вычислительных устройств позволило осуществить первые шаги по практической реализации управления электроприводом с асинхронными электродвигателями, реализующими скалярный метод управления в режимах тяги и торможения, испытать алгоритмы управления

при работе привода в различных режимах (юз, боксование). Однако системы автоматического управления с жесткой структурой не позволяли изменить значительное число характеристик системы без изменения монтажа и печатных плат, и, как правило, системы управления с жесткой структурой включали в себя большее количество межэлементных соединений, что негативно отражалось на их надежности. Также по сравнению с микропроцессорными устройствами при разработке схем управления с жесткой логикой требовалось большее время и в конечном счете возрастала стоимость ее разработки.

По этим причинам по заданию трамвайно-троллейбусного управления Ленинграда (ТТУЛ) на кафедре «Электрическая тяга» велись работы по созданию электропривода с асинхронными электродвигателями с микропроцессорной реализацией управления для трамвайного вагона. В СССР в начале 80-х годов промышленность освоила производство микропроцессорных комплектов серий К580, К582 и К586, содержащих однокристалльные МП. Они наиболее эффективно применялись при построении устройств цифровой автоматики и простейших контроллеров. Также промышленность производила комплекты серий К536, К581, К583, К584, К587, К588 и К589, предназначавшиеся в первую очередь для построения микро-ЭВМ и сложных контроллеров.

В итоге для построения системы автоматического управления был выбран МП К580ИК80. Его общий вид **представлен на рис. 1**. Кристалл размером 4,2 x 4,8 мм содержит около 5 тыс. транзисторов и заключен в 48-вы-

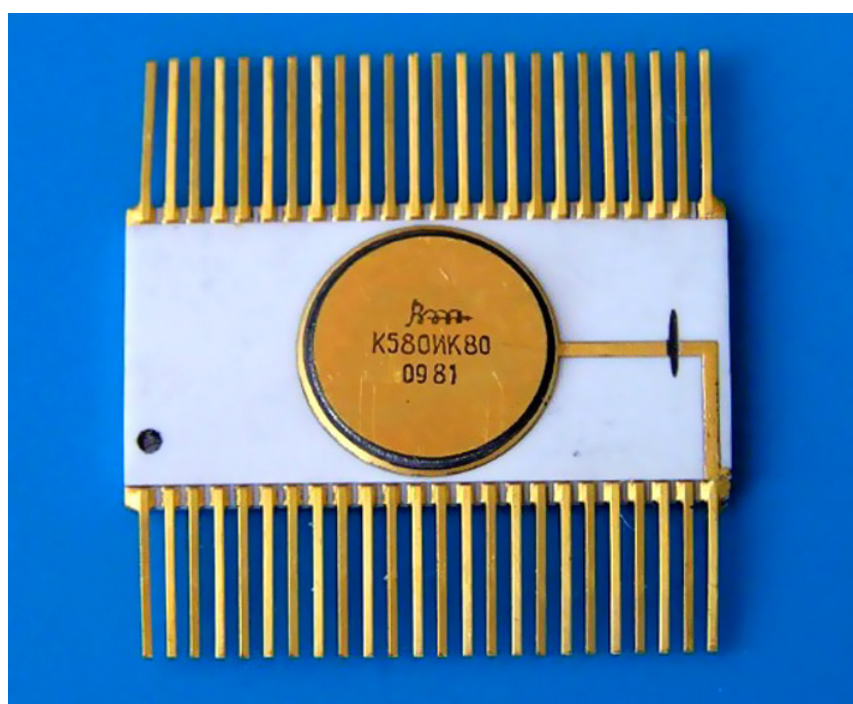


Рис. 1. Общий вид МП К580ИК80. Фото: <https://computer-museum.ru/>

водной корпус размером 30 x 35 мм. Максимальная частота МП равна 2 МГц, что соответствует длительности такта 0,5 мкс. Команды в зависимости от типа требуют для своего выполнения от 1 до 5 машинных циклов; каждый машинный цикл включает от 3 до 5 тактов. Самые простые команды, требующие обращения к памяти, выполняются в течение 1 машинного цикла за 4 такта, то есть за 2 мкс; самые длинные — в течение 5 машинных циклов за 18 тактов, то есть за 9 мкс. [8]

На его основе был реализован скалярный метод управления асинхронными тяговыми двигателями трамвая ЛМ68М. Алгоритм системы управления, построенной на микропроцессорной основе, представлен на рис. 2.

На первой ступени в МП поступает сигнал, по которому он определяет режим движения (тяга или торможение). Далее происходит измерение скорости вращения ω_i тяговых электродвигателей и в МП формируется среднее значение этой скорости $\omega_{cp} = \Sigma \omega_i / 4$ (4 — число двигателей или колесных пар в одном вагоне). В случае юза или боксования одной из колесных пар для нее не будет выполняться условие $\omega_i - \omega_{cp} \leq \omega_{dop}$ (ω_{dop} — максимально допустимая величина рассогласования) и в МП перейдет к одной из прерывающих программ в зависимости от знака рассогласования. Когда средняя скорость ω_{cp} превысит максимальную, то МП также начинает обрабатывать программу прерывания, направленную на введение в действие пневматическое торможения. В режиме электрического тормоза МП контролирует, кроме того, минимальную скорость, при достижении которой МП вырабатывает сигнал на приведение в действие пневматических тормозов. По заданным значениям скорости ω_3 и относительной частоты тока ротора β_3 МП рассчитывает заданное значение частоты тока статора $\omega'_0 = \omega_{cp} \pm \beta_3 \cdot \omega_3$. После измерения действительного значения ω_0 происходит сравнение ω_0 и ω'_0 и формируется сигнал $\Delta\omega_0$, направленный на возвращение системы в заданное положение. В зависимости от заданной кратности момента M_3 МП рассчитывает заданное значение напряжения на инверторе. Затем измеряется напряжение на тяговых двигателях U_i , формируется среднее значение U_{cp} и оценивается разность $U_i - U_{cp}$. Она не должна превышать ΔU_{dop} . МП также контролирует среднее значение U_{cp} напряжения, чтобы оно не превысило максимально допустимого U_{max} . При достижении равенства он посылает сигнал на ИРН, ограничивающий коэффициент заполнения $\lambda \leq \lambda_{max}$. После измерения напряжения на инверторе $U_{ин}$ это значение сравнивается с заданным $U_{из}$ и формируется сигнал $\Delta\lambda$, изменяющий коэффициент заполнения для возвращения системы в исходное заданное состояние. На этом очередной цикл регулирования заканчивается.

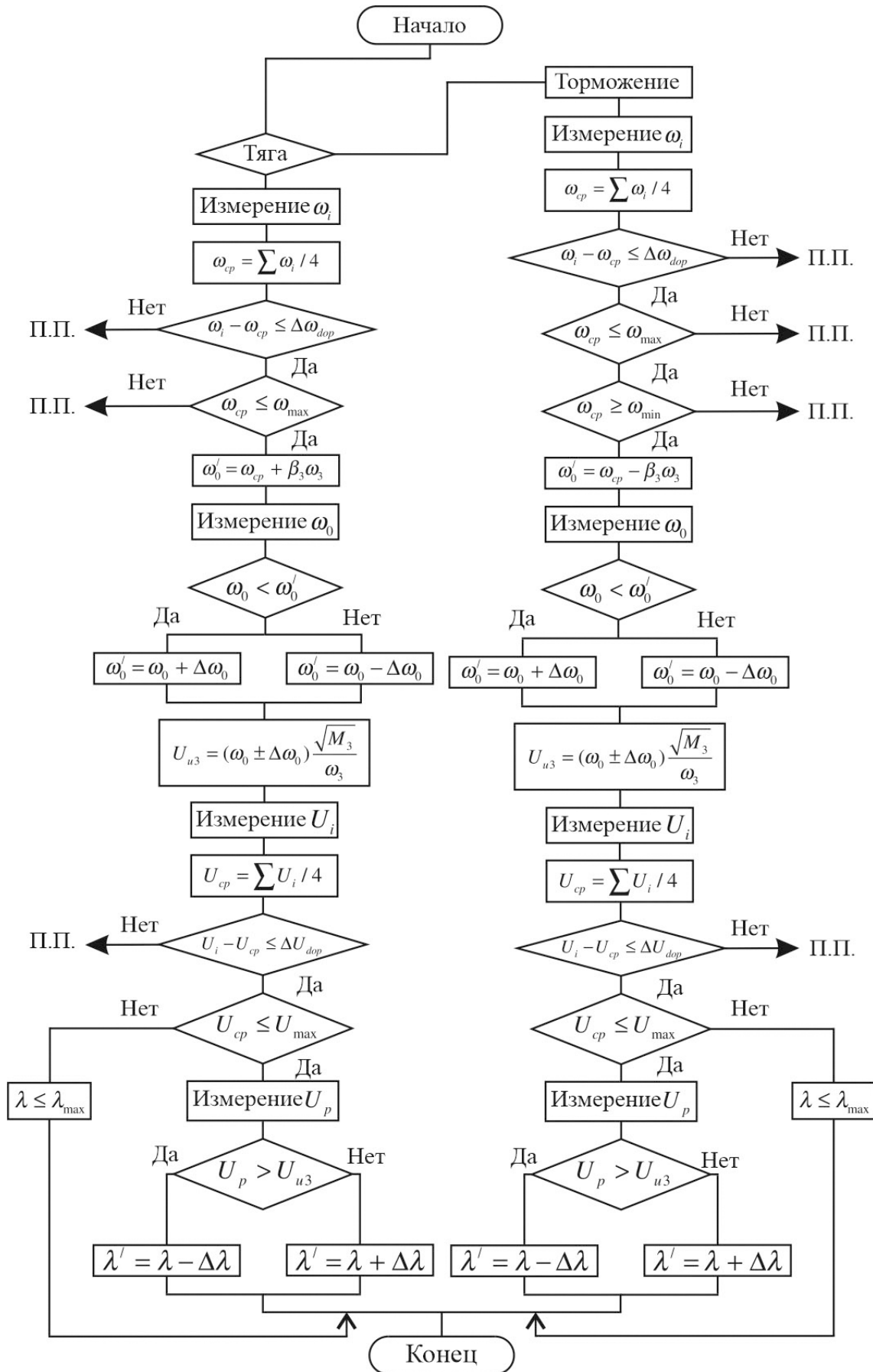


Рис. 2. Алгоритм работы МП

Современное положение дел на рынке микропроцессоров со специализированными периферийными устройствами

На сегодняшний день значительно возросло как число производителей микропроцессорной техники, так и ее номенклатура. Для решения задач управления электроприводами у различных производителей существуют отдельные модели микроконтроллеров. Наиболее распространенными компаниями на рынке, выпускающими микроконтроллеры и микропроцессоры для нужд автоматизации электропривода, являются STMicroelectronics, Texas Instruments, АО «ПКК «Миландр», АО НИИЭТ и АО «Микрон». Основные параметры наиболее производительных микроконтроллеров приведены в табл. 1 [9–13].

ТАБЛИЦА 1. Основные параметры микроконтроллеров

Обозначение модели	Производитель	Страна	Тактовая частота, МГц	Разрядность, бит
K1967	АО «ПКК «Миландр»	Россия	230	32
K1986	АО «ПКК «Миландр»	Россия	144	32
K1946	АО НИИЭТ	Россия	200	32
K1921	АО НИИЭТ	Россия	32	32
K1948	АО «Микрон»	Россия	32	32
STM32FXxxx	STMicroelectronics	Швейцария	216	32
STM32Hxxx	STMicroelectronics	Швейцария	550	32
TMS320Xxxx	Texas Instruments	США	200	32
MSP430Fxxx	Texas Instruments	США	25	16
MSPM0Xxxx	Texas Instruments	США	80	32
AM2XXXx	Texas Instruments	США	800	32

На основе параметров из приведенной таблицы видно, что по сравнению с частотой тактирования МП К580ИК80, составлявшей 2 МГц, ее значение для лучших образцов микроконтроллеров выросло в 400 раз. Тем самым можно говорить о значительном росте их производительности.

Заключение

За последние 40 лет производительность микропроцессоров выросла в разы и тем самым открывается возможность для анализа реализации микропроцессорной СУ тяговым электроприводом с асинхронными электродвигателями без использования физического датчика частоты вращения при помощи наблюдателя состояния на основе адаптивного фильтра Льюенбергера. Отказ физического датчика частоты вращения позволит отказаться от монтажа как канала связи датчика с вычислительным устройством, так и самого датчика, тем самым сэкономить

средства, необходимые для оплаты труда персонала. Также его отсутствие позволит экономить средства, необходимые на оплату рабочих, осуществляющих его демонтаж, обслуживание и монтаж при различных видах ремонта.

Библиографический список

1. Датчики частоты вращения для подвижного состава // Железные дороги мира. 2007. № 5. С. 55–58.
2. Колодин И. Ю. Бездатчиковый асинхронный электропривод с адаптивно-векторной системой управления // Электричество. 2007. № 1. С. 44–50.
3. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Воронко А. Б. и др. Сравнительное экспериментальное тестирование систем бездатчикового управления асинхронными двигателями // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2012. Т. 19, № 3. С. 137–141.2
4. Колпахчян П. Г., Пахомин С. А., Кочин А. Е. и др. Наблюдатель состояния асинхронного тягового двигателя на базе фильтра Люенбергера // Интеллектуальные информационные технологии для промышленности. The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG, 2023. — С. 260–270.
5. Совершенствование электропередачи переменного тока на базе макетного маневрового тепловоза ВМЭ1А-024. Разработка принципиальных схем тепловоза и технических требований к стенду: отчет о НИР / ЛИИЖТ; рук. Пармас Я. Ю.; исполн.: Белов А. М., Балычев П. К., Грищенко А. В. Ленинград, 1981. 148 с. Библиогр.: с. 139. № ГР 80021150. Инв. № 0282.0060612.
6. Тягово-энергетические испытания тепловоза ТЭ120 с электропередачей переменного тока. Исследование опытного шкафа автономного инвертора типа ШИ-1БУ2 на стенде ЛИИЖТа и разработка системы управления и защиты на основе интегральных микросхем : отчет о НИР / ЛИИЖТ; рук. Комаров Ю. И.; исполн.: Тимофеев Б. А., Бурков А. Т., Гришуков Л. С. Ленинград, 1977. 200 с. Библиогр.: с. 185. № ГР 72037156. Инв. № 637828.
7. Участие в эксплуатационных испытаниях выпрямительно-инверторного преобразователя тепловоза 2ТЭ137 : отчет о НИР / ЛИИЖТ; рук. Пармас Я. Ю.; исполн.: Горбатенко В. И., Чернов С. С., Беркович Е. И. Ленинград, 1991. 86 с. Библиогр.: с. 55. № ГР 01920009786. Инв. № 0292.0009677.
8. Разработка принципиальных схем асинхронного электропривода трамвая: отчет о НИР / ЛИИЖТ; рук. Некрасов В. И.; исполн.: Ляменков В. Т., Рогов А. Н., Гаврилов Б. П. Ленинград, 1983. 190 с. Библиогр.: с. 158. № ГР 81037298. Инв. № 0284.0036324.
9. Microcontrollers & microprocessors // STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors.html> (дата обращения: 24.02.2024).
10. Microcontrollers (MCUs) & processors // Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/info/contact-us.html> (дата обращения: 24.02.2024).
11. Микроконтроллеры и процессоры // Миланр. URL: <https://milandr.ru/?ysclid=lsz64bihyu680982892> (дата обращения: 24.02.2024).
12. Интегральные микросхемы // НИИЭТ. URL: <https://niiet.ru/> (дата обращения: 24.02.2024).

13. Микроконтроллеры и транзисторы для гражданского рынка // mikron. URL: <https://mikron.ru/?ysclid=lsz69gw3mo401439020> (дата обращения: 24.02.2024).

Дата поступления: 22.01.2024

Решение о публикации: 25.02.2024

Контактная информация

СОРОКИН Филипп Александрович — аспирант; filippovna1965@mail.ru

Improving the structure of the control system for an AC electric drive with asynchronous traction motors based on microprocessor computing devices

F. A. Sorokin

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

For citation: Sorokin F. A. Improving the structure of the control system for an AC electric drive with asynchronous traction motors based on microprocessor computing devices // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 41–49. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-41-49

Abstract

Objective: consideration of the issue of improving the structure of the automatic control system for an AC traction electric drive with asynchronous electric motors. Abandonment of the physical wheelset speed sensor. An overview of the performance of microprocessor computing devices at the beginning of their appearance in the USSR. An overview of the performance parameters of foreign and domestic microprocessor computing devices both abroad and in Russia. Comparison of the performance of computing devices at the time of their appearance and at the present moment. **Methods:** collecting information on possible options for improving the structure of the automatic control system for an AC traction electric drive. Collecting information about domestic microprocessor computing devices used at the beginning of their appearance. Collection of information on domestic and foreign microprocessor computing devices used today. Comparison of performance parameters of domestic microprocessor computing devices used at the beginning of their appearance with devices used today. **Results:** the possibility of analyzing the implementation of a microprocessor control system by a traction electric drive with asynchronous electric motors without using a physical speed sensor using a state observer based on an adaptive Luenberger filter is indicated. **Practical importance:** it consists in obtaining economic benefits from the elimination of the physical speed sensor of the wheelset as a result of the elimination of production and maintenance costs.

Keywords: Luenberger filter, speed sensor, control system, microprocessor devices, sensorless drive.

References

1. Datchiki chastoty vrashcheniya dlya podvizhnogo sostava // ZHeleznnye dorogi mira. 2007. № 5. S. 55–58. (In Russian)
2. Kolodin I. Yu. Bez datchikovyj asinhronnyj elektroprivod s adaptivno-vektornoj sistemoj upravleniya // Elektrichestvo. 2007. № 1. S. 44–50. (In Russian)

3. Peresada S. M., Kovbasa S. N., Voronko A. B. i dr. Cravnitel'noe eksperimental'noe testirovanie sistem bezdatchikovogo upravleniya asinhronnymi dvigatelyami // Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi. 2012. T. 19, № 3. S. 137–141.2 (In Russian)

4. Kolpahch'yan P. G., Pahomin S. A., Kochin A. E. i dr. Nablyudatel' sostoyaniya asinhronnogo tyagovogo dvigatelya na baze fil'tra Lyuenbergera // Intellektual'nye informacionnye tekhnologii dlya promyshlennosti. The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG, 2023. S. 260–270. (In Russian)

5. Sovershenstvovanie elektroperedachi peremennogo toka na baze maketnogo manevrovogo teplovoza VME1A-024. Razrabotka principial'nyh skhem teplovoza i tekhnicheskikh trebovanij k stendu: otchet o NIR / LIIZHT; ruk. Parmas YA. YU.; ispoln.: Belov A. M., Balychev P. K., Grishchenko A. V. Leningrad, 1981. 148 s. Bibliogr.: s. 139. № GR 80021150. Inv. № 0282.0060612. (In Russian)

6. Tyagovo-energeticheskie ispytaniya teplovoza TE120 s elektroperedachej peremennogo toka. Issledovanie opytnogo shkafa avtonomnogo invertora tipa SHI-1BU2 na stende LIIZHTa i razrabotka sistemy upravleniya i zashchity na osnove integral'nyh mikroskhem: otchet o NIR / LIIZHT; ruk. Komarov Yu. I.; ispoln.: Timofeev B. A., Burkov A. T., Grishukov L. S. Leningrad, 1977. 200 s. Bibliogr.: s. 185. № GR 72037156. Inv. № 637828. (In Russian)

7. Uchastie v ekspluatacionnyh ispytaniyah vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya teplovoza 2TE137: otchet o NIR / LIIZHT ; ruk. Parmas YA. YU.; ispoln.: Gorbatenko V. I., Chernov S. S., Berkovich E. I. Leningrad, 1991. 86 s. Bibliogr.: s. 55. № GR 01920009786. Inv. № 0292.0009677. (In Russian)

8. Razrabotka principial'nyh skhem asinhronnogo elektroprivoda tramvaya: otchet o NIR / LIIZHT ; ruk. Nekrasov V. I.; ispoln.: Lyamenkov V. T., Rogov A. N., Gavrilov B. P. Leningrad, 1983. 190 s. Bibliogr.: s. 158. № GR 81037298. Inv. № 0284.0036324. (In Russian)

9. Microcontrollers & microprocessors // STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors.html> (data obrashcheniya: 24.02.2024).

10. Microcontrollers (MCUs) & processors // Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/info/contact-us.html> (data obrashcheniya: 24.02.2024).

11. Mikrokontrollery i processory // Milanr. URL: <https://milandr.ru/?ysclid=lsz64bihyu680982892> (data obrashcheniya: 24.02.2024). (In Russian)

12. Integral'nye mikroskhemy // NIJET. URL: <https://niiet.ru/> (data obrashcheniya: 24.02.2024). (In Russian)

13. Mikrokontrollery i tranzistory dlya grazhdanskogo rynka // mikron. URL: <https://mikron.ru/?ysclid=lsz69gw3mo401439020> (data obrashcheniya: 24.02.2024). (In Russian)

Received: 22.01.2024

Accepted: 25.02.2024

Author's information:

Filipp Al. SOROKIN – postgraduate student; filippovna1965@mail.ru

УДК 625.033.34

О совершенствовании взаимодействия локомотивных бригад пригородных поездов с ремонтными подразделениями

В. С. Пахомова¹, В. О. Иващенко²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, факультет «Транспортные и энергетические системы», группа ПС-903, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

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

Для цитирования: Пахомова В. С., Иващенко В. О. О совершенствовании взаимодействия локомотивных бригад пригородных поездов с ремонтными подразделениями // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 50–55. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-50-55

Аннотация

Цель: исследование вопроса о необходимости внесения корректировок в Методику взаимодействия локомотивных бригад пригородных поездов с ремонтными подразделениями. Исследование вопроса о внедрении нового оперативного центра взаимодействия отделения ремонта с локомотивными бригадами посредством мобильного приложения, разработанного на базе существующей системы АСУ-ПРИГ. Объяснение структуры управления персоналом нового центра. **Методы:** выявление недостатков при взаимодействии локомотивных бригад пригородных поездов с ремонтными подразделениями в настоящее время, анализ сотрудничества двух подразделений и их корректировка, разработка мобильного приложения на базе существующей системы АСУ-ПРИГ, разработка логической схемы взаимодействия. **Результаты:** указана необходимость корректировки взаимодействия локомотивных бригад пригородных поездов с ремонтными подразделениями. Установлено, что необходимо ввести новую должность и новый аппарат взаимодействия, названный в проекте **ЦДС**, а также разработать перечень служебных обязанностей для ответственных лиц. Выявлена необходимость введения мобильного приложения для информационной поддержки локомотивной бригады при выполнении ими связанных с поездкой обязанностей путем предоставления бригаде МВПС доступа к электронной документации, автоматизации связи с ремонтным персоналом ЦДС. Для повышения эффективности взаимодействия мобильное приложение должно быть простым, удобным и иметь понятный интерфейс. **Практическая значимость:** показана необходимость внедрения нового оперативного центра взаимодействия отделения ремонта с локомотивными бригадами посредством мобильного приложения, рекомендованного к применению в эксплуатационном и ремонтном депо. Это нововведение позволит повысить эффективность взаимодействия между двумя подразделениями, что, в свою очередь, улучшит качество ремонта. Такой метод взаимодействия снизит число отказов и поломок подвижного состава. Предложенные изменения в сотрудничестве могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, ЭТ2М, ГДП, ремонтное депо, эксплуатационное депо, ЦДС, ERB.

Основные определения

ЦДС – Центральная диспетчерская служба.

Оперативная группа – оперативная группа ремонтного персонала. По возможности следует на станцию оборота, консультирует по телефону.

Дежурный мастер – сменный мастер, руководящий резервом и оперативной группой.

Резерв – резервный сотрудник.

Сервер ЦДС – сервер по сбору и обработке данных.

ЦДС-1 – центральный диспетчер (старший/главный дежурный).

Исследованиями в области железнодорожных перевозок занимается множество российских и зарубежных ученых [1, 2].

Железнодорожная транспортировка — прекрасная возможность организовать массовую перевозку грузов и пассажиров на внушительные расстояния. Пригородные пассажирские перевозки представляют собой особый кластер, соединяющий регионы с крупными городами. Ежегодно услугами Северо-Западной пригородной пассажирской компании (АО «СЗППК») Санкт-Петербурга пользуются порядка 72 млн пассажиров.

Процесс ремонта и обслуживания подвижного состава — важнейшая задача, которая позволяет перевозчику бесперебойно выполнять цели, поставленные заказчиком. С целью повышения экономической эффективности от совершенной поездки нужно правильно выстроить логистику перевозки, а именно создать комплекс мер по организации движения и ремонта подвижного состава.

Например, на сегодняшний день локомотивные бригады депо ТЧ20 обслуживают 177 пригородных поездов (в том числе 16 скоростных), которые курсируют по направлениям.

Наиболее распространенным типом электропоезда, обслуживающего главное и северное направления, является поезд Торжокского вагоностроительного завода серии ЭТ2М.

Электропоезд Торжокского вагоностроительного завода, строившийся с 1999 по 2010 год с шириной колеи 1520 мм, работает на постоянном токе, имеет составность эксплуатации московского направления Октябрьской дирекции моторвагонного подвижного состава (далее — ОДМВ) — 8 вагонов. Конструкционная скорость — 130 км/ч.

За период производства было выпущено 109 электропоездов данной серии. Кроме того, были выпущены 1 электропоезд ЭТ2МРЛ, 3 ЭТ2ЭМ и 6 ЭТ2МЛ.

На сегодняшний день основным эксплуатирующим участком ЭТ2М является московское направление Октябрьской железной дороги.

Работы по ремонту и обслуживанию осуществляет ремонтное депо, при этом нынешняя взаимосвязь локомотивных бригад с ремонтными подразделениями отображает крайне низкую эффективность: выявленные неисправности в процессе эксплуатации должны пройти достаточно длительный путь от локомотивной бригады до исполнителя (мастера). Также существует проблема оказания помощи локомотивной бригаде, находящейся

на линии, что влечет за собой сбои в работе, нарушающие график движения поездов (далее — ГДП).

К основным недостаткам нынешней системы относятся:

1. Долгий бюрократический путь выявленной неисправности в процессе эксплуатации (чередa письменных журналов и книг ремонта);
2. Человеческий фактор в процессе передачи характера неисправности;
3. Отсутствие возможности контролировать ситуацию непосредственно на линии;
4. Отсутствие прямого взаимодействия эксплуатационных и ремонтных подразделений;
5. Невозможность оказать оперативное вмешательство ремонтным персоналом в процессе эксплуатации без организации размена секции по станции оборота, с исключением возможности продолжать работу;
6. Нарушение ГДП ввиду отказа технических средств (далее — ОТС);
7. Дополнительная нагрузка на ГДП для организации размена электропоездов.

Предприятия для реализации проекта: депо ТЧ20, ТЧ15 (ОДМВ). Данные предприятия ОктЖД были выбраны базовыми для реализации экспериментальной версии проекта, ввиду того что ОДМВ является самым крупным предприятием ж/д по эксплуатации и ремонту МВПС, а также передовым по внедрению новых технологий производства, согласно отчету ЦДМВ за 2023 год. Исходя из вышеизложенного, предлагается разработать реструктуризацию взаимодействия сотрудников локомотивных бригад и дежурных по пунктам оборота пригородного сообщения с аппаратом ремонтного персонала посредством введения обновленной структуры и мобильного приложения ERB в сочетании с системой АСУ-ПРИГ.

Задачи

1. Разработать и внедрить новый оперативный центр взаимодействия;
2. Разработать структуру управления персоналом нового центра;
3. Разработать перечень служебных обязанностей для ответственных лиц;
4. Разработать алгоритм работы и взаимодействия сотрудников;

Ввиду того что все дежурные по пункту оборота (далее — ТЧДПО) относятся в ОДМВ к сотрудникам ремонтного депо, на базе последнего предлагается ввести новую должность и новый аппарат взаимодействия, названный в проекте ЦДС.

Мобильное приложение для локомотивных бригад (ERB)

ERB—Electronic Railway Bag—электронное устройство для информационной поддержки локомотивной бригады при выполнении ими связанных с поездкой обязанностей путем предоставления бригаде МВПС доступа к электронной документации, автоматизации связи с ремонтным персоналом ЦДС.

Приложение должно содержать:

- простой и понятный интерфейс;
- классификатор неисправностей;
- технический материал (схемы, аварийные карты);
- чек-листы по выходу из нестандартных ситуаций;
- открытый авторизованный доступ;
- связь с АСУ депо.

Порядок работы с помощью приложения

В процессе эксплуатации локомотивная бригада, обнаружившая неисправность, открывает приложение на устройстве, интегрированном в панель приборов электропоезда. Посредством мобильного приложения через сервер ЦДС сигнал поступает старшему дежурному, тот, в свою очередь, по согласованию с дежурным мастером определяет срочность возникшей неисправности. Если неисправность не требует незамедлительного вмешательства, она будет устранена на ближайшем заходе электропоезда в ремонтное депо. Если неисправность требует устранения в кратчайшие сроки по показателям

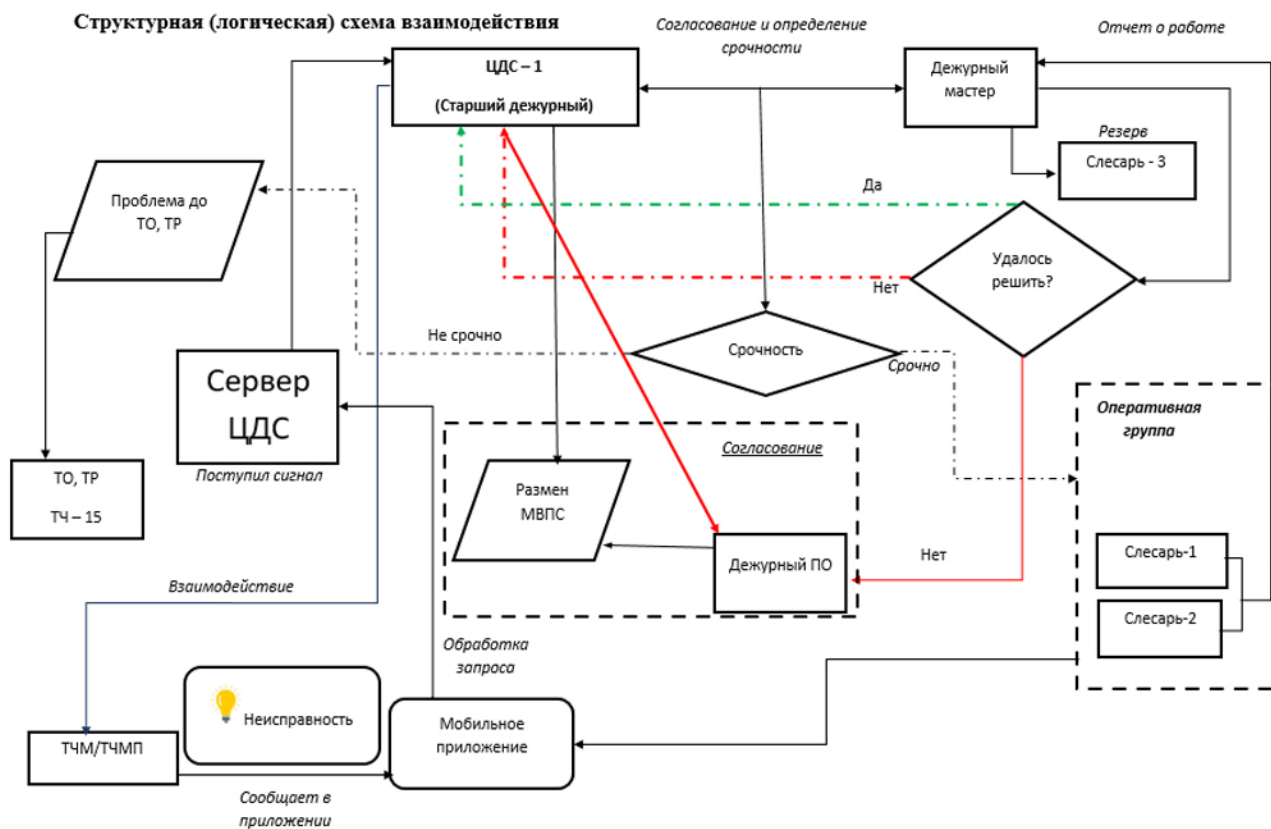


Рис. 1. Логическая схема взаимодействия

безопасности движения (АЛСН, приборы безопасности) или восстановлению тяговых характеристик, то дежурный мастер задействует оперативную группу слесарей, которые в зависимости от ситуации подключаются в режиме «советчик» дистанционно, посредством ЕРВ, и помогают локомотивной бригаде устранить неисправность самостоятельно или при необходимости отправляются на ближайшую станцию оборота неисправного подвижного состава с набором инструментов и необходимых запасных частей для проведения срочных ремонтных работ. Также рассматривается вариант прибытия оперативной группы непосредственно к месту аварии (в случае такой технической необходимости и возможности).

При устранении неисправности оперативная группа сообщает об этом старшему дежурному. Если же произвести ремонт на горячем составе невозможно, старший дежурный связывается с дежурным по пункту оборота, чтобы организовать размен МВПС, о чем сообщается локомотивной бригаде с предоставлением резервной исправной электросекции.

Таким образом, изменение взаимодействия двух подразделений снижает нагрузку, возложенную на локомотивную бригаду при возникновении нестандартной ситуации, согласно положению № 2580-р, и предоставляет большую гарантию сохранения резервного МВПС на случай, предусмотренный для оперативного размена МПВС.

Внедрение нового технологического процесса и интеграция мобильного приложения не только ускорят взаимодействие сотрудников в нестандартной ситуации, но и сохранят на должном уровне безопасность движения.

Библиографический список

1. Иващенко В. О. ТЧ20. Навстречу ветрам. СПб.: Изд-во «Вектор», 2021. 135 с.
2. Богданов Е. Ю., Иващенко В. С. Инструкция взаимодействия локомотивных бригад с отделениями ремонта // Кейс для локомотивных бригад моторвагонного подвижного состава. 2022. С. 50–76.

Дата поступления: 26.02.2024

Решение о публикации: 28.02.2024

Контактная информация

ПАХОМОВА Виолетта Сергеевна — студент, pahomova.violetta@inbox.ru

ИВАЩЕНКО Валерий Олегович — канд. техн. наук, доцент, vio1313@mail.ru

On Improving the Interaction between Locomotive Brigades of Suburban Trains and Repair Units

V. S. Pakhomova¹, V. O. Ivashchenko²

¹ Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, Faculty of Transport and Energy Systems, Group PS-903, 9, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russia

² Petersburg State University of Railways of the Emperor Alexander I, 9, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Pakhomova V. S., Ivashchenko V. O.* On Improving the Interaction between Locomotive Brigades of Suburban Trains and Repair Units // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 1. P. 50–55. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-50-55

Summary

Objective: to consider the need to make adjustments to the “Methodology for interaction between locomotive crews of commuter trains and repair departments”. To consider the introduction of a new operational center for interaction between the repair department and locomotive crews through a mobile application developed on the basis of the existing ACS-PRIG system. Develop the personnel management structure of the new center. To present a block diagram of interaction, as well as to describe new positions required for effective interaction of structures. **Methods:** identification of shortcomings in the interaction of locomotive crews of suburban trains with repair units at present, analysis of cooperation between the two units and their adjustment; development of a mobile application based on the existing ASU-PRIG system; development of a logical scheme of interaction. **Results:** the necessity of adjusting the interaction of locomotive crews of suburban trains with repair units is indicated. It is established that it is necessary to introduce a new position and a new apparatus of interaction, named in the project “CDC”, as well as to develop a list of job duties for responsible persons. The need to introduce a mobile application for information support of locomotive crews in the performance of their trip-related duties by providing the MVPS crew with access to electronic documentation, automating communication with the repair personnel of the CDC has been identified. To increase the efficiency of interaction the mobile application should be simple, convenient and have a clear interface. **Practical importance:** the necessity of introducing a new operational center of interaction between the repair department and locomotive crews through a mobile application recommended for use in the operating depot PM-20 and repair depot PM-15 is shown. This innovation will increase the efficiency of interaction between the two units, which in turn will improve the quality of repairs. This method of cooperation will reduce the number of failures and breakdowns of rolling stock. The proposed changes in cooperation can be recommended for practical use.

Keywords: railway transportation, ET2M, SDP, repair depot, operating depot, CDC, ERB.

References

1. Ivashchenko V. O. TCH20. Navstrechu vetram. SPb.: Izd-vo "Vektor", 2021. 135 s. (In Russian)
2. Bogdanov E. Yu., Ivashchenko V. S. Instrukciya vzaimodejstviya lokomotivnyh brigad s ot-deleniyami remonta // Kejs dlya lokomotivnyh brigad motorvagonnogo podvizhnogo sostava. 2022. S. 50–76. (In Russian)

Received: 26.02.2024

Accepted: 28.02.2024

Author's information

Violetta S. PAKHOMOVA — student, pahomova.violetta@inbox.ru

Valery O. IVASHCENKO — PhD Technical Sciences, associate professor, vio1313@mail.ru

УДК 62-519

Разработка методики формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена

А. В. Давыдова, А. К. Канаев

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

Для цитирования: Давыдова А. В., Канаев А. К. Разработка методики формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 56–64. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-56-64

Аннотация

Цель: рассмотреть вопрос развития современных концепций IoT и Smart grid с точки зрения эффективного внедрения на существующие объекты производств, в частности на сеть электроснабжения метрополитена. Показать необходимость разработки научно-методического аппарата по формированию интеллектуальных подсистем мониторинга и управления с учетом внедрения новых разработок в уже существующие комплексы. Определить особенности сети электроснабжения метрополитена и ее подсистем мониторинга и управления с указанием путей развития с учетом существующих новых технологий. Разработать методику формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена. **Методы:** анализ структур построения интеллектуальных подсистем мониторинга и управления согласно современным концепциям; анализ существующих подсистем мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена. При разработке методики применяются полумарковские модели для проведения моделирования процессов функционирования и восстановления, а также предложен метод эмпирической модовой декомпозиции для обработки данных мониторинга. **Результаты:** разработана методика формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена. Предложен модельный и аналитический аппарат для осуществления моделирования процессов функционирования и восстановления и для проведения работ с диагностическими данными. Сформирован перечень параметров методики. **Практическая значимость:** предложенная методика формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения позволяет обосновать необходимый состав, структуру и требования к средствам диагностики и управления. Данная методика может быть применена при разработке новых многопараметрических комплексов метрополитена, при формировании обоснований модернизации и разделов технических заданий и требований.

Ключевые слова: сеть электроснабжения метрополитена, интеллектуальные системы мониторинга IoT и Smart grid, методика формирования подсистемы мониторинга и управления, полумарковская модель, обработка данных, внедрение новых технологий.

Введение. На протяжении последних 20 лет формируются положения новых концепций в области функционирования больших и сложных систем. Концепции интернета вещей и Smart grid предполагают построение новых структур функционирования и контроля рассматриваемых электротехнических комплексов. Построение основывается на охвате областей, начиная с генерации электроэнергии и заканчивая прямым взаимодействием систем с потребителями [1]. Данные концепции переходят в активную фазу развития в последние 5–10 лет за счет применяемых передовых технологий в области обработки данных, искусствен-

ного интеллекта, сетевого взаимодействия, облачных вычислений, работе с большими данными [2–5].

Неотъемлемыми структурами указанных концепций являются интеллектуальные системы мониторинга, управления и обработки данных. Их построение затрагивает разработку четырех условно разграниченных уровней систем: сбора данных, сетевого взаимодействия, хранения и обработки, управления и мониторинга [6]. А развитие входящих в состав технологий создает большой объем решений со значительно высокой скоростью разработки относительно прямого внедрения непосредственно на отдельно взятом производстве [7–9].

С другой стороны, такое непосредственное внедрение затрудняется целесообразностью применения и эффективностью внедрения при наличии зачастую уникальных особенностей самого объекта или производства в целом. К таким особенностям могут быть отнесены: режим работы, электромагнитная совместимость, эксплуатационные климатические условия работы, характер нагрузок, наличие оборудования и подсистем разного поколения, с разным сроком эксплуатации, с индивидуальными технологическими процессами, с частичной реализацией принципов новых технологий.

При этом стоит отметить, что хоть актуальность на данные концепции и растет, но существующие нормативно-правовые акты (НПА) и описание самих концепций носят обобщенный характер, отсутствуют механизмы внедрения на объекты производств, механизмы устранения или прогнозирования рассогласований применяемых новых технологий с существующими, механизмы преодоления барьеров, касающихся топологии построения архитектур, экономических вопросов, вопросов кибербезопасности [10].

Соответственно, исследовательской задачей остается оптимальный выбор технологий для внедрения, повышение эффективности вычислительных ресурсов существующих подсистем, согласованность работы многопараметрических комплексов разных «поколений» в условиях недостаточности разработки НПА в части методического аппарата по внедрению, низкой скорости внедрения относительно скорости разработки новых технологий, индивидуальности и даже уникальности рассматриваемого объекта.

Поэтому необходима методика формирования подсистем мониторинга и управления применительно для сети электроснабжения метрополитена, в рамках разработки которой необходимо охарактеризовать сеть электроснабжения и ее подсистемы мониторинга и управления, определить направления ее развития, разработать алгоритм методики с предложением моделей и методов реализации, сформировать перечень ее параметров.

Краткая характеристика сети электроснабжения метрополитена и ее существующих подсистем мониторинга и управления. Для проведения ана-

лиза необходимо обозначить понятия «сети электроснабжения» и «подсистемы мониторинга и управления». Согласно [11–13] сетью электроснабжения, применительно для метрополитена как части его электрического хозяйства, является совокупность электроустановок для распределения, преобразования и передачи электрической энергии в рамках одной станции, в которую входят совмещенная тяговая понизительная подстанция (СТП) и ее тяговая сеть (положительной и отрицательной полярности). Подсистемами мониторинга и управления являются существующие информационно-измерительные системы и комплексы, системы диспетчерского управления, осуществляющие мониторинг и управление указанной сетью электроснабжения на территории одной станции метрополитена и являющиеся частью общей системы мониторинга и управления системой электроснабжения метрополитена.

Наиболее ресурсоемким и ответственным комплексом СТП является сеть электроснабжения тяги поездов. Путь тягового тока проходит от кабелей вводов на 1 секцию шин и через понижающий трансформатор, кремниевые выпрямительные агрегаты, разъединители, «+» шину 825 В, линейный разъединитель, контактный рельс I и II путей, через токоприемник поезда на электропривод, а уже с подвижного состава через ходовой рельс по кабельным линиям отрицательной полярности на «минус» шину 825 В, завершая построение схемы питания (рис. 1) [14]. На рис. 1 приведены следующие обозначения ВВ — высоковольтный выключатель, ТТ — трансформатор тока, ОПН — ограничитель перенапряжения, ТСК — тяговый трансформатор, КВ — кремниевый выпрямитель, КА — катодный автомат, Р — разъединитель.

В связи с этим на сегодняшний день местами мониторинга являются: ввод, трансформаторы тока и напряжения, кремниевые выпрямительные агрегаты, коммутационное оборудование, параметры которых контролируют следующие подсистем мониторинга:

- комплексная автоматизированная система диспетчерского управления работой линии метрополитена;
- автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии;
- комплекс регистрации технологических нарушений;
- автоматизированная информационно-измерительная система технического учета энергетических ресурсов и воды.

Данные подсистемы мониторинга представляют собой трехуровневый электротехнический комплекс со средствами сбора, передачи и первичной обработки и анализа информации в рамках заложенных измерительных и вычислительных ресурсов, формируя временные, векторные диаграммы, осциллограммы.

Анализ сети электроснабжения метрополитена и ее четырех основных подсистем мониторинга и управления позволил определить как положительные особенности подсистем, способствующие их развитию и модернизации, к которым отно-

сятся хранение большого количества данных, достаточная накопительная емкость подсистем, а также функциональная и вычислительная недостаточность подсистем относительно развивающихся технологий, которая обозначена направлениями их развития, касающиеся обработки больших данных, моделирования процессов, прогнозирования процессов, состояний и параметров, поддержки принятия решения по управлению, модернизации, планированию ресурсов.

Исходные данные и применяемые методы и модели для методики. В рамках разрабатываемой методики предлагается в части моделирования применить полумарковские модели, которые сочетают в себе свойства марковских процессов и процессов восстановления и позволяют рассмотреть процесс функционирования и восстановления более комплексно, совместно с подсистемой мониторинга и управления и рабочим персоналом [15]. К исходным данным для полумарковской модели будут относиться: эксплуатационная статистика для определения множества состояний системы S_n ; инструкции по операционной работе и характеристика технологического процесса для формирования единой базы возможных переходов из одного состояния в другой S_{ij} ; техническая документация или экспертная оценка специалиста для вероятностной и временной характеристики перехода P_{ij} , T_{ij} ; сформированный перечень технических и технологических отграничивающих и задающих параметров; установка вероятностей возникновения ошибок первого и второго рода p_{o1} и p_{o2} ; задание объемов средств диагностирования X_{ij} .

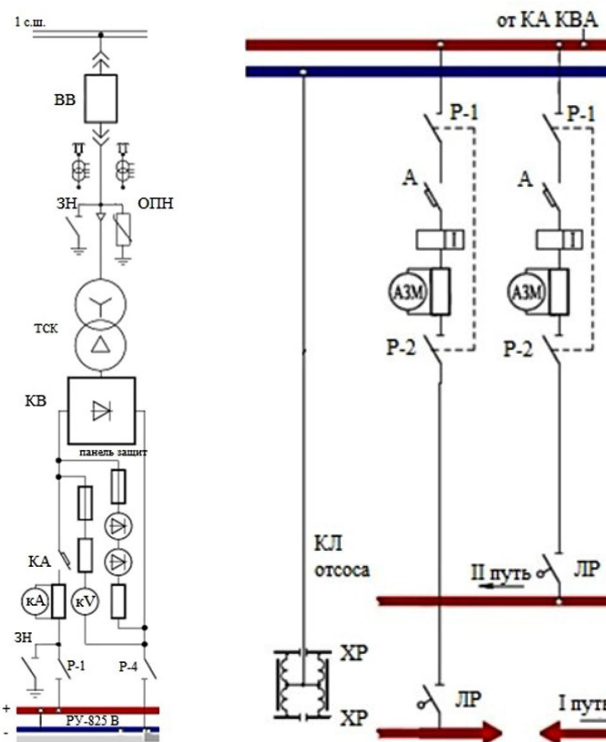


Рис. 1. Часть однолинейной схемы, касающаяся сети электроснабжения тяги поездов метрополитена

Кроме того, для проведения анализа подготовленных и предварительно обработанных данных применяется метод эмпирической модовой декомпозиции [16], отличающийся адаптивностью базиса, оценивания амплитуды, времени и частоты, возможности извлечения составляющей сигнала, а также непрерывное усовершенствование отдельных элементов метода, что позволяет корректировать его под необходимые требования изучаемой модели и комбинировать его с другими методами интеллектуального анализа.

Разработка методики формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена. Выполнение алгоритма методики начинается со сформированной необходимости введения в рассматриваемый комплекс, в данном случае система «сеть электроснабжения — подсистема мониторинга и управления», нового элемента. Методика содержит четыре основных этапа (рис. 2):

1-й этап — формирование перечней исходных данных, требований, ограничений. Результатом 1-го этапа является совокупность исходных параметров моделирования и обработки.

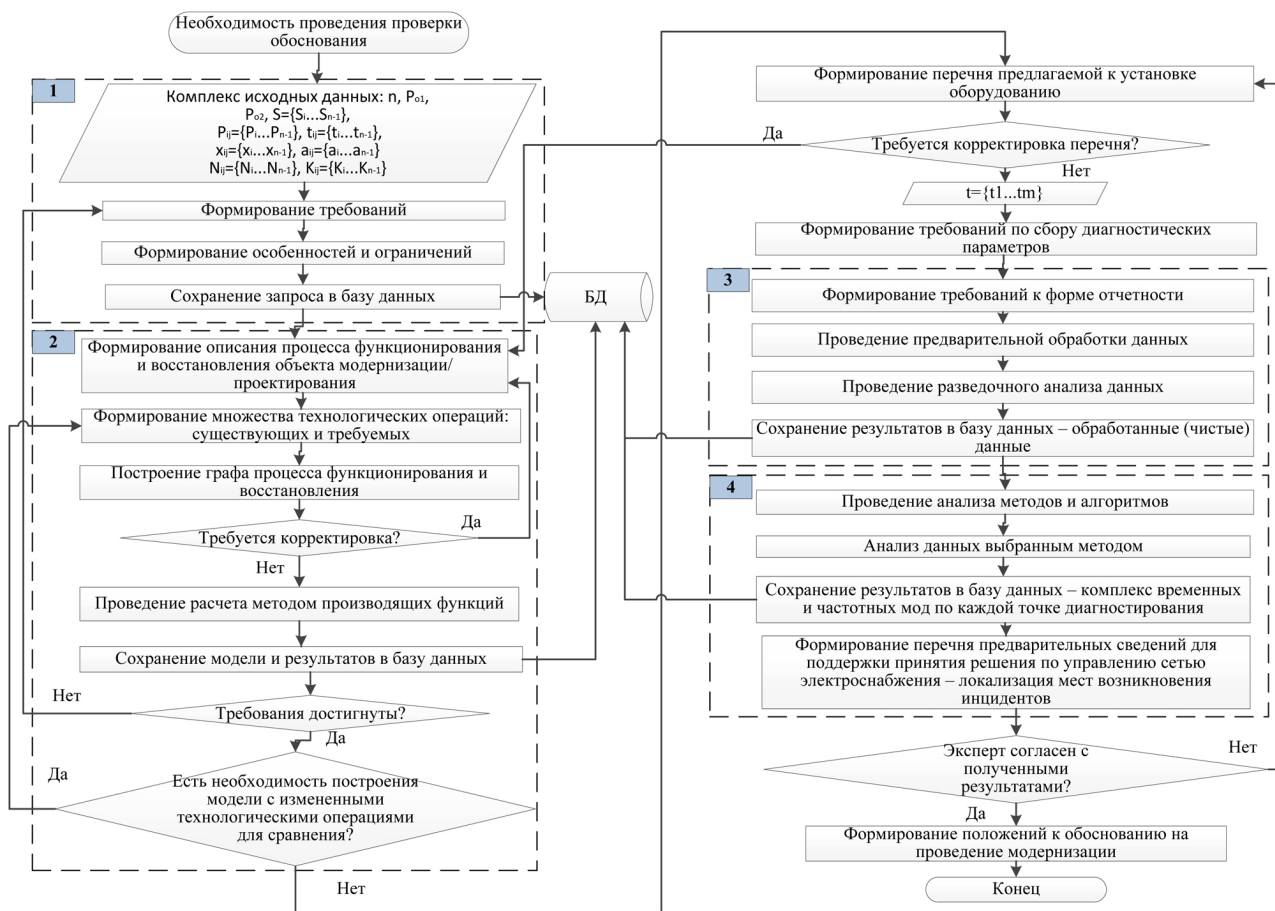


Рис. 2. Блок схема методики формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена

2-й этап — моделирование процессов функционирования и восстановления с применением аппарата полумарковского процесса. Этап содержит: характеристику системы и проходящих в ней процессов, принимаемых для частного моделирования; формирование множества моделируемых состояний и существующих и требуемых технологических операций; построение графа системы; расчет параметров надежности методом производящих функций. Результат — графоаналитическая модель процесса функционирования и восстановления рассматриваемой системы.

3-й этап — предварительная обработка данных. Предприятия, в частности метрополитен, могут быть оснащены несколькими подсистемами мониторинга и управления от разных разработчиков, затрагивающими формирование единых требований для отчетности; разработку программного кода или ПО для проведения предварительной обработки данных и разведочного анализа данных.

4-й этап — детальный анализ диагностических данных с применением метода или алгоритма анализа, включающий в себя анализ и реализацию существующих интеллектуальных методов и алгоритмов, применение которых позволит расширить знания о процессах в системе, выявить новые закономерности при получении данных и построить прогнозы; формирование перечня предварительных сведений для поддержки принятия решения по управлению системой. По завершении этапа эксперт проводит оценку полученным результатам и имеет возможность внести корректировки.

После проведения всех четырех этапов методика завершается требуемым обоснованием на модернизацию рассматриваемой системы в части внедрения нового элемента. Обоснование включает в себя формализацию всех необходимых изменений, смоделированные процессы функционирования и восстановления системы с новым элементом по сравнению с исходной и оценку степени достижения первоначально заложенных требований при имеющихся ограничениях и ресурсах.

Заключение. В данной статье разработана методика формирования подсистемы мониторинга и управления сети электроснабжения метрополитена. Предлагаемая методика обеспечивает построение обоснованного и подтвержденного результатами моделирования решения на модернизацию. Также она позволяет обосновать необходимый состав, структуру и требования к средствам диагностики и управления. Данная методика может быть применена при разработке новых многопараметрических комплексов, при формировании обоснований на модернизацию и разделов технических требований.

Библиографический список

1. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
2. Рекомендации МСЭ-Т Y.2060 «Обзор Интернета вещей», 2012. 22 с.

3. Шакарян Ю. Г., Фортов В. Е., Бушуев В. В. и др. Концепция интеллектуальной электро-энергетической системы с активно-адаптивной сетью. М., 2012. 238 с.
4. Emmanuel M., Seah W. K. G., Rayudu R. Communication Architecture for Smart Grid Applications. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). 2018. P. 00746–00751. DOI: 10.1109/ISCC.2018.8538472.
5. Титова Т. С., Евстафьев А. М. Инновационные системы управления электрического подвижного состава // Железнодорожный транспорт: Ежемесячный научно-теоретический технико-экономический журнал. 2017. № 11. С. 54–59. ISSN 0044-4448.
6. Папуловская Н. В. Основы интернета вещей: учебно-методическое пособие. М-во науки и высшего образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. 104 с.
7. Ли П. Архитектура интернета вещей / пер. с англ. М. А. Райтмана. М.: ДМК Пресс, 2019. 454 с.
8. Антти С. Интернет вещей: видео, аудио, коммутация. М.: ДМК Пресс, 2019. 120 с.
9. Мунистер В. Д. IoT. Межмашинное взаимодействие. Программирование в компьютерных сетях. Издательство: СИ Учебно-теоретическое издание, 2020. 375 с.
10. ISO/IEC 30162. Internet of Things (IoT) — Compatibility requirements and model for devices within industrial IoT systems. 2022. P. 6.
11. ПУЭ: 7-е издание.
12. ГОСТ 32895-2014 Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения.
13. ГОСТ Р 54130-2010. Качество электрической энергии. Термины и определения.
14. Быков Е. И. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование. М.: Транспорт, 1977. 431 с.
15. Давыдова А. В., Канаев А. К. Применение обобщенной графоаналитической модели в построении полумарковской модели подсистемы мониторинга и управления системы электроснабжения метрополитена // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 16, № 4. С. 78–88. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-78-88.
16. Kanaev A. K., Davydova A. V. Empirical Mode Decomposition Method for Processing Data Monitoring of the Subway Power Supply Network. 2023 Seminar on Information Systems Theory and Practice (ISTP), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023. P. 37–41. DOI: 10.1109/ISTP60767.2023.10427026.

Дата поступления: 27.12.2023

Решение о публикации: 01.02.2024

Контактная информация

ДАВЫДОВА Анастасия Валентиновна — соискатель ученой степени канд. техн. наук; av-davydova-pgups@yandex.ru

КАНАЕВ Андрей Константинович — докт. техн. наук, профессор; kanaev@pgups.ru

Development of a methodology for forming a subsystem for monitoring and controlling the metro power supply network

A. V. Davydova, A. K. Kanaev

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

For citation: *Davydova A. V., Kanaev A. K. Development of a Methodology for Forming a Subsystem for Monitoring and Controlling the Metro Power Supply Network // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 56–64. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-56-64*

Abstract

Objective: consider the development of modern concepts of IoT and Smart grid from the point of view of effective implementation on existing production facilities, in particular, on the metro power supply network. Show the need to develop a scientific and methodological apparatus for the formation of intelligent monitoring and control subsystems, taking into account the introduction of new developments into existing complexes. Determine the features of the metro power supply network and its monitoring and control subsystems, indicating development paths taking into account existing new technologies. Develop a methodology for forming a subsystem for monitoring and managing the metro power supply network. **Methods:** analysis of structures for constructing intelligent monitoring and control subsystems according to modern concepts; analysis of existing monitoring and control subsystems of the metro power supply network. When developing the methodology, semi-Markov models are used to simulate the functioning and recovery processes, and an empirical mode decomposition method is proposed for processing monitoring data. **Results:** a methodology has been developed for forming a subsystem for monitoring and controlling the metro power supply network. A model and analytical apparatus is proposed for modeling the processes of functioning and recovery and for carrying out work with diagnostic data. A list of method parameters has been generated. **Practical importance:** the proposed methodology for forming a subsystem for monitoring and controlling the power supply network makes it possible to substantiate the necessary composition, structure and requirements for diagnostic and control tools. This methodology can be applied in the development of new multi-parameter metro complexes, in the formation of justifications for modernization and sections of technical specifications and requirements.

Keywords: metro power supply network, intelligent monitoring systems IoT and Smart grid, methodology for forming a monitoring and control subsystem, semi-Markov model, data processing, introduction of new technologies.

References

1. Kobec B. B., Volkova I. O. Innovacionnoe razvitie jelektrojenergetiki na baze koncepcii Smart Grid. M.: IAC Jenergija, 2010. 208 s. (In Russian)
2. Rekomendacii MSJe-T Y.2060 “Obzor Interneta veshhej”, 2012. 22 s. (In Russian)
3. Shakarjan Ju. G., Fortov V. E., Bushuev V. V. i dr. Koncepcija intellektual’noj jelektrojenergeticheskoj sistemy s aktivno-adaptivnoj set’ju. M., 2012. 238 s. (In Russian)
4. Emmanuel M., Seah W. K. G., Rayudu R. Communication Architecture for Smart Grid Applications. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). 2018. P. 00746–00751. DOI: 10.1109/ISCC.2018.8538472.
5. Titova T. S., Evstaf’ev A. M. Innovacionnye sistemy upravlenija jelektricheskogo podvizhnogo sostava // Zheleznodorozhnyj transport: Ezhemesjachnyj nauchno-teoreticheskij tehniko-jekonomiceskij zhurnal. 2017. № 11. S. 54–59. ISSN 0044-4448. (In Russian)

6. Papulovskaja N. V. *Osnovy interneta veshhej: uchebno-metodicheskoe posobie*. M-vo nauki i vysshego obrazovaniya RF. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2022. 104 s. (In Russian)
7. Li P. *Arhitektura interneta veshhej / per. s ang.* M. A. Rajtmana. M.: DMK Press, 2019. 454 s. (In Russian)
8. Antti S. *Internet veshhej: video, audio, kommutacija*. M.: DMK Press, 2019. 120 s. (In Russian)
9. Munister V. D. *IoT. Mezhmashinnoe vzaimodejstvie. Programmirovaniye v komp'yuternyh setjah* Izdatel'stvo: SI Uchebno-teoreticheskoe izdanie, 2020. 375 s. (In Russian)
10. ISO/IEC 30162. *Internet of Things (IoT) — Compatibility requirements and model for devices within industrial IoT systems*. 2022. P. 6.
11. PUJe: 7-e izdanie. (In Russian)
12. GOST 32895-2014 *Jelektifikacija i jelektrosnabzhenie zheleznih dorog. Terminy i opredeleniya*. (In Russian)
13. GOST R 54130-2010. *Kachestvo jelektricheskoy jenerгии. Terminy i opredeleniya*. (In Russian)
14. Bykov E. I. *Jelektrosnabzhenie metropolitenov. Ustrojstvo, jekspluatacija i proektirovanie*. M.: Transport, 1977. 431 s. (In Russian)
15. Davydova A. V., Kanaev A. K. *Primenenie obobshhennoj grafoanaliticheskoy modeli v postroenii polumarkovskoj modeli podsistemy monitoringa i upravleniya sistemy jelektrosnabzheniya metropolitena // Izv. SPbGJeTU "LJeTI"*. 2022. T. 16, № 4. S. 78–88. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-78-88. (In Russian)
16. Kanaev A. K., Davydova A. V. *Empirical Mode Decomposition Method for Processing Data Monitoring of the Subway Power Supply Network*. 2023 Seminar on Information Systems Theory and Practice (ISTP), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023. P. 37–41. DOI: 10.1109/ISTP60767.2023.10427026.

Received: 27.12.2023

Accepted: 01.02.2024

Author's information

Anastasiya V. DAVYDOVA — applicant for academic degree in engineering; av-davydova-pgups@yandex.ru

Andrey K. KANAEV — D. Sci. in Engineering, Professor; kanaev@pgups.ru

УДК 629.3.015

Использование численного моделирования при анализе аэроупругого взаимодействия подвижного состава с тоннельными сооружениями

Н. В. Богданов, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев, К. А. Сотников

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

Для цитирования: Богданов Н. В., Ватулин Я. С., Воробьев А. А., Сотников К. А. Использование численного моделирования при анализе аэроупругого взаимодействия подвижного состава с тоннельными сооружениями // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 65–73. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-65-73

Аннотация

Цель работы: исследование формирования сложной воздушной структуры в условиях движения подвижного состава по протяженным подземным сооружениям с использованием методов численного моделирования. **Методы:** проведен анализ влияния аэродинамических факторов на подвижной состав, пассажиров и железнодорожную инфраструктуру на основе метода конечных элементов и объемов. Исследованы причины возникновения уплотненной воздушной зоны, которая возникает перед головным вагоном состава и оказывает значительное сопротивление движению поезда с использованием метода Frozen Rotor. Проанализированы показатели энергоэффективности и безопасности процесса грузовых и пассажирских перевозок с учетом процессов аэродинамического взаимодействия движущегося подвижного состава и искусственных сооружений тоннельного типа. **Результаты:** с помощью численного моделирования и использования метода Frozen Rotor удалось получить качественную картину распределения поперечных вихревых потоков воздуха, возникающих вследствие возникновения вязкостного трения. Обнаружены закономерности в изменении динамики давления и скорости воздушных масс на поверхности головного обтекателя при въезде поезда в тоннель. Установлен факт негативного влияния зон повышенного и пониженного давления, а также их резкого перепада на локомотивную бригаду и пассажиров. **Практическая значимость:** показана возможность проведения исследований в области аэродинамики железнодорожного транспорта с использованием современных методов численного моделирования. Данная тематика очень актуальна в области проектирования высокоскоростного подвижного состава.

Ключевые слова: аэроупругое взаимодействие, искусственные сооружения тоннельного типа, энергоэффективность, численное моделирование, поперечные вихри, «поршневой» эффект.

Введение

В последнее время актуальным направлением в области разработки высокоскоростного подвижного состава стало преодоление аэродинамических эффектов, которые влияют на безопасность и эксплуатационные характеристики железнодорожного транспорта. Основной задачей является быстрое прохождение тоннельных сооружений. Даже на действующем подвижном составе приходится значительно снижать скорость при прохождении тоннелей. А это пря-

мым образом сказывается на пропускной способности магистралей. Проблема заключается в образовании сложной вихревой структуры воздушной массы в пространстве между корпусом поезда и обделкой тоннеля, а также в возникновении перепадов давления в области головного и хвостового вагонов состава.

Но без тоннельных сооружений в современном мире не обойтись. Быстрая доставка грузов из одной точки страны в другую — это залог надежного функционирования экономики Российской Федерации. Тоннели позволяют повысить надежность и удобство эксплуатации железной дороги. Данные сооружения повсеместно используются во всем мире [1–3].

Характеристики воздушной массы вокруг корпуса подвижного состава при его движении по тоннелю существенно отличаются от таковых при движении по открытому пространству. Из-за вязкостных свойств возникают поперечные вихри, которые блокируют свободное течение воздушных масс, приводя к возникновению уплотненной зоны перед поездом. Это, в свою очередь, повышает сопротивление движению состава, снижая эффективность его использования. Помимо всего прочего, образующиеся вихри провоцируют образование твердых частиц, взвешенных в воздухе, которые могут привести к повреждению как подвижного состава, так и элементов тоннельного сооружения [4].

Также важно учитывать взаимодействие между подвижным составом и окружающей средой, так как это может влиять на энергетический баланс. Например, при высоких скоростях движения могут возникать вихри и турбулентность, которые, в свою очередь, могут усилить потери энергии. Также известно, что форма корпуса и текстура его поверхности могут влиять на характер распределения полей давления на поверхности подвижного состава [5, 6].

Надежность функционирования порталных сооружений тоннелей является крайне важной для обеспечения безопасности движения подвижного состава. Одним из основных факторов, влияющих на аэроупругое взаимодействие между поездом и тоннелем, является скоростной напор воздушных потоков, которые вызываются движением тела поезда. Важным параметром для каждого конкретного тоннельного сооружения является коэффициент блокирования, который зависит от площади сечения и длины тоннеля.

Однако, помимо скорости инерционного наддува и коэффициента блокирования, также имеют значение и другие факторы, такие как удельное сопротивление воздушной среды, длина поезда, шероховатость стенок тоннеля и поезда, установившаяся скорость воздуха в тоннеле, а также наличие и расположение вентиляционных шахт. Все эти параметры вместе определяют характер аэроупругого взаимодействия и могут оказывать существенное влияние на безопасность движения в тоннеле.

Математическое моделирование процессов аэроупругого взаимодействия с использованием численного моделирования в комбинации с методом *Frozen Rotor*

Для решения задач, связанных с аэроупругим взаимодействием подвижного состава с тоннельными сооружениями, часто применяется математическое моделирование, основанное на методах конечных элементов и конечных объемов [7, 8].

Наиболее популярным и удобным методом, который используется при решении гидравлических задач, является метод *Frozen Rotor*. Метод изначально разрабатывался и предназначался для решения гидравлических задач, связанных с работой центробежных насосов, где в конструкции применяются такие элементы, как статор (неподвижная часть) и ротор (подвижная часть). Поэтому для решения задач, связанных с движением поезда в тоннеле, данный метод необходимо адаптировать. В роли статора принимается тоннель, а в роли ротора — поезд. Радиус окружности принимается очень большим (более 1000 км). При таких условиях в отдельно взятом отрезке времени поезд будет двигаться не по окружности, а по прямой, что будет соответствовать реальному движению. При самом моделировании поезд остается неподвижным на протяжении всего процесса. Основные силы и импульсы при таком подходе прикладываются к окружающему поезд воздушному потоку. Таким образом, удастся получить качественную картину распределения воздушных потоков вдоль всего состава [9–12].

Исследование проводилось в программном комплексе *SolidWorks* с использованием модуля *Flow Simulation*. Была разработана модель станции петербургского метрополитена «Обводный канал». В качестве подвижного состава был выбран электропоезд 81-717/714. Для повышения производительности расчетов в моделях были приняты некоторые допущения, которые не оказывают существенного влияния на результаты исследований.

Размер ячеек принят равным 0,5 м со сгущением до размера 0,25 м ближе к поверхностям объектов с использованием методов построения ориентированной сетки. Использована k - ϵ модель турбулентности.

В качестве граничных условий на торцевых сечениях тоннелей и эскалаторного наклонного хода применены следующие параметры среды: давление — 101395 Па, температура — 20 °С, начальная скорость воздушной среды — 0 м/с, кинематическая вязкость, ν , — $1,5 \cdot 10^{-5}$ (м²/с), динамическая вязкость, η , — 18,1 (мПа·с). Режим движения: торможение состава — от 80 до 0 км/ч.

Результаты исследования представлены на рис. 1–3.

На первой эпюре отчетливо видно образование вихревых структур повышенной плотности перед головным вагоном состава, а также в подвагонном и

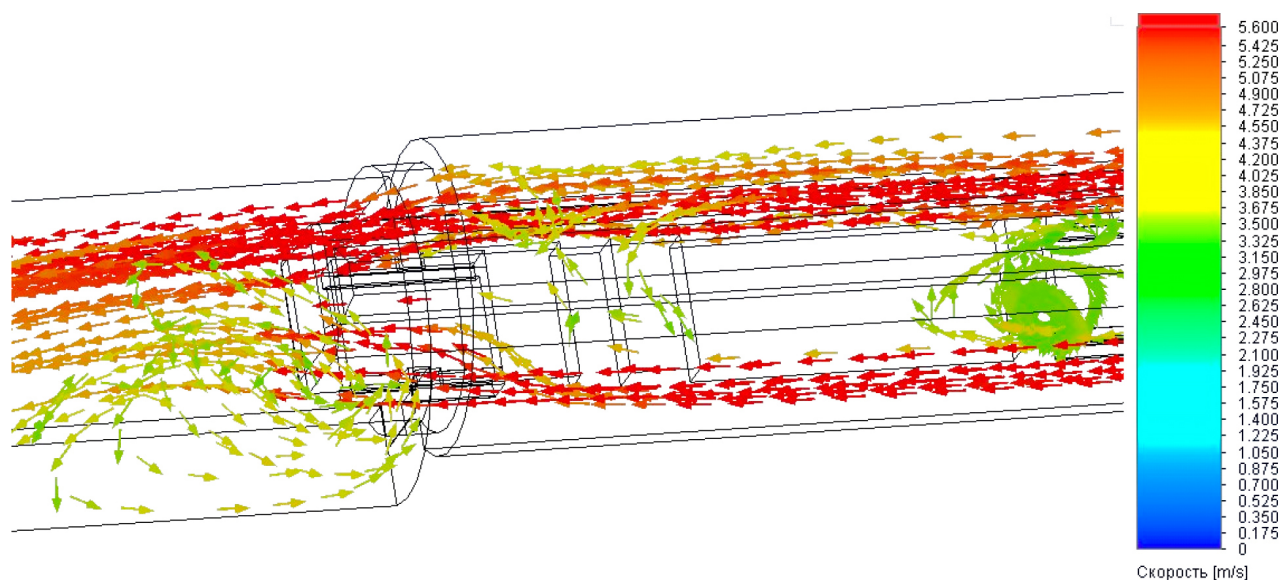


Рис. 1. Эпюра траектории движения воздушных масс в процессе образования «поршневого» эффекта

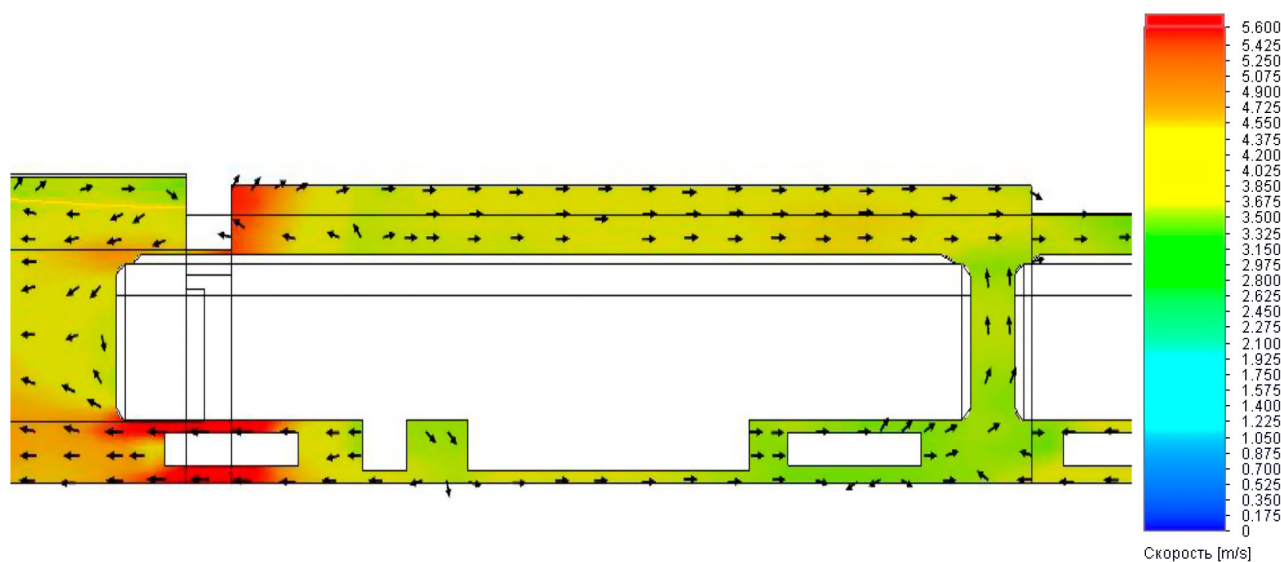
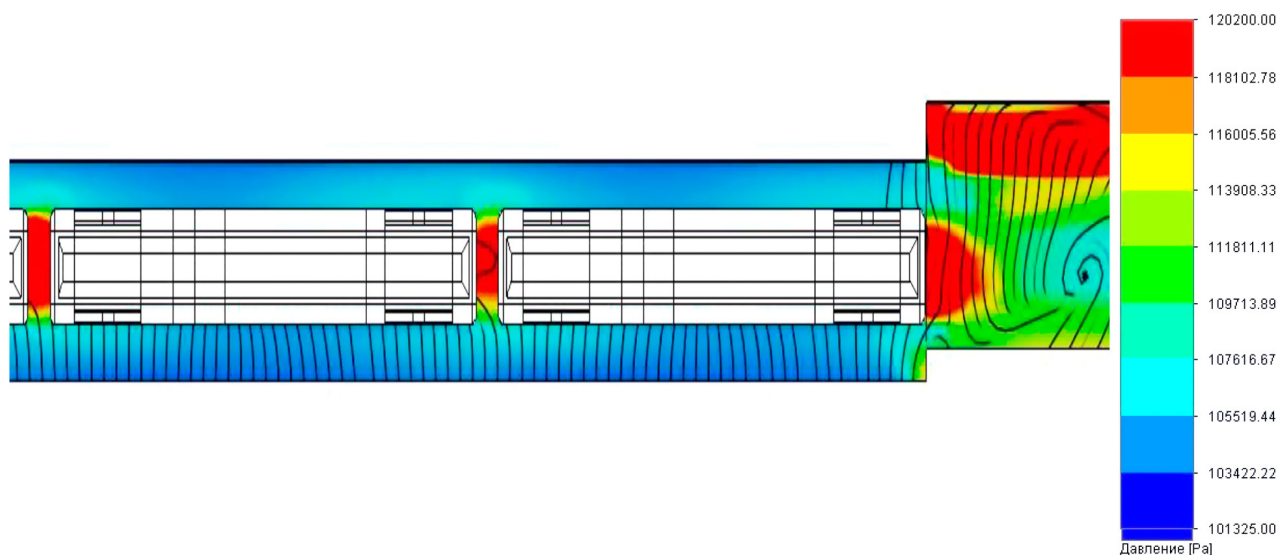


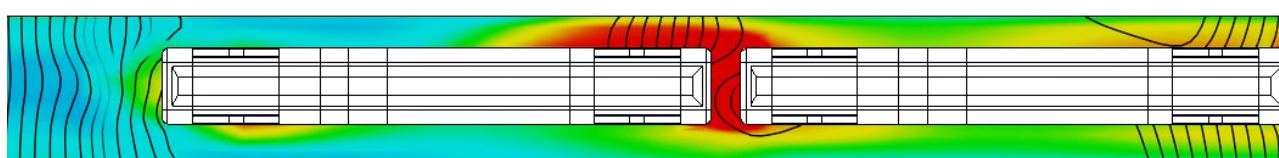
Рис. 2. Эпюра распределения скорости воздушных масс вдоль поезда (продольное сечение)

межвагонном пространствах. Это, в свою очередь, подтверждает наличие сложной воздушной структуры, которая формируется и накапливается при движении поезда в тоннеле. Образование плотных воздушных масс, которые складываются из одиночных спиралевидных вихрей, называется «поршневым» эффектом. Именно это явление вызывает основное сопротивление движению поезда и представляет наибольший интерес при изучении.

Вместе с образованием вихрей наблюдается ускоренное течение воздушных масс в пространстве между поездом и обделкой тоннеля. На рис. 1 и 2 отчетливо видна повышенная скорость в области порталной части тоннеля при прохождении поезда.



а) головная часть состава



б) хвостовая часть состава

Рис. 3. Эпюра распределения давления по длине поезда (продольное сечение)

На рис. 3 наблюдается динамическое распределение избыточного давления текучей среды в объеме тоннеля. Перед движущимся поездом образуется область повышенного давления, причем его резкий перепад наблюдается в головной части (рис. 3, а). Далее давление практически линейно снижается по направлению к хвосту состава. Вблизи него снова возникает скачок и область разрежения, давление в которой также изменяется по направлению к выходу из тоннеля (рис. 3, б).

Заключение

По результатам численного моделирования обнаружены закономерности в динамике формирования сложной структуры воздушных масс. На эпюрах (рис. 1–3) видно, что избыточное давление, а также скорость воздушных масс может изменяться в пределах одного поезда в разные моменты времени. При этом важно отметить, что головной обтекатель сталкивается с неподвижным воздухом, в то время как хвост поезда — с воздухом в движении. Это приводит к возникновению ускоренных вязких сил между обтекателем и тоннелем. Эти факторы необходимо учитывать при проектировании тоннелей под высокоскоростной подвижной состав.

Формирование турбулентных явлений в стесненных условиях движения поезда оказывает значительное влияние не только на эффективность использования подвижного состава, но и на человека. Перепады давления могут вызвать у человека сонливость или ухудшение самочувствия. Поэтому исследование аэродинамических факторов играет важную роль при проектировании высокоскоростного подвижного состава.

В целом такие исследования помогают улучшить конструкцию транспортных средств и снизить затраты на топливо. В конечном счете это способствует экономическому росту и уменьшению вредного влияния на окружающую среду. Поэтому детальные исследования в области аэродинамики транспорта являются важным шагом на пути к созданию более эффективных и экологически безопасных транспортных средств.

Библиографический список

1. О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта: технический регламент Таможенного союза от 15.07.11 с изм. на 09.12.11 (ТР ТС 002/2011) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293437> (дата обращения: 01.01.2024).

2. Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта».

3. Paradot N., Talcotte C., Willaime A., et al. Methodology for computing the flow around a high speed train for drag estimation and validation using wind tunnel experiments. World Congress on Rail Research, Tokyo. 1999.

4. Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Воробьев А. А. и др. Цифровое моделирование аэроупругого взаимодействия подвижного состава с порталными сооружениями перевальных тоннелей // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 1. С. 104–123. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123.

5. Воробьев А. А., Ватулин Я. С., Ватаев А. С. и др. К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб., 2022. № 3. С. 590–599.

6. Каримов Д. Д., Ватулин Я. С., Воробьев А. А. и др. Особенности формирования структуры воздушных масс в тоннеле при движении поезда // Транспорт БРИКС. 2023. № 2 (2). С. 1–6. DOI: 10.46684/2023.2.6

7. Богданов Н. В., Ватаев А. С., Ватулин Я. С. и др. Обзор методов CFD-моделирования аэродинамических процессов при движении подвижного состава по протяженным подземным сооружениям // Системы автоматизированного проектирования на транспорте. 2023. Ст. 28–34. DOI: 56575829.

8. Каримов Д. Д., Ватаев А. С., Метлякова и др. Использование численного моделирования при анализе аэродинамических проблем на транспорте // Транспорт БРИКС. 2023. № 2 (3). С. 1–5. DOI: 10.46684/2023.3.5/.

9. Каримов Д. Д., Воробьев А. А., Ватаев А. С. и др. Исследование поперечной устойчивости высокоскоростного подвижного состава при выходе из тоннеля // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. Вып. 2. С. 115–135.

10. Лугин И. В., Алферова Е. Л. Исследование аэродинамических процессов при движении поезда в протяженных железнодорожных тоннелях // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2018. Т. 5. С. 155–160.

11. Ледяев А. П., Кавказский В. Н., Шелгунов О. О. Математическое моделирование аэродинамических процессов в железнодорожных тоннелях на высокоскоростных магистралях // Метро и тоннели. 2021. № 3. С. 40–43.

12. Ледяев А. П., Кавказский В. Н., Креер Р. О. Особенности проектирования тоннелей на высокоскоростных магистралях // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-3-9.

Дата поступления: 27.01.2024

Решение о публикации: 01.03.2024

Контактная информация:

БОГДАНОВ Никита Вадимович — аспирант, nttk@pgups.ru

ВАТУЛИН Ян Семенович — канд. техн. наук, доцент, yan-roos@yandex.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — докт. техн. наук, доцент, nttk@pgups.ru

СОТНИКОВ Кирилл Андреевич — аспирант, k-sotnikov@yandex.ru

Use of numerical modeling in analysis of aeroelastic interaction of rolling stock with tunnel constructions

N. V. Bogdanov, Ya. S. Vatulin, A. A. Vorob'ev, K. A. Sotnikov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky av., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Bogdanov N. V., Vatulin Ya. S., Vorob'ev A. A., Sotnikov K. A.* Use of numerical modeling in analysis of aeroelastic interaction of rolling stock with tunnel constructions // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 65–73. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-65-73

Abstract

Purpose of the work: study of the formation of a complex air structure under conditions of rolling stock movement along extended underground structures using numerical modeling methods. **Methods:** an analysis of the influence of aerodynamic factors on rolling stock, passengers and railway infrastructure was carried out based on the finite element and volume method. The reasons for the occurrence of a compacted air zone, which appears in front of the head car of the train and exerts significant resistance to the movement of the train using the “Frozen Rotor” method, have been investigated. The indicators of energy efficiency and safety of the process of freight and passenger transportation are analyzed, taking into account the processes of aerodynamic interaction of moving rolling stock and artificial tunnel-type structures. **Results:** using numerical modeling and the use of the “Frozen Rotor” method, it was possible to obtain a qualitative picture of the distribution of transverse vortex air flows resulting from the occurrence of viscous friction. Regularities were discovered in the changes in the dynamics of pressure and speed of air masses on the surface of the head

fairing when a train enters a tunnel. The fact of the negative impact of zones of high and low pressure, as well as their sharp drop, on the locomotive crew and passengers has been established. **Practical significance:** the possibility of conducting research in the field of aerodynamics of railway transport using modern numerical modeling methods is shown. This topic is very relevant in the field of designing high-speed rolling stock.

Keywords: aeroelastic interaction, artificial tunnel-type structures, energy efficiency, numerical modeling, transverse vortices, “piston” effect.

References

1. O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta: tehničeskij reglament Tamozhennogo sojuza ot 15.07.11 s izm. na 09.12.11 (TR TS 002/2011) [Elektronnyj resurs]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293437> (data obrashhenija: 01.01.2024). (In Russian)
2. Tehničeskij reglament Tamozhennogo Sojuza TR TS 002/2011 “O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta”. (In Russian)
3. N. Paradot, C. Talcotte, A. Willaime, et al. Methodology for computing the flow around a high speed train for drag estimation and validation using wind tunnel experiments. World Congress on Rail Research, Tokyo. 1999.
4. Vataev A. S., Vatulin Ja. S., Vorob’ev A. A. i dr. Cifrovoe modelirovanie ajerouprugogo vzaimodejstvija podvizhnogo sostava s portal’nymi sooruzhenijami pereval’nyh tonnel’ // Bju’lleten’ rezul’tatov nauchnyh issledovanij. 2022. № 1. S. 104–123. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123. (In Russian)
5. Vorob’ev A. A., Vatulin Ja. S., Vataev A. S. i dr. K voprosu snizhenija negativnogo jeffekta vozdejstvija ajerouprugogo vzaimodejstvija vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava s jelementami tonnel’nyh sooruzhenij // Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija. SPb., 2022. № 3. S. 590–599. (In Russian)
6. Karimov D. D., Vatulin Ja. S., Vorob’ev A. A. i dr. Osobennosti formirovanija struktury vozdušnyh mass v tonnele pri dvizhenii poezda // Transport BRIKS. 2023. № 2 (2). S. 1–6. DOI: 10.46684/2023.2.6 (In Russian)
7. Bogdanov N. V., Vataev A. S., Vatulin Ja. S. i dr. Obzor metodov CFD-modelirovanija ajerodinamicheskikh processov pri dvizhenii podvizhnogo sostava po protjazhennym podzemnym sooruzhenijam // Sistemy avtomatizirovannogo proektirovanija na transporte. 2023. St. 28–34. DOI: 56575829. (In Russian)
8. Karimov D. D., Vataev A. S., Metljakova i dr. Ispol’zovanie chislennogo modelirovanija pri analize ajerodinamicheskikh problem na transporte // Transport BRIKS. 2023. № 2 (3). S. 1–5. DOI: 10.46684/2023.3.5/. (In Russian)
9. Karimov D. D., Vorob’ev A. A., Vataev A. S. i dr. Issledovanie poperečnoj ustojchivosti vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava pri vyhode iz tonnelja // Bju’lleten’ rezul’tatov nauchnyh issledovanij. 2023. Vyp. 2. S. 115–135. (In Russian)
10. Lugin I. V., Alferova E. L. Issledovanie ajerodinamicheskikh processov pri dvizhenii poezda v protjazhennyh zheleznodorozhnyh tonneljah // Interjekspo GEO-Sibir’. 2018. T. 5. S. 155–160. (In Russian)

11. Ledjaev A. P., Kavkazskij V. N., Shelgunov O. O. Matematicheskoe modelirovanie ajerodinamicheskikh processov v zheleznodorozhnyh tunneljah na vysokoskorostnyh magistraljah // Metro i tonneli. 2021. № 3. S. 40–43. 12. Ledjaev A. P., Kavkazskij V. N., Kreer R. O. Osobennosti proektirovanija tonnelej na vysokoskorostnyh magistraljah // Transport Urala. 2015. № 4 (47). S. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-3-9. (In Russian)

Received: 27.01.2024

Accepted: 01.03.2024

Author's information

Nikita V. BOGDANOV — Graduate Student, ntk@pgups.ru

Yn. S. VATULIN — Associate Professor, yan-roos@yandex.ru

Aleksander A. VOROB'EV — D. Sci. in Engineering, Associate Professor, ntk@pgups.ru

Kirill A. SOTNIKOV — Graduate Student, k-sotnikov@yandex.ru

УДК 621.316

Определение объемов полезной и избыточной рекуперативной энергии электроподвижного состава городского электротранспорта

А. В. Кацай¹, В. А. Шаряков², О. Л. Шарякова³

¹ ООО «Кинемак», Россия, 115088, Москва, Южнопортовая ул., д. 40, стр. 3

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

³ Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (ВШТЭ СПбГУПТД), Россия, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4

Для цитирования: Кацай А. В., Шаряков В. А., Шарякова О. Л. Определение объемов полезной и избыточной рекуперативной энергии электроподвижного состава городского электротранспорта // Бюллетень результатов научных исследований. СПб.: ПГУПС. 2024. — Вып. 1. — С. 74–83. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-74-83

Аннотация

Цель: рассмотреть вопрос о необходимости точно определять полный объем энергии, которую подвижной состав вырабатывает в ходе преобразования механической энергии торможения в электрическую. Показать необходимость формирования мероприятий по увеличению объемов полезной рекуперации. **Методы:** использование известных аналитических выражений и результатов заездов, полученных при эксплуатации электрического подвижного состава городского электротранспорта на маршрутах. **Результаты:** показано, что предложенная методика определения объемов полезной и избыточной рекуперативной энергии позволяет точно определить баланс энергии в контактной сети городского электротранспорта. **Практическая значимость:** показано, что объемы полезной и избыточной энергии рекуперации в значительной степени зависят от сезонных изменений мощности и продолжительности нетяговой нагрузки в контактной сети и, следовательно, от погодных условий во время работы на маршруте. Данные об объемах полезной и избыточной рекуперации создают возможность для энергетических служб транспортных предприятий вырабатывать мероприятия по экономии энергии.

Ключевые слова: контактная сеть, электроподвижной состав, городской электротранспорт, рекуперативное торможение, полезная рекуперация, избыточная рекуперация, тяговый привод.

В ходе выполнения транспортной работы электроподвижной состав (ЭПС) городского электротранспорта (ГЭТ) потребляет из контактной сети (КС) электрическую энергию на совершение полезной работы по перемещению подвижной единицы (ПЕ). При электрическом торможении тяговый электрический привод может рекуперировать (преобразовывать) механическую энергию линейного движения ПЕ в электрическую энергию и выдавать ее в КС [4]. Если в КС имеется нагрузка, то рекуперативная энергия утилизируется полезно (полезная энергия рекуперации — $E_{\text{рекПолезн}}$) на систему тяги других вагонов или на потребление нетяговых устройств (отопление, освещение, компрессор и др.). В случае если в КС отсутствует нагрузка, сопоставимая по мощности с мощностью рекуперации, то энергия рекуперации направляется на тормозной резистор тормозящего вагона. Такая энергия рекуперации называется избыточной ($E_{\text{рекИзбыт}}$). Полная энергия рекуперации вагона определяется как сумма полезной и избыточной рекуперации (1):

$$E_{\text{Рек}} = E_{\text{РекПолезн}} + E_{\text{РекИзбыт}}. \quad (1)$$

Полное потребление энергии на выполнение транспортной работы в системе энергоснабжения предприятия ГЭТ обеспечивается двумя источниками энергии — тяговой подстанцией, которая является первичным источником питания ($E_{\text{ТП}}$) и полезно рекуперирующими при торможении вагонами, которые являются вторичными источниками питания в КС ($E_{\text{РекПолезн}}$).

С учетом двух типов источников энергии уравнение баланса энергии в КС ГЭТ записывается следующим образом:

$$E_{\text{ТП}} + E_{\text{РекПолезн}} = E_{\text{Тяги}} + E_{\text{СН}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{Тяги}}$ — энергия, потребляемая тяговыми приводами ЭПС; $E_{\text{СН}}$ — энергия, потребляемая нетяговыми системами ЭПС, а также стационарными потребителями, присоединенными к КС.

Так как затраты предприятия на энергоресурсы формируются только показателем $E_{\text{ТП}}$, который определяется счетчиком тяговой подстанции (в данном случае мы рассматриваем так называемый котловый метод определения затрат на электроэнергию), то задачей ГЭТ в части снижения затрат на закупку энергии является увеличение объемов и доли $E_{\text{РекПолезн}}$, а также снижение $E_{\text{Тяги}}$ и $E_{\text{СН}}$ при достижении поставленных задач по количеству и качеству пассажироперевозок (то есть выполнения объемов транспортной работы). Причем повышение доли и объемов полезной рекуперации является наиболее эффективной мерой для повышения энергоэффективности ГЭТ. Для разработки соответствующих мероприятий требуется иметь данные по полному объему энергии рекуперации за длительные периоды наблюдения.

Существует несколько способов определения объемов энергии рекуперации в системе энергоснабжения ГЭТ. Базовые основы этих методик схожи с таковыми для расчета рекуперации в контактной сети РЖД [6], однако в системе энергоснабжения ГЭТ имеются существенные отличия от энергоснабжения РЖД, что накладывает ряд ограничений на применение в ГЭТ железнодорожной классификации методов оценки рекуперации без учета специфики городского наземного электротранспорта.

Наиболее простой способ — аналитический. Он может быть реализован, например, если ранее транспортное предприятие было оснащено ЭПС с резисторно-контакторными системами управления тяговыми двигателями, не использующими рекуперативное торможение, а после внедрения современного ЭПС, использующего транзисторные системы тягового привода, такую возможность получило. При этом вагоны не оснащены средствами учета обратной (рекуперированной) энергии, выдаваемой в КС. В таком случае при соблюдении приблизительно одинаковых

основных параметров транспортной работы (пробег вагонов за год, близкие погодные условия в рассматриваемые годы с разным подвижным составом), можно по данным внешних счетчиков тяговых подстанций сравнить эффект внедрения тяговых приводов, позволяющих выдавать в КС полезную рекуперацию. Недостатком такого подхода является то, что по показателям потребления энергии тяговой подстанции невозможно выделить, какой объем сетевой энергии потребляется на тягу и на нетяговые нужды. Большую неопределенность в аналитические результаты вносят несовпадение объемов транспортной работы за сравниваемые периоды, отличие погодных условий и другие факторы. Также таким способом невозможно определить объем энергии избыточной рекуперации.

Другим способом является учет энергии полезной рекуперации при помощи двунаправленных бортовых счетчиков энергии постоянного тока. Как правило, такие счетчики устанавливаются сразу после токоприемника. Значение прямой энергии является суммой потребления энергии на тягу и нетяговые нужды вагонов. Значение обратной энергии считают показателем полезной рекуперации. Однако это значение не является точным показателем объема полезной рекуперации, так как часть ее расходуется во внутренней сети вагона, то есть счетчиком не учитывается та часть полезной рекуперации, которая потребляется на собственные нужды вагона и на эту величину уменьшает показатель фиксируемой счетчиком полезной рекуперации. Также таким способом невозможно определить объем избыточной энергии рекуперации.

Еще один способ позволяет определять объем избыточной энергии рекуперации. Он состоит в применении бортовых или стационарных буферных накопителей энергии, которые запасают только эту избыточную рекуперацию [3]. Такие накопители энергии должны быть оборудованы счетчиками входной энергии. Однако данный способ не позволяет фиксировать потребление энергии на тягу вагонов, на собственные нужды и объемы полезной рекуперации.

Наиболее информативным для целей построения полного баланса энергии контактной сети ГЭТ является способ прямого замера потребления подвижным составом энергии на тягу, а также объемов полезной и избыточной рекуперации. Отметим, что в работе [6] о классификации методов для определения объемов рекуперации в КС ЖД отсутствует метод прямого измерения объемов избыточной энергии рекуперации и не говорится о важности нетягового энергопотребления для формирования баланса энергии в сети.

Возможность прямого замера тягового энергопотребления и разных видов рекуперации обеспечивают современные тяговые преобразователи, устанавливаемые на подвижной состав ГЭТ, позволяющие измерять потребление энергии на тягу, а также полезной и избыточной рекуперации и архивации этих значений в энергонезависимую память. Если все вагоны предприятия ГЭТ оснащены такими устройствами, то имеется реальная возможность ежедневного снятия этих

показателей, а также пробега вагонов. На основании архива таких данных баланс энергии КС ГЭТ рассчитывается достаточно просто.

На сегодняшний день в России имеется одно транспортное предприятие, ЭПС которого оснащен подобными устройствами и где производится ежедневный тотальный учет потребления энергии на тягу и полезной рекуперации вагонов (однако отсутствует возможность учета избыточной рекуперации) — концессионная транспортная система трамвая «Чижик» в Санкт-Петербурге. Также на ряде предприятий ГЭТ используются комбинации вышеперечисленных методов формирования баланса энергии в КС.

Поскольку процессы перетоков энергии в КС ГЭТ определяются количеством потребителей, координатной конфигурацией их в сети и суммарной мгновенной мощностью их нагрузки и рекуперации, которые на изолированных участках тяговой подстанции являются случайными, то, как выше было сказано, для определения объемов рекуперативной энергии наиболее подходящим является метод прямого измерения этой энергии бортовым регистрирующим устройством. Так как для таких измерений энергопотребление собственными нуждами ПЕ, которая не рекуперирует потребленную энергию, не представляет интереса, то наиболее показательным является измерение в точке питания тягового преобразователя. Измеряется прямой и обратный (рекуперативный) ток (в том числе полезный и избыточный — направляемый на тормозные резисторы), а также напряжение в КС и на звене постоянного тока инвертора. Результаты измерений фиксируются в энергонезависимой памяти и затем сгружаются на ПК оператора (табл. 1).

Измерения проводились на борту трамвайного вагона. Период регистрации — с 13:17:51 до 14:52:40, то есть в течение более полутора часов в межпиковое дневное время движения. Температура воздуха в этот день была +13 °С, без осадков, то есть системы отопления в вагонах на линии не работали, потребление собственными нуждами вагона из КС было незначительным. По маршруту движения испытательного вагона другими вагонами осуществлялась стандартная перевозочная деятельность. Фиксировались данные только одного из двух тяговых преобразователей, управляющих одинаковыми тяговыми электродвигателями вагонных тележек (рис. 1).

За время измерений одна тележка вагона потребила на тягу 13,37 кВт·ч электроэнергии (часть времени вагон провел на отстое на разворотном кольце). При этом суммарный объем полезной и избыточной рекуперации составил 6,79 кВт·ч, или 50,8% от объема потребления энергии на тягу. Другими словами, половина энергии, потребленной на тягу ЭПС, может быть возвращена на выполнение полезной работы. Часть этой энергии (две трети) в данный погодный сезон полезно утилизируется благодаря удачному совпадению одновременности наличия мощности нагрузки в сети на участках данной ТП и мощности рекуперации тормозящего вагона. Оставшаяся часть энергии рекуперации рассеивается на тормозных резисторах.

ТАБЛИЦА 1. Фрагмент записи в таблицу данных измерений

№	Время	$I_{КС}$, А	$I_{РТ}$, А	U_{DC} , В	$U_{КС}$, В	V , км/ч
2021	13:26:02.720	5,00	0,00	682,00	637,00	0,00
2022	13:26:02.971	6,00	0,00	664,00	631,00	0,00
2023	13:26:03.223	7,00	0,00	661,00	637,00	0,00
2024	13:26:03.475	6,00	0,00	660,00	637,00	0,00
2025	13:26:03.725	7,00	0,00	660,00	625,00	0,30
2026	13:26:03.976	7,00	0,00	659,00	627,00	0,60
2027	13:26:04.229	6,00	0,00	659,00	625,00	0,60
2028	13:26:04.480	7,00	0,00	660,00	632,00	0,90
2029	13:26:04.731	7,00	0,00	657,00	625,00	1,20
2030	13:26:04.983	9,00	0,00	653,00	626,00	1,50
2031	13:26:05.234	10,00	0,00	649,00	631,00	1,80
2032	13:26:05.486	11,00	0,00	646,00	626,00	2,10
2033	13:26:05.737	11,00	0,00	642,00	624,00	2,50
2034	13:26:05.988	11,00	0,00	639,00	614,00	2,80

Прим. $I_{КС}$ — ток контактной сети входной и выходной (с отрицательным значением), потребляемый/отдаваемый тяговым преобразователем, $I_{РТ}$ — ток через тормозной резистор, $U_{КС}$ — напряжение контактной сети.

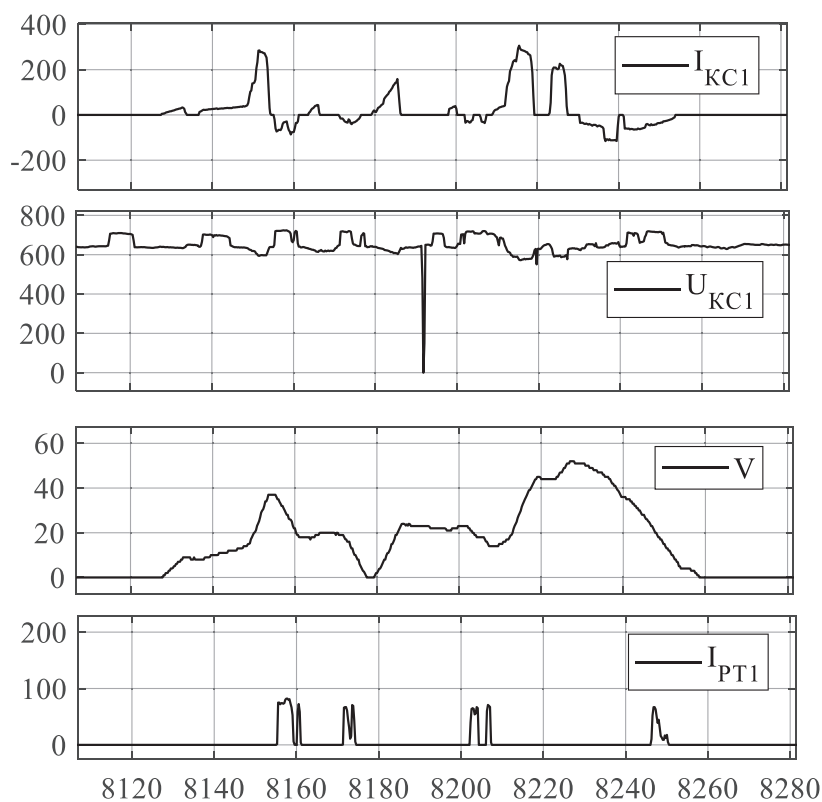


Рис. 1. Фрагмент графика измерений, зафиксированных тяговым преобразователем

В описанных условиях движения вагона объем полезной (выданной в КС на потребляющую нагрузку) энергии рекуперации составил 4,32 кВт·ч, или 32,3 % от потребленной на тягу энергии. Доля полезной рекуперации от полного объема рекуперированной энергии составила 63,6 % (почти две трети).

В описанных условиях движения вагона объем избыточной (рассеянной на тормозных резисторах) энергии рекуперации составил 2,47 кВт·ч, или 18,5 % от потребленной на тягу энергии. Доля избыточной рекуперации от полного объема рекуперированной энергии составила 36,4 % (чуть более трети).

Как уже было сказано выше, соотношение полезной и избыточной энергии рекуперативного торможения есть стохастическая величина и зависит от следующих факторов: погодные условия, которые определяют состав и мощность тяговой и нетяговой нагрузки в КС и сопротивление движению вагона, средняя маршрутная скорость движения вагона, манера вождения водителя транспортного средства, дорожная обстановка по ходу движения, электрическая ситуация в КС (наложение процессов потребления и рекуперации многих вагонов), установленные при наладке тяговых инверторов уставки отсечения энергии рекуперации на тормозные резисторы, типы и характеристики тяговых электродвигателей и некоторые др. Полученное соотношение полезной и избыточной рекуперации в межпиковое время может сильно отличаться от такового в пиковые периоды движения ЭПС. Также значительно изменяют это соотношение разные погодные условия. Например, летом объем избыточной рекуперации резко растет относительно этого значения в холодный период года, что обусловлено мощностью и длительностью нетяговой нагрузки [1].

Для выяснения зависимости полученных выше данных по рекуперации от погодных условий были взяты показатели, полученные аналогичным путем в ходе суточных измерений в зимний период. Дневная температура внешней среды была +1 °С, облачно, временами снег с дождем. Из всей совокупности архивных данных был выбран период, аналогичный по длительности в такое же межпиковое время движения. Принимались во внимание показания только одного тягового инвертора из двух.

За указанный период на тягу вагона было израсходовано 23,4 кВт·ч электроэнергии. При этом объем полезной рекуперации составил 11,67 кВт·ч, или 49,53 % от потребленной на тягу электроэнергии. Этот показатель практически полностью совпадает с «летним» соотношением полного объема энергии рекуперации к потреблению энергии на тягу (50,8 %). Объем избыточной энергии рекуперации составил 4,6 кВт·ч, или 19,64 % от потребления на тягу и 28,3 % от полного объема рекуперации. При температуре +1 °С в сравнении с летним измерением при +13 °С доля избыточной рекуперации в полном объеме рекуперации снизилась примерно на седьмую часть, а доля полезной — увеличилась примерно на одну десятую.

Отношение полного объема рекуперации к тяговому потреблению составило в указанный период измерений февраля 69,16 %.

Сравнение показателей измерения рекуперации летом и зимой позволяет заключить, что в холодное время года объем избыточной энергии рекуперации снижается. Причиной этого является значительное по времени наличие в контактной сети нетяговой нагрузки (салонные отопители, освещение и др.), которая имеет значимую с точки зрения рекуперации мощность и включена практически постоянно и которая потребляет вместе с периодически появляющейся в сети тяговой нагрузкой увеличенную долю энергии рекуперативного торможения по сравнению с летом.

Сравнение приведенных показателей рекуперации (табл. 2), с учетом внешних движению обстоятельств, дает нам следующие результаты. При снижении температуры воздуха на 12 °С увеличилась доля полного объема рекуперации (полезной и избыточной) от потребления энергии на тягу — с 50,8 до 69,16 % (более чем на треть). Этот факт, в частности, может означать следующее: при снижении температуры наружного воздуха резко снизились потери в тяговом приводе, в особенности при рекуперативных процессах. То есть уменьшились потери энергии в обмотках статоров тяговых электродвигателей, а также снизились потери при преобразованиях энергии в тяговом инверторе. А это означает, что выросла эффективность процессов рекуперации. Ведь отношение объемов рекуперации к объему потребления энергии на тягу есть фактически показатель КПД полного цикла тягового энергопотребления ЭПС за один цикл движения от трогания с остановки до следующей остановки (с учетом также механического сопротивления движению вагона).

На основании таблицы 2 построена диаграмма рисунка 2.

Еще одним источником данных об объемах полезной рекуперации служат показатели фидерных двунаправленных счетчиков энергии. Прямые перетоки энергии по фидерам показывают суммарное потребление каждого из них со сборной шины тяговой подстанции и рекуперативных перетоков, объем которых также учитывается и тяговыми инверторами. Перетекающая между фидерами рекуперация поступает по межпоездным перетокам с фидеров, на которых происходит рекуперативное торможение ПЕ, на потребляющую нагрузку на другие фидера.

ТАБЛИЦА 2. Соотношения различных видов энергии рекуперации и тягового энергопотребления в периоды измерений

	$\frac{E_{\text{РекПолезн}}}{E_{\text{Тяги}}}$	$\frac{E_{\text{РекИзбыт}}}{E_{\text{Тяги}}}$	$\frac{E_{\text{РекПолезн}}}{E_{\text{Рек}}}$	$\frac{E_{\text{РекИзбыт}}}{E_{\text{Рек}}}$	$T_{\text{Наруж}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$
сен.20	0,323	0,185	0,636	0,364	+13
фев.19	0,495	0,196	0,716	0,284	+1

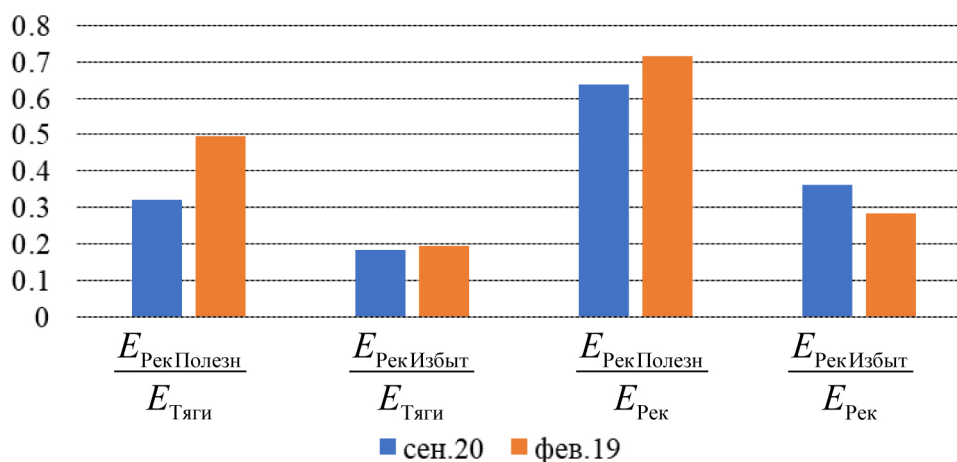


Рис. 2. Графики соотношений, приведенных в табл. 2

Учет рекуперативной энергии на борту подвижных единиц и сопоставление ее с параметрами их движения позволяет установить зависимости от других условий движения и тем самым наметить мероприятия, позволяющие снижать потребление энергии на выполнение транспортной работы, такие как оптимизация манеры вождения вагона, улучшение графика движения, внедрение буферных накопителей энергии и др., то есть уменьшить затраты предприятия ГЭТ на энергопотребление.

Выводы

Прямые инструментальные измерения расхода энергии на тягу вагонов и объемов полезной и избыточной рекуперации позволяют точно определить баланс энергии в контактной сети ГЭТ. Этот метод является наиболее информативным среди всех других способов таких измерений. Широкое распространение в настоящее время тяговых преобразователей на электрическом подвижном составе позволяет легко реализовать этот способ на предприятиях городского электротранспорта страны. Современные тяговые приводы позволяют обеспечить автоматический сбор такой информации в единую информационную сеть транспортного предприятия и в ближайшее время следует ожидать появления таких систем сбора данных с каждой единицы подвижного состава.

Объемы полезной и избыточной энергии рекуперации в значительной степени зависят от сезонных изменений мощности и продолжительности нетяговой нагрузки в КС и, следовательно, от погодных условий при выполнении транспортной работы. Данные об объемах полезной и избыточной рекуперации создают возможность для служб движения, подвижного состава и энергохозяйства транспортных предприятий вырабатывать мероприятия по экономии энергии.

Библиографический список

1. Кацай А. В., Бизяев А. А., Козаревич В. А. Сравнение параметров работы маховичного накопителя в контактной сети трамвая в холодные и теплые сезоны транспортной работы // Вестник МЭИ. 2022.
2. Шевлюгин М. В., Гречишников В. А. Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене // Мир транспорта. 2013. № 5. С. 54–58.
3. Сацук Т. П., Шаряков В. А., Шарякова О. Л. и др. О применении тяговых аккумуляторных батарей на автономных подстанциях городского электротранспорта // Электротехника. 2021. № 10. С. 32–36.
4. Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Агунов А. В. и др. Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава // Электротехника. 2018. № 10. С. 55–59.
5. Идиятуллин Р. Г., Бакиров А. Р., Баженов Н. Г. Исследование законов распределения удельного расхода электроэнергии на тягу трамваев // Проблемы энергетики. 2005. № 7–8. С. 33–38.
6. Бакланов А. А., Незевак В. Л., Шатохин А. П. Классификация методов оценки эффективности рекуперативного торможения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения: сборник научных трудов / Ростовский государственный университет путей сообщения. Ростов н/Д: РГУПС, 2016. № 1 (61). С. 26–33.

Дата поступления: 25.12.2023

Решение о публикации: 01.03.2024

Контактная информация

КАЦАЙ Александр Владимирович — канд. филос. наук, proton764@mail.ru

ШАРЯКОВ Владимир Анатольевич — канд. техн. наук, доцент, v_a_shar@mail.ru

ШАРЯКОВА Ольга Леонидовна — канд. техн. наук, доцент, o_l_shar@mail.ru

Determination of the volumes of useful and excess regenerative energy of the electric rolling stock of the urban electric transport

A. V. Katsay¹, V. A. Sharyakov², O. L. Sharyakova³

¹ ООО "Kinemak", 40, p. 3, Yuzhnoportovaya st., Moscow, 115088, Russia

² St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, 9, Moskovsky av., St. Petersburg, 190031, Russia

³ Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (HSE SPbGUPTD), 4, Ivan Chernykh st., St. Petersburg, 198095, Russia

For citation: Katsay A. V., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L. Determination of the volume of useful and excess regenerative energy of electric rolling stock of urban electric transport // Bulletin of scientific research results. St. Petersburg: PGUPS, 2024, iss. 1, pp. 74–83. DOI: 0.20295/2223-9987-2024-01-74-83

Abstract

Objective: consider the need to accurately determine the total amount of energy that a rolling stock generates during the conversion of mechanical braking energy into electrical energy. To show the need for the formation of measures to increase the volume of useful recovery. **Methods:** the use of well-known analytical expressions and the results of races obtained during the operation of electric rolling stock of urban electric transport on routes. **Results:** it is shown that the proposed method for determining the volumes of useful and excess regenerative energy allows us to accurately determine the energy balance in the contact network of urban electric transport. **Practical importance:** it is shown that the volumes of useful and excess energy recovery largely depend on seasonal changes in power and duration of non-traction load in the contact network and, consequently, on weather conditions during operation on the route. Data on the volumes of useful and excessive recovery create an opportunity for energy services of transport enterprises to develop energy saving measures.

Keywords: railway track, train-track interaction, dynamic wheel load on the rail, strength calculation of the railway track, equivalent track mass.

References

1. Katsay A. V., Bizjaev A. A., Kozarevich V. A. Sravnenie parametrov raboty mahovichnogo nakopitelja v kontaktojnij seti tramvaja v holodnyje i teplyje sezony transportnoj raboty // Vestnik MJeI. 2022. (In Russian)
2. Shevljugin M. V., Grechishnikov V. A. Jekspluatacija nakopitelja jenergii na metropolitene // Mir transporta. 2013. № 5. S. 54–58. (In Russian)
3. Sacuk T. P., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L. i dr. O primenenii tjagovyh akkumuljatornyh batarej na avtonomnyh podstancijah gorodskogo jelektrotransporta // Jelektrotehnika. 2021. № 10. S. 32–36. (In Russian)
4. Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Agunov A. V. i dr. Vozmozhnosti racional'nogo ispol'zovanija jenergii tormozhenija jelektricheskogo podvizhnogo sostava // Jelektrotehnika. 2018. № 10. S. 55–59. (In Russian)
5. Idijatullin R. G., Bakirov A. R., Bazhenov N. G. Issledovanie zakonov raspredelenija udel'nogo rashoda jelektrojenergii na tjagu tramvaev // Problemy jenergetiki. 2005. № 7–8. S. 33–38. (In Russian)
6. Baklanov A. A., Nezevak V. L., Shatohin A. P. Klassifikacija metodov ocenki jeffektivnosti rekuperativnogo tormozhenija // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija: sbornik nauchnyh trudov / Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija. Rostov n/D: RGUPS, 2016. № 1 (61). S. 26–33. (In Russian)

Received: December 25.12.2023

Accepted: December 01.03.2024

Author's information

Alexander V. KATSAY — PhD in Philosopher Sciences, proton764@mail.ru

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

УДК 629.433.2

Целесообразность применения цифровых трамваев на шинах в городах России

В. Г. Кондратенко, А. М. Будюкин, А. А. Воробьев, О. А. Ипполитов

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

Для цитирования: Кондратенко В. Г., Будюкин А. М., Воробьев А. А., Ипполитов О. А. Целесообразность применения цифровых трамваев в городах России // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 84–96. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-84-96

Аннотация

Цель: показать перспективность применения инновационного вида общественного городского транспорта — цифрового трамвая на шинах с оптическим наведением по нанесенной на дороге полосе или с использованием магнитных маркеров по трассе движения как привлекательного для пассажиров, более дешевого в обустройстве линий, а также требующего меньше времени на постройку, чем рельсовый трамвай, для городских перевозок, и позволяющего разгрузить дороги городов от автомобильных пробок и улучшить их экологию. **Методы:** проведены анализ и обобщение опыта работы новых цифровых трамваев, построенных китайской компанией CRRC, эксплуатируемых в городах Китая: Чжучжоу, Ибинь, Юнсю, Яньчэн и Шанхай, а также наиболее прогрессивных конструкций эксплуатируемого подвижного состава. **Результаты:** эксплуатация шинного трамвая выявила целый ряд проблем: появление после года эксплуатации сильной колеяности на выделенной полосе дороги, скорость движения и вместимость оказались ниже заявленных. Устройство новых линий шинного трамвая потребовало затрат на усиление проезжей части, что не предполагалось первоначально изготовителем. Не доказана возможность их применения в условиях зимнего климата на дорогах, покрытых льдом и снегом. Требуется проведение дальнейших испытаний с целью выявления и устранения возникающих недостатков. **Практическая значимость:** несмотря на ряд выявленных недоработок, целесообразно использование цифрового шинного трамвая для городов с теплым климатом, имеющих сложный рельеф и узкие улицы, в качестве транспортного средства средней вместимости, которое способно улучшить мобильность и качество жизни горожан, а также сократить негативное влияние на окружающую среду. Целесообразна его прокладка в новые строящиеся жилые районы и промзоны, а также применение для массовой подвозки пассажиров, в случае проведения каких-либо крупных разовых мероприятий: крупных выставок, форумов, Олимпийских игр, мировых чемпионатов по футболу и т. п.

Ключевые слова: чрезмерная автомобилизация в мегаполисах, сильные пробки на дорогах, загрязнение окружающей среды, цифровой трамвай на шинах, отсутствие рельсов и контактной сети, виртуальные трамвайные пути, нанесение полосы или установка магнитных маркеров по трассе движения, оптическая или магнитная система наведения, малый радиус поворота, быстрое развертывание системы.

В Китае в настоящее время из-за активного процесса урбанизации и сильного загрязнения окружающей среды существует огромный спрос на современные системы городского общественного транспорта. В транспортном потоке преобладают частные автомобили с нагрузкой 1,1 человека на транспортное средство, используемые для поездки на работу. Общественный транспорт необходим для сокращения пробок и выбросов на автомагистралях и в многолюдных городских центрах Китая. Большинство средних и малых

городов не могут позволить себе строительство метрополитена или прокладку трамвайных путей. Помимо этого, их сооружение занимает слишком много времени.

Китайская корпорация CRRC Corporation Limited (CRRC) является крупнейшим в мире производителем рельсового подвижного состава (поезда, трамваи), образована в 2015 году в результате слияния компаний CNR и CSR. Компания CRRC предложила заменить рельсы полосой, нанесенной на проезжей части, полагаясь на систему распознавания изображений на борту поезда, который будет следовать по нарисованным путям благодаря применению системы искусственного интеллекта. Разработка транспортной системы средней вместимости ART была начата еще в 2013 году. Данная система позиционируется как более дешевая альтернатива метрополитену или трамваю, а также как экологичный вид транспорта.

Прокладка километра легкорельсового транспорта обходится в 20–30 млн долл., а метрополитена — от 70–150 млн долл. Транспортное средство ART на 300 пассажиров стоит около 2,2 млн долл., а стоимость развертывания данной системы составляет порядка 7–15 млн долл. за километр.

Транспортная система Autonomous Rail Rapid Transit (ART) была разработана и изготовлена исследовательским подразделением компании CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd. (Китай). ART представляет собой многозвенное транспортное средство на шинах (безрельсовый трамвай), состоящее из отдельных фиксированных секций, соединенных шарнирными трапами, оборудованными лидарами для городских пассажирских перевозок. Впервые было представлено в городе Чжучжоу (провинция Хунань) в июне 2017 года. Система заявлена как автономная, однако работающие вагоны имеют оптическое наведение и водителя на борту. Автобусы с оптическим управлением до этого уже использовались в ряде городов Европы и Северной Америки.

Вагон ART с тремя секциями имеет длину примерно 30 м и может перевозить до 300 пассажиров, с пятью секциями рассчитан на 500 пассажиров. В 2021 году была представлена четырехсекционная конструкция на 400 пассажиров. Два транспортных средства могут тесно следовать друг за другом, не будучи механически соединенными, подобно управлению составным поездом. Весь подвижной состав ART имеет полностью низкопольную конструкцию, состоящую из пространственной рамы с панелями на болтах, чтобы выдерживать вес пассажиров. Он построен как двунаправленное транспортное средство с кабинами водителя на обоих концах, что позволяет ему двигаться в любом направлении на полной скорости.

ART оснащен различными оптическими и другими типами датчиков, которые позволяют транспортному средству автоматически следовать по маршруту, определяемому виртуальной разметкой на проезжей части. Он оборудован руле-

вым управлением, которое позволяет водителю вручную управлять транспортным средством, в том числе объезжать препятствия.

Система предупреждает о выходе из полосы движения, помогает удерживать транспортное средство на своей полосе и автоматически предупреждает, если он уходит за пределы этой полосы движения. Также система информирует о возможном столкновении и помогает водителю сохранять безопасную дистанцию с другими транспортными средствами на дороге, и, если сближение становится критичным, она оперативно сообщает об этом водителю.

Навигационное устройство, установленное на ART, анализирует дорожную обстановку на выбранном маршруте и может рекомендовать объезд, чтобы избежать пробок. Электронные зеркала заднего вида работают с дистанционно регулируемыми камерами и обеспечивают более четкое изображение, чем обычные зеркала, включая устройство автоматического затемнения для уменьшения бликов.

Транспортное средство питается от тяговых литий-титанатных батарей и может проехать 40 км на одной полной зарядке. Аккумуляторы можно заряжать через токоприемники на остановках. Время перезарядки для поездки на расстояние от 3 до 5 км составляет 30 секунд, а для поездки на 25 км — 10 минут.

Технология многоосного гидравлического рулевого управления и конструкция ходовой части, напоминающая тележку, позволяет уменьшить радиус поворота, что приближает его к рельсовому транспорту. Основные технические параметры транспортного средства системы ART приведены в таблице.

В городе Чжучжоу (провинция Хунань) была построена первая 6,5-километровая линия ART, A1, проходящая через центр города (4 станции), которая начала свою работу в мае 2018 года. Транспортное средство, курсирующее по виртуальным путям в Чжучжоу, имеет длину 32 м, состоит из трех секций, каждая секция имеет длину около 10,5 м, в которой может разместиться около 100 пассажиров (полная вместимость поезда — 300 человек), а минимальный радиус поворота составляет всего 15 м. Он может двигаться со скоростью до 70 км/ч. В марте 2021 года была открыта вторая линия, A2, длиной 7,1 км (8 станций).

Аналогичная система была открыта в городе Ибинь (провинция Сычуань) (декабрь 2019 года) — линия Yibin ART T1, общая протяженность которой составляет 17,7 км (16 станций). Среднесуточный пассажиропоток на его первом участке составил более 10 000 человек, а после соединения со станцией Yibin West высокоскоростной железной дороги Чэнду — Гуйчжоу он должен превысить 25 000 человек.

Данные линии находятся в коммерческой эксплуатации. В городах Китая Юнсю (с 2019 года, 4 станции), Яньчэн (с 2021 года, 17 станций) данные системы находятся пока в опытной эксплуатации.

ТАБЛИЦА. Данные об изготовителе и технические характеристики автономного скоростного безрельсового транспорта системы ART

Наименование показателя	Значение
Производитель	CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd. (Китай)
Система наведения	Транспортное средство с оптическим наведением по линии, нанесенной на проезжей части
Построен	2017 год (опытный экземпляр)
Поступил в эксплуатацию	Дата открытия первой линии: 2018 год, Чжучжоу (провинция Хунань)
Технические характеристики	
Конструкция кузова транспортного средства	Пространственная рама с панелями на болтах
Длина поезда, м	3-звенный вагон: 31,64
Ширина кузова, м	2,65
Высота, м	3,4
Высота пола, мм	330
Заявленная максимальная скорость, км/ч	70
Источник питания	Литий-титанатные батареи
Ведущие колеса	Резиновые колеса на пластиковом сердечнике
Ходовая часть	Секции двухосные, многоосная система рулевого управления
Минимальный радиус поворота, м	15
Вместимость поезда, пассажиров	170–307 в 3-секционный вагон 278–500 в 5-секционный вагон
Максимальное расстояние, проходимое поездом при полной зарядке	40 км
Время зарядки	– 30 секунд на расстояние от 3–5 км – 10 минут на 25 км
Минимальная ширина полосы движения, м	3,83
Срок службы по кузову, лет	25

Достоинства новой транспортной системы ART (по информации изготовителя):

– отсутствие рельсов и контактной сети, что существенно сокращает сроки ее постройки;

– применение системы оптического наведения — датчики на каждой колесной паре распознают полосу движения и автоматически направляют транспортное средство по нанесенной на дороге специальной разметке. Искусственный интеллект лежит в основе системы распознавания изображений;

– технология многоосного гидравлического рулевого управления и колесная формула, аналогичная тележке. Водителю ART на поворотах не нужно выкручивать исходя из опыта, как это приходится делать на автобусе. Радиус поворота не зависит от длины транспортного средства и составляет всего 15 м, как и у рельсового трамвая. Такое техническое решение позволяет строить и эксплуатировать данное транспортное средство любой длины;

– представляет собой электрическое транспортное средство с питанием от суперконденсаторных батарей, которые установлены на крыше и заряжаются через токоприемник только на станциях, на которых есть зарядные устройства. 10-минутная зарядка позволяет проехать расстояние до 25 км;

– подвижной состав на резиновых колесах может преодолевать уклоны до 9 %, в то время как легкорельсовый транспорт только 4–6 %, такие колеса также обеспечивают лучшую тягу и ускорение (особенно на уклоне);

– безрельсовый трамвай выполнен модульным (многозвенным, со сквозным проходом), и вагоны (секции) можно добавлять или убирать (2–5 секций), что позволяет изменять его вместимость в зависимости от размера потока пассажиров;

– транспортное средство имеет 100%-ный низкий пол, высота которого над уровнем дорожного покрытия составляет 330 мм;

– современный дизайн нового транспортного средства и невысокая стоимость развертывания системы делают его привлекательным для реализации;

– транспортное средство стоит примерно столько же, сколько и автобус, но более надежен и вместителен.

В настоящее время система виртуального железнодорожного транспорта в Китае работает в Чжучжоу (провинция Хунань), Юнсю (провинция Джайникс) и Ибине (провинция Сычуань).

Данной системой заинтересовались и за границами Китая. Новый поезд ART предполагалось использовать в г. Доха (Катар) на чемпионате мира 2022 года, где он показал хорошие результаты на испытаниях в жаркую погоду в июле 2019 года.

В Малайзии (г. Саравак) приняли решение о постройке системы автономного шинного транспорта (ART) для улучшения общественного транспорта в Большом Кучинге и предполагаются работы по ее строительству. Город Киберджайя станет вторым в Малайзии, где будет тестироваться подвижной состав системы ART.

Также был разработан и построен прототип системы ART с применением водородных элементов, испытания которого успешно прошли в Чжучжоу (Китай) и продолжились летом 2023 года уже в Малайзии для г. Саравак. Прототип водородного поезда ART имеет длину 30,2 м, ширину 2,65 м и высоту 3,7 метра. Он может развивать скорость до 70 км/ч, имеет измененную компоновку сидений и вмещает 241 человека.

Более 100 городов по всему миру проявили интерес к данной системе виртуального железнодорожного транспорта и уже обсудили сотрудничество.

Помимо данной шинной транспортной системы, в Китае разработана и построена альтернативная система от компании CRRC в Шанхае с использованием новой системы управления iDRT.

Компания Shanghai Electric Automation Group, которая входит в состав Shanghai Electric Group Company Limited, разработала первую в Китае новую ин-

теллектуальную систему дистанционного управления железнодорожным транспортом iDRT для безрельсового трамвая с резиновыми колесными шинами. Это первая в Китае интеллектуальная цифровая железнодорожная транспортная система управления положением транспортного средства средней вместимости в режиме реального времени и направлением резиновых шин по трассе движения трамвая, использующая магнитные маркеры в качестве виртуальных трамвайных путей и требующая применения современных методов управления трамвайным движением.

В Шанхае, в новом районе Линган, экспериментальной зоне свободной торговли построена демонстрационная линия T1 общей протяженностью 21,75 км с девятью остановками. Эта линия проходит от станции Дишуйху линии метро 16, через основную городскую зону нового района, университетский город Колледж-таун и международный логистический парк, поселок Лучаоган, промышленную зону тяжелого оборудования и поселок Ничэн. При этом нет необходимости прокладывать рельсы по земле, что значительно снижает эксплуатационные расходы городского транспорта и не влияет на проезд других транспортных средств.

Построенный для линии T1 вагон от компании Digital-Rail Rapid Transit CRRC Puzhen (DRT) представляет собой гибрид (аккумуляторы, водород), имеет внешний вид, схожий с автобусом, на нем установлены датчики для сбора информации с магнитных маркеров на дорожном полотне. Каждый трамвай DRT состоит из трех звеньев, имеет длину 30,5 м, развивает максимальную скорость 70 км/ч, имеет вместимость 302 пассажира.

Он представляет собой восьмиосный, полностью электрический вагон с двойным сочленением для движения в обоих направлениях.

Одним из строителей демонстрационной линии T1 являлась компания Automation Group — дочерняя компания Shanghai Electric Group, которая оборудовала первой в Китае системой iDRT трамваи DRT средней вместимости.

Также компания Automation Group провела поставку, установку и отладку электромеханических систем, таких как цифровой рельс, система управления движением поездов, специализированная беспроводная связь и специализированная магистральная связь для трамваев, система интеллектуальных платформ и центра управления.

Специалисты из CRRC утверждают, что система DRT имеет много преимуществ перед транспортной системой ART, построенной в городе Чжучжоу.

Подвижной состав линии DRT оборудован датчиками под транспортным средством для ведения по магнитным стержням, установленным на поверхности дороги, что помогает определять положение транспортного средства в режиме реального времени и контролировать направление колес. Транспортное средство способно регулировать свою скорость, объезжать препятствия и выполнять другие операции для обеспечения безопасности, независимо от погодных

условий. Водитель получает исчерпывающую информацию о заданной скорости, остановках и отклонениях пути. Возможно использование этой системы на демонстрационных линиях с автоматическим вождением.

Новая линия имеет короткий период строительства, занимает меньшую площадь поверхности дорожного полотна, обеспечивает значительную экономию энергии и сокращение вредных выбросов. Благодаря сочетанию низкой стоимости и применению гибких технологий эта новая транспортная система может работать с использованием существующих в городах дорог, что делает ее весьма привлекательным выбором для городского транспорта. Для строительства 1 км демонстрационной линии системы DRT потребовалось примерно на 50% меньше инвестиций, чем для прокладки обычного рельсового трамвая, что способствовало созданию в новом районе Линган зеленой, интеллектуальной и интегрированной обширной транспортной экосистемы.

В Шанхае 1 февраля 2021 года в новом районе Линган официально началась пробная эксплуатация демонстрационной линии T1 шанхайской пилотной зоны свободной торговли. Компания Shanghai Electric Powers провела пробную эксплуатацию первого в Китае цифрового безрельсового трамвая, оснащенного системой iDRT.

Демонстрационная линия T1, включающая в себя 9 остановок, оборудованных зарядными устройствами, полностью планировалось завершить к концу 2021 года. На первом этапе эксплуатации эта линия начала работу на аккумуляторной тяге, пока строятся водородные заправочные станции, с последующим полным переходом на водородное топливо. Зарядка батарей осуществляется через пантографы в специально отведенных местах на остановках.

Производитель утверждает, что системы DRT являются оптимальным выбором для городского транспорта средней вместимости.

Транспортная система DRT линии T2. Транспортная система средней вместимости, работающая на водородных топливных элементах в новом районе Линган нового района Пудун в Шанхае, на востоке Китая, была запущена в декабре 2022 года.

Линия T2 имеет протяженность 8,7 км: от станции Дишуйху до станции Шуйхуалу, с девятью станциями между ними. Когда линия T2 будет полностью введена в эксплуатацию, будет сформирована общая сеть с линией T1.

Достоинства транспортного средства DRT линии T2 Lingang:

– подвижной состав линии T2 имеет измененный внешний вид обтекаемой формы и усовершенствованную конструкцию;

– конструкция кабины водителя существенно улучшена, усовершенствован дизайн консоли панели управления, что значительно повысило удобство вождения. Использована технология объединения нескольких экранов, чтобы не отвлекать внимание водителя от управления;

– основными цветами салона выбраны синий и белый, что вызывает у пассажиров ощущение жизненной силы и бодрости. Форма средней панели крыши транспортного средства обладает хорошей технологичностью;

– применена технология виртуального наведения подвижного состава с магнитным датчиком в качестве основного и оптического наведения как дополнение. Трамвай может реализовывать уровень автономного вождения GoA2 для железнодорожного транспорта или уровень вождения L2 для автомобиля;

– применена гибридная система питания: на водородном топливе и от суперконденсаторов, для обеспечения нулевого уровня выбросов при работе транспортного средства;

– усовершенствованная технология рулевого управления всеми колесами используется для повышения способности DRT проходить повороты. В сочетании с технологией виртуального наведения это значительно снижает стоимость пробега при той же пассажировместимости;

– применены передовые технологии, такие как определение расстояния между транспортными средствами, контроль угла поворота колес, определение давления в шинах, защита от радаров, панорамный объемный обзор, что обеспечивает эффективное управление транспортным средством и безопасность эксплуатации;

– кузов выполнен из экологически чистого углеродного волокна в целях совершенствования конструкции и снижения его веса.

В Шанхае запланирована постройка 105-километровой сети DRT средней пропускной способности в районе Лингана, которая будет включать в себя 6 линий, для обеспечения удобного транспортного обслуживания жителей. На сегодняшний день на дорогах Шанхая уже работают порядка 66 водородных автобусов.

Результаты эксплуатации шинных трамвайных систем в Китае выявили ряд присущих им недостатков:

– системы не автономны;

– системы не имеют рельсов и обладают ходовыми качествами автобуса;

– работают от батареи (водородного топливного элемента), не имеют постоянного питания от воздушного провода, что делает их менее эффективными, склонными к сбоям в работе, и ограничивает их пробег;

– имеют колеса с резиновыми шинами и поэтому требуют еще большего обслуживания, поскольку резиновые шины изнашиваются быстрее, чем колеса обычных трамвайных поездов, а также менее энергоэффективны;

– быстрое изнашивание дорожного покрытия и возникновение колеиности из-за многократного движения тяжелых колес по одним и тем же участкам дороги, что приводит к дискомфорту для пассажиров и повреждению транспортного средства;

– для обеспечения плавного хода, уровня комфорта для пассажиров характерного для легкорельсового транспорта, а также долгосрочной экономии инфра-

структуры, требуется аналогичный уровень первоначальных инвестиций в укрепление проезжей части наряду со всеми сопутствующими затратами времени;

- из-за отсутствия рельсов и контактной сети происходит экономия при строительстве, но при эксплуатации требуется гораздо больше затрат энергии для движения поезда, потому что резиновые колеса движутся по асфальту. Трамвай может двигаться гораздо эффективнее на обычных путях из-за трения металла о металл;

- необходима выделенная полоса для движения, чтобы безрельсовый трамвай не стоял в пробках, иначе это не скоростной транспорт;

- для безопасности в случае возникновения чрезвычайной ситуации или аварии за пультом управления должен находиться оператор;

- поскольку это запатентованная технология, необходимые транспортные средства не могут быть приобретены на конкурсной основе.

В ряде публикаций за 2018 год учеными в области устойчивого развития утверждается, что безрельсовые трамваи могут заменить как рельсовый транспорт, так и скоростной автобус из-за низкой стоимости и малых сроков строительства, а также низкого уровня выбросов. Но целый ряд других ученых оспаривают подобные утверждения.

На самом деле транспортные системы ART и DRT компании CRRC представляют собой новую технологию, которая в настоящее время имеет очень ограниченное применение и в эксплуатации находится менее 50 км маршрута. Эти маршруты уже продемонстрировали недостатки технологии, в том числе выявленные проблемы с колеиностью на проезжей части и максимальные скорости движения оказались значительно ниже заявленных 70 км/ч (50 км/ч в Чжучжоу и 55 км/ч в Ибине).

К январю 2020 года колеиность на первой коммерчески действующей линии безрельсового трамвая в китайском городе Чжучжоу была настолько серьезной, что оптическая система наведения больше не могла стыковаться со станциями, что сделало линию плохо функционирующей всего через год после ввода в эксплуатацию.

Специалистами в 2021 году на трассе в Чжучжоу был обнаружен значительный износ дорог из-за эксплуатации безрельсового трамвая, что опровергает заявления производителя о малых сроках строительства и низких капитальных затратах. При этом исследователи пришли к заключению, что полоса дороги для движения поезда требует значительного усиления.

Для запуска безрельсового трамвая, вероятно, потребуются существенный уровень первоначальных инвестиций в укрепление проезжей части наряду со всеми сопутствующими затратами времени и финансов. Самая сложная часть строительства любой рельсовой системы — это перемещение важных инженерных коммуникаций из коридора прокладки будущей трассы, что необходимо делать и при постройке шинного трамвая.

Также оказалось, что безрельсовые трамваи имеют меньшую вместимость, чем заявлено. При расчете вместимости производитель считал, что плотность стоячих мест составляет восемь пассажиров на 1 м², тогда как многие системы общественного транспорта имеют плотность мест для проезда стоя, составляющую четыре пассажира на 1 м². Исходя из этого, 32-метровый ART более реалистично вмещает 170 пассажиров, а не заявленные 307. Сочлененные автобусы при той же плотности пассажиров вмещают около 150 пассажиров и меньше по сравнению с типичным вагоном трамвая (LRV) длиной 33 м, который вмещает 210–225 пассажиров.

Много вопросов вызывает и надежность работы подвижного состава с оптическим наведением. Автобусы с оптическим управлением существуют с начала XXI века, но с трудом эксплуатируются из-за наличия на проезжей части пыли, листьев, тумана и суровых погодных условий, ограничивающих практическую функциональность системы.

Вызывает сомнение и утверждение, что безрельсовые трамваи дешевле, чем традиционный скоростной автобусный транспорт. Также до сих пор не доказана пригодность системы для работы в условиях зимнего климата на дорогах, покрытых льдом и снегом.

Могут ли действительно безрельсовые шинные трамваи в городах заменить рельсовый трамвай? На современном этапе пока нет. Таким образом, в настоящее время безрельсовые трамваи – это, скорее всего, перспективная технология, многие предполагаемые преимущества которой еще предстоит адекватно продемонстрировать в реальном мире.

Несмотря на ряд выявленных недоработок, все же целесообразно использование цифрового шинного трамвая (систем ART и DRT) для городов с теплым климатом, имеющих сложный рельеф и узкие улицы, в качестве транспортного средства средней вместимости. Он способен реально быстро улучшить мобильность и качество жизни горожан, а также сократить негативное влияние на окружающую среду. Целесообразна быстрая прокладка линий цифровых шинных трамваев в новые жилые кварталы или промзоны, а также для массовой подвозки пассажиров, в случае проведения каких-либо крупных разовых мероприятий: крупных выставок, форумов, Олимпийских игр, мировых чемпионатов по футболу и т. п.

Библиографический список

1. Киселев И. П. История скоростных сухопутных нетрадиционных видов пассажирского транспорта // История науки и техники. 2006. № 8. С. 2–12.
2. Киселев И. П. Развитие классификаций транспортных систем в СССР и России. Специфика колеевого (направляемого) транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2010. Вып. 4 (25). С. 168–178.

3. Фортунатов В. В. История мировых цивилизаций. СПб.: Питер, 2012. 560 с.
4. Голубев А. А., Киселев И. П., Голубев В. И. и др. История транспорта: учеб. пособие; под ред. В. В. Фортунатова. СПб.: ПГУПС, 2013. 134 с.
5. Воробьев А. А., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г. Перспективы применения направляемого легкого транспорта в российских городах // Транспорт Российской Федерации. 2022. № 3 (100). С. 40–43.
6. Современные трамваи: сочлененные, низкопольные, вместительные // «Грузовик Пресс». 2013. № 9. С. 64–66.
7. Воробьев А. А., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г. Анализ современных технических решений, применяемых в конструкции низкопольных трамвайных вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18. № 1. С. 1–15.
8. Городской транспорт. URL: trsnfoto.ru (дата обращения: 04.02.2023).
9. Быльцева В. Д., Будюкин А. М., Пакулина Е. В. Совершенствование конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте железнодорожного подвижного состава: сб. трудов Национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ПГУПС, 2020. С. 44–50.
10. Кондратенко В. Г., Воробьев А. А., Будюкин А. М. и др. Эволюция конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2020. Т. 17, вып. 1. С. 62–67.

Контактная информация:

БУДЮКИН Алексей Митрофанович — канд. техн. наук, доцент; ktexmet@yandex.ru

КОНДРАТЕНКО Владимир Григорьевич — канд. техн. наук, доцент; ktexmet@yandex.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — докт. техн. наук, профессор; nttk@pgups.ru

ИППОЛИТОВ Олег Александрович — аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; nttk@pgups.ru

Дата поступления: 26.01.2024

Решение о публикации: 29.02.2024

The feedability of using digital trams on tires in russian cities

V.G. Kondratenko, A.M. Budyukin, A.A. Vorob'ev, Ippolitov O.A.

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

For citation: *Kondratenko V. G. Budyukin A. M., Vorob'ev A. A., Ippolitov O. A. The feedability of using digital trams on tires in russian cities // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 84–96. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-84-96*

Abstract

Objective: show the prospects of using an innovative type of public urban transport - a digital tram on tires with optical guidance along a strip marked on the road or using magnetic markers along the route, as attractive to passengers, cheaper in the arrangement of lines, as well as requiring less time to build than rail tram for urban transportation, allowing to relieve city roads from traffic jams and improve their ecology. **Methods:** an analysis and generalization of the operating experience of new digital trams built by the Chinese company CRRC, operated in the cities of China: Zhuzhou, Yibin, Yongxiu, Yancheng and Shanghai, as well as the most advanced designs of the operating rolling stock. **Results:** the operation of the tire tram revealed a number of problems: after a year of operation, severe rutting appeared on a dedicated lane of the road, speeds and capacity were lower than declared. The construction of new tire tram lines required costs for strengthening the roadway, which was not originally intended by the manufacturer. The possibility of their use in winter climate conditions on roads covered with ice and snow has not been proven. Further testing is required to identify and eliminate emerging deficiencies. **Practical significance:** despite a number of identified shortcomings, it is advisable to use a digital tire tram for cities with a warm climate, with complex terrain and narrow streets as a medium-capacity vehicle that can improve the mobility and quality of life of citizens, as well as reduce the negative impact on the environment. It is advisable to lay it in new residential areas and industrial zones under construction, as well as to use it for mass transportation of passengers in the event of any major one-time events: major exhibitions, forums, Olympic Games, world football championships, etc.

Keywords: excessive motorization in megacities, heavy traffic jams, environmental pollution, digital tram on tires, lack of rails and overhead lines, virtual tram tracks, striping or installing magnetic markers along the route, optical or magnetic guidance system, small turning radius, rapid system deployment.

References

1. Kiselev I. P. Istoriya skorostnyh suhoputnyh netradicionnyh vidov passazhirskogo transporta // Istoriya nauki i tekhniki. 2006. № 8. S. 2–12. (In Russian)
2. Kiselev I. P. Razvitie klassifikacij transportnyh sistem v SSSR i Rossii. Specifika kolejnogo (napravlyаемого) transporta // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. SPb.: PGUPS, 2010. Vyp. 4 (25). S. 168–178. (In Russian)
3. Fortunatov V. V. Istoriya mirovyh civilizacij. SPb.: Piter, 2012. 560 s.
4. Golubev A. A., Kiselev I. P., Golubev V. I. i dr. Istoriya transporta: ucheb. posobie; pod red. Fortunatova V. V. SPb.: PGUPS, 2013. 134 s. (In Russian)
5. Vorob'ev A. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Perspektivy primeneniya napravlyаемого legkogo transporta v rossijskih gorodah // Transport Rossijskoj Federacii. 2022. № 3 (100). S. 40–43.
6. Sovremennye tramvai: sochlenennye, nizkopol'nye, vmestitel'nye // Gruzovik Press, 2013. № 9. S. 64–66. (In Russian)
7. Vorob'ev A. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Analiz sovremennyh tekhnicheskikh reshenij, primenyaemyh v konstrukcii nizkopol'nyh tramvajnyh vagonov // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2021. T. 18. № 1. S. 1–15. (In Russian)
8. Gorodskoj transport. URL: trsnfoto.ru (data obrashcheniya: 04.02.2023). (In Russian)
9. Byl'ceva V. D., Budyukin A. M., Pakulina E. V. Sovershenstvovanie konstrukcii podvizhnogo sostava legkorel'sovogo transporta v Sankt-Peterburge // Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri

remonte zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: sb. trudov nacional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchenykh. SPb.: PGUPS, 2020. S. 44–50. (In Russian)

10. Kondratenko V. G., Vorob'ev A. A., Budyukin A. M. i dr. Evolyuciya konstrukcii podvizhnogo sostava legkorel'sovogo transporta v Sankt-Peterburge // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. SPb.: PGUPS. 2020. T. 17. (In Russian)

Received: 26.01.2024

Accepted: 29.02.2024

Author's information :

Alexey M. BUDYUKIN — PhD Sci. in Engineering, Associate Professor; ktexmet@yandex.ru

Vladimir G. KONDRATENKO — PhD Sci. in Engineering, Associate Professor; ktexmet@yandex.ru

Alexander A. VOROBYOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; nttk@pgups.ru

Oleg A. IPPOLITOV – graduate student of the department “Land transport and technological complexes”; nttk@pgups.ru

УДК 338.47

Управление дистрибуцией межрегиональных цепей поставок в рамках взаимодействия с технологиями искусственного интеллекта

Т. Н. Кошелева¹, Т. Ю. Ксенофонтова², О. А. Гуляева²

¹ ЧОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. А. А. Новикова», Россия, 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38

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

Для цитирования: Кошелева Т. Н., Ксенофонтова Т. Ю., Гуляева О. А. Управление дистрибуцией межрегиональных цепей поставок в рамках взаимодействия с технологиями искусственного интеллекта // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. — Вып. 1. — С. 97–106. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-97-106

Аннотация

Цель: в статье авторы раскрывают новые подходы к управлению логистическими цепями поставок в рамках шестого технологического уклада: представлены основные структурные элементы современной инфраструктуры управления логистическими потоками, включающей производственный комплекс, оборудованный промышленными специализированными 3D-принтерами; складской комплекс в регионах, приближенных к сырьевым источникам и к регионам наибольших объемов заказов; инфраструктура логистических региональных систем дистрибуции, включая транспортную составляющую в рамках всех видов транспорта, в том числе и беспилотный транспорт. **Методы:** предложен авторский взгляд на объекты управления, модели управления потоками поставок в рамках формирования новой межрегиональной пространственной инфраструктуры; выявлены особенности управления цепями поставок в рамках добавления элементов технологий удаленной и виртуальной реальности; сформулирован авторский подход к трактовке понятия «управление цепями поставок» в рамках формирования расширенной системы данных и упорядоченного пространства с целью организации межрегиональных складов с возможностью их дублирования в регионе осуществления заказа. **Результаты:** авторами разработан алгоритм функционирования модели управления потоками в рамках логистической системной платформы и новой пространственной инфраструктуры с использованием промышленных специализированных 3D-принтеров под контролем технологий искусственного интеллекта, позволяющих воспроизводить в регионе осуществления заказа необходимые товары. **Практическая значимость:** в статье раскрыты принципы реализации процесса управления логистическими потоками; предложены подходы к классификации видов дистрибуции от точки расположения источников сырья в рамках процессов производства товаров и нематериальной доставки грузов до позиции расположения потребителей; рассмотрены перспективы развития глобальных цепей поставок на примере конкретного макрорегиона — Узбекистана.

Ключевые слова: управление логистическими цепями поставок, удаленная и виртуальная реальность, пространственная инфраструктура.

Введение

Глобализация деловых операций и расширение международной торговли привели к необходимости создания более эффективных цепей поставок. Под управлением цепями поставок в традиционном смысле многие исследователи

подразумевают область управленческой деятельности, координирующую и интегрирующую логистические бизнес-процессы в целях снижения суммарных логистических издержек. Ряд исследователей придерживается мнения о том, что управление цепями поставок представляет собой экономически, организационно и технологически выстроенную последовательность участников и контрагентов цепи поставок [9].

На сегодняшний момент времени цепи поставок классифицируются в первую очередь с позиции морфологической типологии с использованием эмпирического метода исследования: по охвату участников (глобальные, страновые, региональные), по отраслевому маркеру взаимодействующих участников (отраслевые, межотраслевые).

Целесообразно выделить еще один часто используемый критерий типологии, которым выступает вид дистрибуции. Здесь Дж. Р. Сток и Д. М. Ламберт [12] предложили классификацию типов дистрибуции в зависимости от силы воздействия на рынок, от уровня потребностей и от инструментария продвижения товаров на рынке.

Отметим, что с позиции типологии развития цепочки поставок можно классифицировать: с точки зрения уровня сложности (простая или прямая, многоэлементная или расширенная и неограниченная в элементах или максимально допустимая), с точки зрения уровня взаимодействия (регионально и вертикально взаимодействующие на основе физического перемещения грузов), с точки зрения включения удаленных уровней цепочек поставок (часть взаимодействия — финансовая, подбор ассортимента, упаковка, отправка и т. д. управляется в удаленном формате) [8].

При этом объектами управления цепями поставок (в том числе в рамках включения удаленных уровней цепочек поставок) в плоскости глобализации логистических цепочек и снятия ограничений в области коммуникационного взаимодействия между контрагентами выступают в настоящее время модели управления потоками межрегиональной пространственной инфраструктуры с добавлением элементов виртуальной логистической цепи. И особенностями управления цепями поставок в рамках добавления элементов удаленной и виртуальной реальности здесь являются одновременное использование возможностей реального рынка и виртуальной реальности, а также возможностей технологий искусственного интеллекта [3].

Таким образом, авторы в настоящей статье представляют систему основных структурных элементов новой современной модели управления логистическими потоками: производственный комплекс, оборудованный промышленными специализированными 3D-принтерами; складской комплекс в регионах, приближенных к сырьевым источникам и к регионам наибольших объемов заказов; инфраструктура логистических региональных систем дистрибуции, включая

транспортную составляющую в рамках всех видов транспорта, в том числе и беспилотный транспорт.

При этом необходимо разработать и внедрить адаптивные подходы к классификации видов дистрибуции от точки расположения источников сырья в рамках процессов производства товаров с использованием промышленных специализированных 3D-принтеров до позиции расположения потребителей [1].

Среди прочих инструментов управления логистическими потоками можно назвать широкое использование компаниями транспортно-логистического сектора экономики платформ совместной работы для управления цепью поставок за счет использования облачных приложений и платформ социальных сетей для обмена информацией и координации деятельности по всей цепи поставок. Таким образом, эффективность глобальных цепей поставок повышается за счет сотрудничества и интеграции между компаниями в цепях поставок [6].

Отметим, что основными принципами взаимодействия транспортно-логистических компаний в рамках использования вышеназванного инструментария совместного управления глобальными логистическими потоками должны быть принципы оперативного планирования, коммуникационных взаимосвязей и взаимодействия партнеров и контрагентов, своевременного технического обновления программного обеспечения, эффективности функционирования модели управления логистическими региональными потоками, простоты управления и взаимодействия с технологиями искусственного интеллекта [2].

Данные и методы

Управление цепями поставок является важнейшим фактором глобализации бизнес-операций и имеет важное значение для компаний, функционирующих в нескольких странах, транспортной отрасли регионов и стран. Преимущества использования вышеназванных подходов и принципов в системе управления глобальными цепями поставок (от точки происхождения товара до конечного потребителя) включают повышение эффективности, гибкости, адаптивности, повышения уровня цифровизации и снижение затрат [4].

Рассмотрим ниже основные направления развития глобальных цепей поставок на примере конкретной страны — Узбекистана.

Узбекистан занимает значимое место в глобальных цепях поставок, особенно в связи с его значительным экспортом ряда товаров и услуг. Это подразумевает не только экономическую роль страны в международной торговле, но и различные расходы, связанные с этой деятельностью. Важные точки роли Узбекистана в глобальных цепях поставок. Одной из основных отраслей экономики Узбекистана является производство текстиля и одежды. Страна является одним из крупнейших производителей хлопка в мире, а также

имеет сильное производство шелковых тканей. Многие международные компании в текстильной и модной индустрии обращаются к Узбекистану в поисках поставок материалов и готовой продукции [7].

1. Хлопковая промышленность. Узбекистан является одним из крупнейших производителей хлопка в мире. Он экспортирует свои хлопковые продукты во многие страны, включая Китай, Турцию, Бангладеш и др. Хлопок из Узбекистана используется в текстильной промышленности для производства одежды, текстильных изделий и мебели.

2. Узбекистан также является крупным производителем нефти и газа. Страна имеет свои собственные нефтяные и газовые месторождения, а также транзитные маршруты, которые играют важную роль в глобальных поставках энергоносителей. Многие международные энергетические компании инвестируют в нефтегазовую инфраструктуру Узбекистана и ведут сотрудничество с местными производителями.

Узбекистан также становится все более привлекательной страной для инвестиций в производство автомобилей и комплектующих. Многие автокомпании из Китая, Йемена и Южной Кореи уже расширили свои бизнесы в Узбекистане и начали производство автомобилей на местных предприятиях. Это создает новые возможности для поставщиков комплектующих и других компаний, связанных с автоиндустрией.

Кроме того, Узбекистан играет важную роль в транспортных маршрутах, связывающих Азию и Европу. Страна имеет развитую логистическую инфраструктуру, включая железные дороги, порты и аэропорты, которые обеспечивают гладкую транспортировку товаров через регион. Многие грузовые компании и логистические операторы используют Узбекистан как ключевой транзитный пункт для своих глобальных поставок.

3. Экспорт сельскохозяйственных продуктов. Узбекистан также является крупным поставщиком сельскохозяйственных продуктов: фрукты, овощи, зерновые и другие продукты питания. Это требует расходов на производство, сбор урожая, обработку, хранение, логистику и доставку продукции на международный рынок.

4. Щепа и бумага. Узбекистан является важным экспортером древесной щепы и целлюлозы. Его продукция находит спрос в различных отраслях, включая строительство, упаковку и производство бумаги. Это позволяет Узбекистану участвовать в глобальных цепях поставок этих товаров.

5. Пищевая промышленность. Узбекистан является крупным производителем и экспортером сельскохозяйственной продукции, включая фрукты и овощи, хлебные и мучные изделия, какао, чай и прочую пищевую продукцию. Его продукция экспортируется во многие страны мира и участвует в глобальных цепях поставок пищевых товаров.

6. Шелковая промышленность. Узбекистан также известен своим производством шелка. Шелк из Узбекистана экспортируется в различные страны мира и используется в текстильной промышленности для производства одежды, аксессуаров и домашнего текстиля. Узбекистан играет активную роль в глобальных цепях поставок этих отраслей, обеспечивая необходимые товары и сырье для других стран, а также участвуя в их обработке и производстве.

7. Текстильная промышленность. Узбекистан также является крупным производителем и экспортером текстильных изделий. Он экспортирует одежду, ткани и текстильные изделия в различные страны. Узбекские текстильные товары, такие как хлопковые изделия и шелковые изделия, пользуются спросом на международном рынке и используются в различных отраслях моды и дизайна.

8. Автомобильная промышленность. Узбекистан развивает собственную автомобильную промышленность, производя автомобили и автозапчасти для внутреннего и международного рынка. Разработка и поддержка автомобильной промышленности также связаны со значительными инвестиционными расходами на технологическое обновление, обучение кадров, маркетинг и экспорт.

9. Рудные и драгоценные металлы. Узбекистан является крупным производителем ряда рудных и драгоценных металлов, включая золото, серебро, медь и уран. Страна активно развивает свои рудники и занимает значительное место в международной торговле этими металлами. Узбекистан также работает над увеличением своей доли в глобальных цепях поставок металлических изделий и компонентов.

Результаты

Все вышеперечисленное говорит о том, что Узбекистан активно развивает свою промышленность и экспортные возможности, что способствует расширяющемуся участию в глобальных цепях поставок в рамках перемещения продуктов различных отраслей. Представим ниже результаты проведенного анализа количества включений транспортно-логистических компаний — резидентов Узбекистана в состав участников глобальной логистической цепи при международных перевозках грузов за последние три года (рис. 1) [10]:

Таким образом, можно сделать вывод, что транспортно-логистические компании Узбекистана активно включены в систему глобальных транспортных цепей. При этом анализ показал, что Узбекистан в рамках системы управления глобальными цепями поставок начинает на практике включаться в цепи с внедряемым инструментарием расширения системы данных и упорядоченности пространства в рамках создания логистической системной платформы и новой пространственной инфраструктуры с использованием промышленных специализированных 3D-принтеров под контролем технологий искусственного интеллекта, позволя-

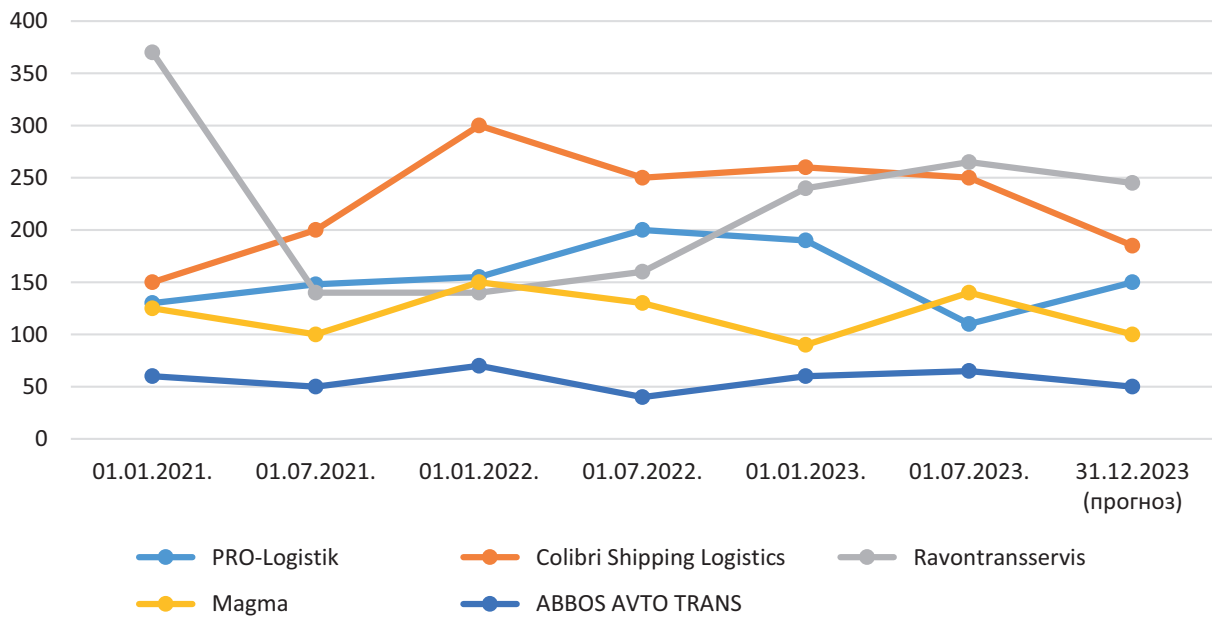


Рисунок 1. Количество включений транспортно-логистических компаний — резидентов Узбекистана в состав участников глобальной логистической цепи при международных перевозках грузов, раз

ющих воспроизводить в регионе осуществления заказа ряд товаров, «печатая» их на месте получения потребителем, не прибегая к физическому перемещению данного груза по логистической цепи. С этой целью в Узбекистане и в прилегающих регионах организуется система межрегиональных складов с возможностью их дублирования в регионе осуществления заказа. При этом и подходы к дистрибуции товаров тоже необходимо адаптировать под новые технологии использования промышленных специализированных 3D-принтеров в месте дислокации потребителей. Все перечисленное способствует развитию экономики страны и способствует более широкой интеграции страны в мировую экономику.

Заключение

Таким образом, в рамках настоящей статьи авторы сформировали свой взгляд на этапы моделирования процессов управления потоками поставок в рамках формирования новой пространственной инфраструктуры с добавлением элементов виртуальной логистической цепи, под которыми предложено понимать, кроме традиционных, и нематериальные потоки виртуального взаимодействия с использованием промышленных специализированных 3D-принтеров и встраивание в логистические модели поставок нового элемента в виде искусственного интеллекта [5].

В статье показано, что управление цепями поставок с применением современных цифровых технологий дополненной реальности и искусственного интеллекта предоставляет транспортно-логистическим компаниям ряд преимуществ

для развития логистики в рамках шестого технологического уклада, включая возможность координации деятельности нескольких партнеров по цепи поставок, возможность оптимизировать ресурсы по всей цепочке поставок и адаптации в рамках глобальной нестабильности и экономических ограничений.

Библиографический список

1. Аверин К. Л. Подходы к адаптации инструментов управления производственными системами / К. Л. Аверин, Т. Н. Кошелева / В сборнике: Теория и практика управления предпринимательскими структурами в современных условиях. Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции; под общ. ред. В. А. Мордовца. СПб., 2023. С. 120–125.

2. Воронов А. А. Маркетинговое и стратегическое позиционирование предприятий гражданской авиации на межрегиональных рынках / А. А. Воронов, Я. М. Далингер, Т. Н. Ксенофонтова и др. Воронеж, 2022. 104 с.

3. Грозовская Е. В. Методические подходы к ускорению цифровых изменений и внедрению технологий искусственного интеллекта в процессе сервисного обслуживания в транспортной сфере / Е. В. Грозовская, Т. Н. Кошелева // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Т. 13, № 9. С. 3381–3396.

4. Грозовская Е. В. Система ресурсосбережения в деятельности сервисных организаций в транспортной сфере / Е. В. Грозовская, Т. Н. Кошелева // Экономика, предпринимательство и право. 2022. Т. 12, № 7. С. 1887–1900.

5. Коклева Н. Е. К вопросу о применении инновационных технологий в сфере оказания транспортных услуг в условиях цифровой экономики / Н. Е. Коклева, Т. Ю. Ксенофонтова, Т. Н. Кошелева / В сборнике: Современная экономика: глобальные тренды и приоритеты устойчивого развития. Сборник научных трудов Национальной научно-практической конференции; под общ. ред. Т. П. Сацук, Н. В. Дедюхиной. СПб., 2022. С. 85–89.

6. Кошелева Т. Н. Методические аспекты моделирования уровней готовности сервисных компаний транспортной сферы к оказанию услуг в цифровой среде / Т. Н. Кошелева, Т. Ю. Ксенофонтова // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2022. № 10. С. 258–260.

7. Методы стратегического анализа в железнодорожном комплексе: монография / А. Н. Мардас, О. А. Гуляева, Н. К. Румянцев, и др. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2013. 136 с. SBN 978-5-7641-0538-3. EDN THIMOT.

8. Мардас А. Н. Стратегический менеджмент: Учебник и практикум / А. Н. Мардас, О. А. Гуляева, И. Г. Кадиев. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2016. 205 с. (Бакалавр. Академический курс). ISBN 978-5-9916-8415-6. EDN XMUWDT.

9. Рылин С. И. Теоретические аспекты формирования стратегии устойчивого развития предприятия с учетом применения элементов маркетинга / С. И. Рылин, Т. Н. Кошелева / В сбор-

нике: Теоретические и прикладные вопросы экономики, управления и образования. Сборник статей IV Международной научно-практической конференции; под науч. ред. Б. Н. Герасимова. Пенза, 2023. С. 337–341.

10. Рылин С. И. Подходы к формированию устойчивого развития производственной системы / С. И. Рылин, Т. Н. Кошелева / В сборнике: Теория и практика управления предпринимательскими структурами в современных условиях. Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции; под общ. ред. В. А. Мордовца. СПб., 2023. С. 399–404.

Дата поступления: 20.01.2024

Решение о публикации: 03.03.2024

Контактная информация:

КОШЕЛЕВА Татьяна Николаевна — докт. экон. наук, доцент, oai10a@mail.ru

КСЕНОФОНТОВА Татьяна Юрьевна — докт. экон. наук, профессор, oai10a@mail.ru

ГУЛЯЕВА Ольга Анатольевна — канд. техн. наук, доцент, oai10a@mail.ru

Interregional supply chain distribution management in the framework of interaction with artificial intelligence technologies

T. N. Kosheleva¹, T. Yu. Ksenofontova², O. A. Gulyaeva²

¹ St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Air Marshal A. A. Novikov, 38, Pilotov st., St. Petersburg, 196210, Russia

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky av., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Kosheleva T. N., Ksenofontova T. Yu., Gulyaeva O. A.* Distribution Management of Interregional Supply Chains in the Framework of Interaction with Artificial Intelligence Technologies // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 97–106. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-97-106

Abstract

Target: in the article, the authors reveal new approaches to managing logistics supply chains within the framework of the sixth technological order: the main structural elements of a modern infrastructure for managing logistics flows are presented, including a production complex equipped with industrial specialized 3D printers; warehouse complex in regions close to sources of raw materials and to regions of the largest volumes of orders; infrastructure of logistics regional distribution systems, including the transport component within all types of transport, including unmanned vehicles. **Methods:** the author's view on management objects, supply flow management models within the framework of the formation of a new interregional spatial infrastructure is proposed; identified features of supply chain management within the framework of adding elements of remote and virtual reality technologies; the author's approach to the interpretation of the concept of "supply chain management" is formulated within the framework of the formation of an expanded

data system and ordered space with the aim of organizing interregional warehouses with the possibility of duplicating them in the region where the order is placed. **Results:** the authors have developed an algorithm for the functioning of a flow management model within the framework of a logistics system platform and a new spatial infrastructure using industrial specialized 3D printers under the control of artificial intelligence technologies, which make it possible to reproduce the necessary goods in the region where the order is made. **Practical significance:** in addition, the article reveals the principles of implementing the process of managing logistics flows; approaches to the classification of distribution types from the location of sources of raw materials within the processes of production of goods and intangible delivery of goods to the location of consumers are proposed; The prospects for the development of global supply chains are discussed using the example of a specific macroregion — Uzbekistan.

Keywords: logistics supply chain management, remote and virtual reality, spatial infrastructure.

References

1. Averin K. L. Podhody k adaptacii instrumentov upravlenija proizvodstvennymi sistemami / K. L. Averin, T. N. Kosheleva / V sbornike: Teorija i praktika upravlenija predprinimatel'skimi strukturami v sovremennyh uslovijah. Sbornik nauchnyh trudov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii; pod obshh. red. V. A. Mordovca. SPb., 2023. S. 120–125. (In Russian)
2. Voronov A. A. Marketingovoe i strategicheskoe pozicionirovanie predpriyatij grazhdanskoj aviacii na mezhregional'nyh rynkah / A. A. Voronov, Ja. M. Dalinger, T. N. Ksenofontova i dr. Voronezh, 2022. 104 s. (In Russian)
3. Grozovskaja E. V. Metodicheskie podhody k uskoreniju cifrovych izmenenij i vnedreniju tehnologij iskusstvennogo intellekta v processe servisnogo obsluzhivaniya v transportnoj sfere / E. V. Grozovskaja, T. N. Kosheleva // Jekonomika, predprinimatel'stvo i pravo. 2023. T. 13, № 9. S. 3381–3396. (In Russian)
4. Grozovskaja E. V. Sistema resursosberezhenija v dejatel'nosti servisnyh organizacij v transportnoj sfere / E. V. Grozovskaja, T. N. Kosheleva // Jekonomika, predprinimatel'stvo i pravo. 2022. T. 12, № 7. S. 1887–1900. (In Russian)
5. Kokleva N. E. K voprosu o primenении innovacionnyh tehnologij v sfere okazaniya transportnyh uslug v uslovijah cifrovoj jekonomiki / N. E. Kokleva, T. Ju. Ksenofontova, T. N. Kosheleva / V sbornike: Sovremennaja jekonomika: global'nye trendy i priority ustojchivogo razvitija. Sbornik nauchnyh trudov Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii; pod obshh. red. T. P. Sacuk, N. V. Dedjuhinoj. SPb., 2022. S. 85–89. (In Russian)
6. Kosheleva T. N. Metodicheskie aspekty modelirovaniya urovnej gotovnosti servisnyh kompanij transportnoj sfery k okazaniyu uslug v cifrovoj srede / T. N. Kosheleva, T. Ju. Ksenofontova // Gumanitarnye, social'no-jekonomicheskie i obshhestvennye nauki. 2022. № 10. S. 258–260. (In Russian)
7. Metody strategicheskogo analiza v zheleznodorozhnom komplekse: monografija / A. N. Mardas, O. A. Guljaeva, N. K. Rumjancev, i dr. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija Imperatora Aleksandra I, 2013. 136 s. SBN 978-5-7641-0538-3. EDN THIMOT. (In Russian)
8. Mardas A. N. Strategicheskij menedzhment: Uchebnik i praktikum / A. N. Mardas, O. A. Guljaeva, I. G. Kadiev. 2-e izd., ispr. i dop. M.: Jurajt, 2016. 205 s. (Bakalavr. Akademicheskij kurs). ISBN 978-5-9916-8415-6. EDN XMUWDT. (In Russian)

9. Rylin S. I. Teoreticheskie aspekty formirovaniya strategii ustojchivogo razvitija predpriyatija s uchetom primeneniya jelementov marketinga / S. I. Rylin, T. N. Kosheleva / V sbornike: Teoreticheskie i prikladnye voprosy jekonomiki, upravlenija i obrazovanija. Sbornik statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii; pod nauch. red. B. N. Gerasimova. Penza, 2023. S. 337–341. (In Russian)

10. Rylin S. I. Podhody k formirovaniju ustojchivogo razvitija proizvodstvennoj sistemy / S. I. Rylin, T. N. Kosheleva / V sbornike: Teorija i praktika upravlenija predprinimatel'skimi strukturami v sovremennyh uslovijah. Sbornik nauchnyh trudov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii; pod obshh. red. V. A. Mordovca. SPb., 2023. S. 399–404. (In Russian)

Received: 20.01.2024

Accepted: 03.03.2024

Author's information:

Tatyana N. KOSHELEVA — Dr. Sci. in Economics, Associate Professor, oaioa@mail.ru

Tatyana Yu. KSENOFONTOVA — Dr. Sci. in Economics, Professor, oaioa@mail.ru

Olga A. GULYAEVA — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, oaioa@mail.ru

УДК 656.021.5

Особенности использования big data при исследовании грузопотоков на железнодорожном транспорте

Ф. А. Ярмолинский¹, О. Д. Покровская¹, Е. Д. Пасечник¹, Е. В. Пакулина¹,
А. А. Трапезников²

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

² Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений ВА МТО им. генерала армии А. В. Хрулёва

Для цитирования: Ярмолинский Ф. А., Покровская О. Д., Пасечник Е. Д. и др. Особенности использования big data при исследовании грузопотоков на железнодорожном транспорте // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 107–122. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-107-122

Аннотация

Цель: охарактеризовать особенности и перспективы использования инструментария и технологий больших данных в управлении перевозочным процессом на железных дорогах. **Методы:** нейросетевое моделирование, системный анализ, прогнозирование, программирование, большие данные, предиктивная аналитика. **Результаты:** предложена даталогическая модель сущностей для хранения актуальных данных по грузопотокам, предложена структура построения системы для накопления информации. Кроме того, в работе изучаются прикладные вопросы решения проблем хранения, получения и обработки данных при использовании методов big data. **Практическая значимость:** улучшение процесса управления процессами перевозок на железнодорожном транспорте в условиях цифровой трансформации в части получения более точных прогнозов.

Ключевые слова: big data, грузопотоки, предиктивная аналитика, цифровизация, прогноз, нейросетевая модель.

Введение

Структура железнодорожного транспорта России отражает масштабность и сложность непрерывно обрабатываемых данных в управлении процессами перевозок. Структура же и количество сведений по информационным объектам могут значительно отличаться, но при этом дополнять друг друга по различным запросам [1, 2].

Процесс обработки и накопления данных ведется непрерывно из различных источников. В рамках анализа грузоперевозок наиболее интересны данные по таким информационным объектам, как:

- сети различных полигонов РЖД со станциями, участками;
- подъездные пути предприятий и сами предприятия;
- поезда, вагоны, контейнеры и грузы [3].

При исследовании информационного пространства, работающего в экосистеме «Российских железных дорог», в частности в условиях множества инфор-

мационных систем (ИС), предлагается унифицированный источник информирования, содержащий объем сведений, достаточный для аналитики [4]. В этом случае все данные по различным информационным объектам (вагон, контейнер и др.) будут накапливаться в АСОУП (Автоматизированная система оперативного управления перевозками), которая содержит:

- 1) поездную модель, которая хранит сведения по поездам, состояние, направление;
- 2) вагонную модель, которая хранит сведения по вагонам, их состоянию;
- 3) контейнерную и локомотивную модели;
- 4) отправочную (идентификатор отправки);
- 5) НСИ (нормативно-справочная информация);
- 6) заявки (номер ГУ-12, поступают из ИС «Этран»).

При этом каждая из отмеченных выше функциональных моделей может накапливать исторические сведения по движению и состоянию, а также содержать оперативные сведения по текущему положению. АСОУП является основной схемой по наполнению данными множества систем, таких как «Сириус», «Оскар-М» и другие [5, 6].

Автоматизированная система располагает сведениями огромного объема данных. Информационный комплекс систем, включающий АС, представляет собой хранилище данных, которое можно отнести к традиционным структурам big data, для чего необходимо подробнее рассмотреть структуру АСОУП.

Большой поток информации, которая наполняет ИС, содержит всю актуальную информацию об объектах на полигоне дорог РЖД, включая подход со смеж-



Рис. 1. Структурная схема АСОУП

ных дорог. Хронологически эта информация накапливается в исторических хранилищах. Каждая модель представлена множеством таблиц по ее деятельности. АСОУП представлена огромным количеством выходных справок и документов и отображена на рис. 1.

Объем накопленных данных в информационных источниках непрерывно увеличивается, архитектура взаимодействия постоянно расширяется и видоизменяется, что существенно усложняет ее структуру, ресурсоемкость и требует оптимизации уже функционирующих модульных структур для хранения и обработки больших данных [7].

Динамические процессы на полигонах железных дорог могут быть изучены и проанализированы по различным критериям. Большой объем информации позволяет моделировать процессы, нетипичные в рамках изучаемой модели, для поиска наилучшего решения, а также изучать накопленные данные посредством человеко-машинных систем для прогнозной аналитики [8].

Наиболее интересная информация для прогнозной аналитики грузопотоков представлена в вагонной модели АСОУП и выражена следующими сведениями: станция операции; нахождение на станции/в поезде; номер поезда и вагона в составе поезда; положение на станции; дислокация вагона; сведения по направлению, станции формирования и сортировки в пути следования; эксплуатационные данные и состояние, включая пробеги (текущие и плановые), вид плановых ремонтов, дату последнего ремонта, срок службы и т. д. Однако система оперативного управления представляет собой лишь объемное хранилище информации, данные из которого можно получать, запрашивая различные справочные сведения.

Для визуализации и анализа, понятного человеку-оператору (лицу, принимающему решение), необходимо структурировать огромный объем информации с целью получения сведений, пригодных для аналитики.

Рассмотрим перспективы применения методов big data для аналитики процессов грузоперевозки [9].

Ключевая сложность связана со скоростью получения и обработки данных, их большим количеством. Пользователям и технологам важно оперативно получать информацию, которая может храниться в различных источниках, аккумулируя сведения в единый ответ. Помимо оперативной обработки, существует проблема стремительного увеличения объема данных, связанного с ростом цифровизации и развитием технологий [10].

Программный комплекс ОАО «РЖД» включает в себя большой набор информационных систем (ИС), хранение и структура данных в которых отличаются. Обработка огромных массивов данных остается непрерывным процессом, что также накладывает ограничения на системы передачи данных. В связи с этим остается проблема задержек в ответах и превышающей норму нагрузки на сеть.

Разнообразие данных может привести к отсутствию прямой связи между системами по одинаковым объектам [3, 11].

Таким образом, необходимо иметь гибкую модель для передачи данных и унифицированную структуру для их хранения и обработки. На оперативность работы могут повлиять архитектура передачи данных, их объем и структура, а на минимизацию роста данных — структуризация информации, отсеивающая ложные и неструктурные сведения, что также может снизить вероятность дублирования.

Обсуждение результатов

Возможным решением предлагается выбор модели для накопления сведений для последующей аналитики. Потребность в унификации и консолидации данных приводит к необходимости создания единого хранилища данных, которое сможет накапливать и обрабатывать информацию различного формата, описывая разного рода семантические правила, применение которых направлено на формализацию данных. При этом реализация единой формализации имеет ряд проблем и ограничений, которые обусловлены различными правилами хранения и наполнения данных в ИС, разнородными структурами и набором уникальных полей в системах, связь между которыми не всегда очевидно прослеживается, что может приводить к неоднозначному толкованию информации [12]. Помимо этого, огромные объемы проводимых операций при грузообороте лишь усложняют процесс обработки.

Важно отметить, что структура хранилища не должна быть абстрактна, но должна иметь модель, которая может быть описана графически, математически и формальным языком. При этом единое хранилище не должно являться результатом интеграции различных ИС и БД, а быть результатом их агрегации.

Единое хранилище данных реализуется исключительно с применением методов и технологий больших данных (big data) — это особый формат структуры данных, функционал которой обеспечивает параллельность многих вычислений для обработки различного типа данных с применением параллельного программирования. Данные, обрабатываемые методами big data, могут быть структурированы, частично структурированы по определенным критериям или не структурированы. Применение методов и средств больших данных позволяет увеличить техническую и экономическую эффективность, влиять на безопасность движения посредством поддержки в принятии технологических решений [13, 14].

Главные возможности big data выражаются тремя характеристиками модели 3V: volume (величина физического объема хранилища), velocity (скорость обработки, накопления и получения данных), variety (многообразие обработки различных структур данных) [9].

Для понимания перспективы применения методов больших данных необходимо выделить следующие сведения, интересующие для анализа события в рамках осуществления грузоперевозок: различные форс-мажоры, бросания (причины, сроки простоя), анализ причин несвоевременной доставки (срыв сроков доставки, величина срыва), дробление отправок, анализ потоков, стабильности перевозок по различным направлениям, исполнение плановых заявок, наличие окон и предупреждений, выполнение плана формирования, прогнозы грузопотоков по заявкам перевозок.

Модель обмена информацией между информационными источниками, описанными ранее, дана на рис. 2.

Модель, хранящая информацию по грузовым операциям, взаимодействует с поездной моделью, которая может обмениваться информацией с вагонной, контейнерной и локомотивной моделями. При этом ключом прямой связи между сущностями является номер вагона, представленный в каждой из них. Для наглядного понимания схемы передачи данных была построена даталогическая модель хранения данных, отражающая взаимосвязь между всеми сущностями и набором полей данных (рис. 3).

Описание сущностей таблиц представлено в табл. 1.

Модель заявок предназначена для хранения информации по полученным заявкам. Отправочная модель содержит информацию по накладным на осуществление грузоперевозок, вагонная модель хранит сведения по всем вагонам, модель картотеки содержит расширенную информацию по вагонам, их истории пробега и т. д. Остальные модели хранят информацию по доставленным грузам, способу доставки, колесным парам, ремонтам и т. д. [15].

Таким образом, все модели образуют единую систему хранения больших данных, состоящую из сущностей, каждая из которых должна включать номер вагона. В рамках данной статьи предлагается в качестве унифицированной модели принимать рейс вагона, включая все операции на пути следования, станции, время прибытия, отправления и т. д. Более подробно рейс может быть описан в отправочной

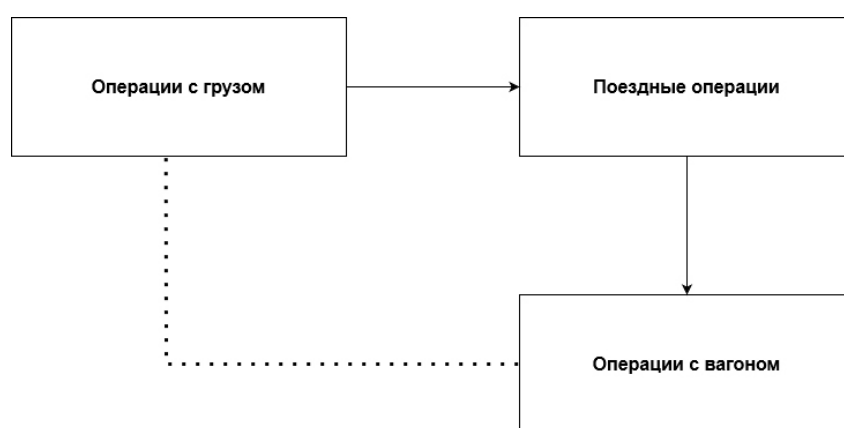


Рис. 2. Модель пооперационного информационного обмена

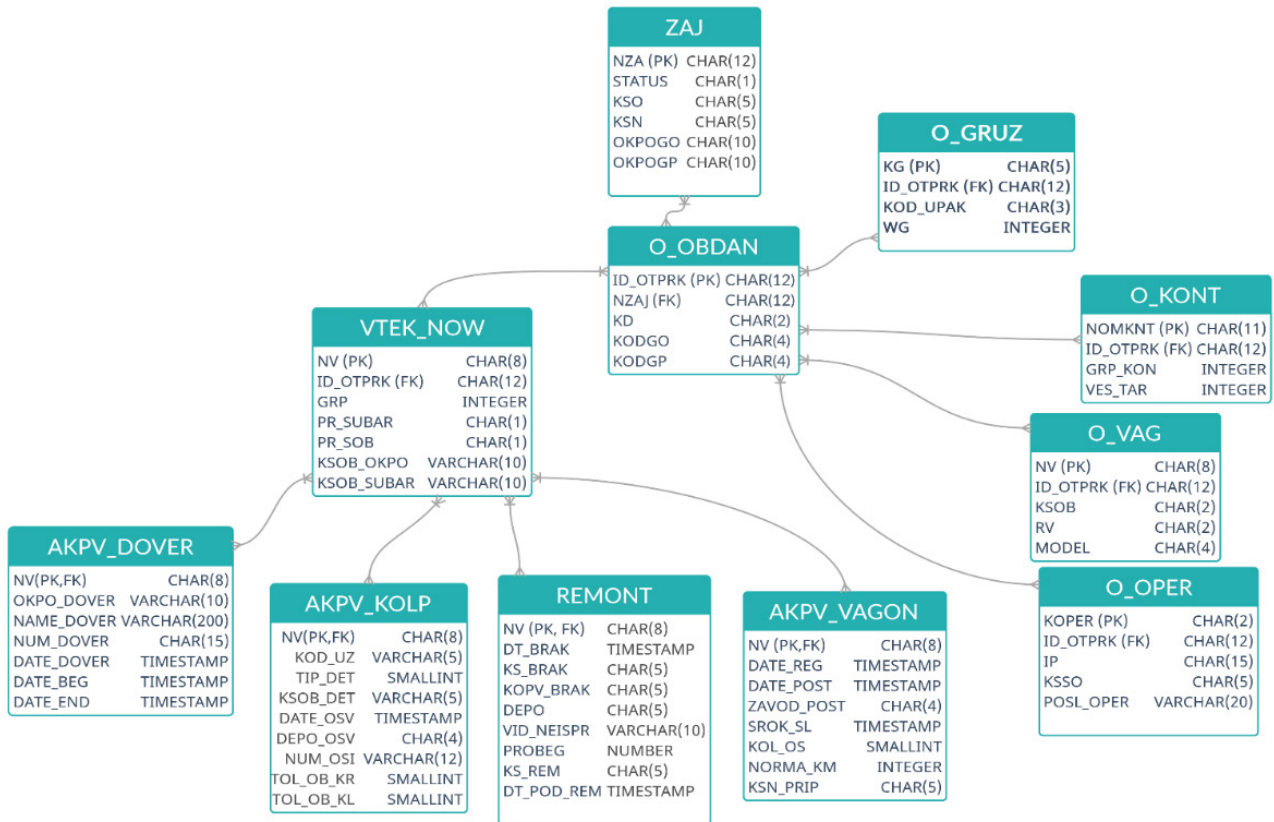


Рис. 3. Даталогическая модель сущностей

ТАБЛИЦА 1. Сущности хранения данных

Наименование сущности	Описание
Zaj	Заявка
O_obdan	Отправочная модель
Vtek_now	Вагонная модель
Akpv_vagon	Картотека
Akpv_dover	Доверенность
Akpv_kolp	Колесные пары
Remont	Ремонт
O_oper	Операции с отправкой
O_vag	Данные по вагонам
O_kont	Сведения по контейнеру
O_gruz	Грузы по отправкам

модели, включая станцию отправления, назначения, грузоотправителя, грузополучателя, вес груза, число вагонов, контейнеров, срок доставки и т. д.

В данном случае отправка подразумевается как некий элемент потока от станции отправления до станции назначения. Имея эти потоки за определенный период, можно производить анализ перевозок и предиктивную аналитику, выбирая критерий оценивания. Критериями могут быть нарушение сроков доставки, загруженность

станций, прогнозирование подхода или возможных ремонтов [16]. По каждому показателю можно вести предиктивную аналитику, при этом ключевым аспектом является архитектура построения сети, от которой будет зависеть возможность применения различных математических методов и нейросетевых моделей.

Данная модель может легко масштабироваться, добавляя критерии анализа, и быть кросс-платформенным решением при учете наличия единого стандарта хранения данных. Недостатком подхода к единой модели является сравнительно большой объем данных, который необходимо структурировать для последующей консолидации. Наличие большого количества данных подразумевает наличие дублирований и возможного отсутствия связей и неполноты информации. При этом очевидными преимуществами перехода к данной модели являются:

- хранение данных единого формата;
- возможность построения интуитивно понятной визуализации отношений между сущностями;
- оперативность доступа к информации и ее обработки в сравнении с аналогичными запросами;
- возможность использования современных технологий, применение которых позволит повысить эффективность поиска оптимального решения.

```

with ic as
(select kdn, dn, round(sum(cntvag)/30), kv,
round(sum(case when wg>0 then cntvag else 0 end)/30), kvg,
round(count(*)/30), ko,
round(sum(case when i.formras=60 then 1 else 0 end)/30), ds,
round(sum(case when i.formras=60 and kdo=kdn then 1 else 0 end)/30), ds01,
round(avg(i.raskr)), rs, round(avg(dt.vg-dto), 1), dd,
round(stddev(dt.vg-dto), 1), so,
round(sum(case when dt.vg>srdest+1 then cntvag else 0 end)/30), sr,
round(avg(srdest+1-dt.vg), 1), otkl,
round(stddev(srdest+1-dt.vg), 1), cotkl
from tsod.o_obdan i
where kdn in (select kd from nci.dor d where d.kstr=643 and kd not in (85,91)) and dt.vg>sysdate-30
group by kdn
)
select d.md Дорога
, kv вагонов, kvg груженых
, ko отправок , ds досылок, ds01 досыл_своих
, round(kv/(ko-ds), 1) ваг_в_отпр
, round(100*ds/ko) проц_дос
, rs расст
, dd ср_время
, so ср_откл
, round(rs/(dd*24)) скорость

```

ДОРОГА	ВАГОНОВ	ГРУЖЕННЫХ	ОТПРАВОК	ДОСЫЛОК	ДОСЫЛ_СВОИХ	ВАГ_В_ОТПР	ПРОЦ_ДОС	РАССТ	СР_ВРЕМЯ	СР_ОТКЛ	СКОРОСТЬ	ВАГ_СРВ	ПРОЦ_СРВ
1 ОКТ	14151	9720	3719	650	163	4,6	17	1830	6	5,1	13	1756	12
2 ДВОСТ	10522	6903	4656	852	615	2,8	18	3200	9,9	9,1	13	3292	31
3 С-КАВ	9018	6341	2426	320	137	4,3	13	1331	7,9	7,4	7	2043	23
4 Э-СИБ	16558	4564	8708	263	174	2	3	2800	7,8	9,6	15	1110	7
5 СВЕРД	9754	3603	3866	387	264	2,8	10	1676	7,1	6	10	1605	16
6 МОСК	6077	2818	4347	225	127	1,5	5	2851	8,6	6,5	14	1946	32
7 СЕВ	4851	2538	1782	106	53	2,9	6	959	5	4,6	8	564	12
8 Ю-УР	4563	2379	1776	199	65	2,9	11	840	5,2	5,6	7	988	22
9 В-СИБ	4934	2117	2039	88	54	2,5	4	2158	8,6	7,7	10	679	14
10 Ю-ВОС	5497	2107	1651	169	82	3,7	10	858	7,2	7	5	1255	23
11 КЕШ	5896	1862	2463	193	94	2,6	8	1160	7,4	6,9	7	1484	25
12 ГОРЬК	3146	1768	1362	128	58	2,5	9	1162	7,2	6,2	7	911	29

Рис. 4. Элемент скриншота рабочего окна

После выбора источника данных модели необходимо получить и обработать сведения по информационным источникам. Основным критерием в логистике в настоящее время считается доставка груза в срок.

Для примера потребности в хранении больших данных был проведен анализ грузовых отправок на полигоне «Октябрьская железная дорога — филиала ОАО «РЖД» за январь 2024 года.

Демонстрацией работы методов накопления больших данных является графическое отображение показателей. Графический вывод, как и методы запроса информации, может осуществляться различными способами в зависимости от ИС. В целях практической демонстрации была выбрана графическая среда разработки `sql Developer`, данные взяты из нескольких моделей хранения данных, представленных на рис. 3, и получены запросом на языке `sql`. Пример — иллюстрация запроса и вывода информации по выполненным доставкам дан на рис. 4.

Наблюдается отсутствие информации по некоторым направлениям доставки, что требует дополнительного анализа. В ИС должны закладываться модели и методы для поиска причин нарушений при осуществлении грузоперевозки.

В этом исследовании предлагаются технологии `big data`, которые должны быть направлены на сбор и хранение информации, наиболее полезной для анализа и отображения, доступ к которой будет оперативно получен. Целью дальнейших предиктивных изысканий может быть поиск нарушений или других критериев, результатом которого является процесс запоминания алгоритма поиска, то есть интеллектуальное решение, направленное на уточнение методов. Еще одним примером потребности в методах больших данных является задача прогноза отправления вагона в ремонт.

Заключительным этапом является выдача сведений клиенту, включающих:

- 1) объекты со срывом срока доставки;
- 2) объекты с прогнозом срыва срока доставки и достоверностью свершения этого факта;
- 3) по досылкам дать полные сведения, включающие исходную накладную с ее реквизитами по отправлению;
- 4) сводные сведения по дроблению отправок за период (прибывшие/совершенные на полигоне дороги);
- 5) сводные сведения по срыву доставок за период (прибывшие/совершенные на полигоне дороги).

Блок исходных данных для реализуемых задач предполагает применение данных, выгружаемых согласно элементам бизнес-операций из смежных систем, в частности:

- Автоматизированная система оперативного управления перевозками (АСОУП);
- Автоматизированная система планирования, учета и анализа проведения окон и выполнения хозяйственной работы (АС АПВО (АС АПВО-2) по сведени-

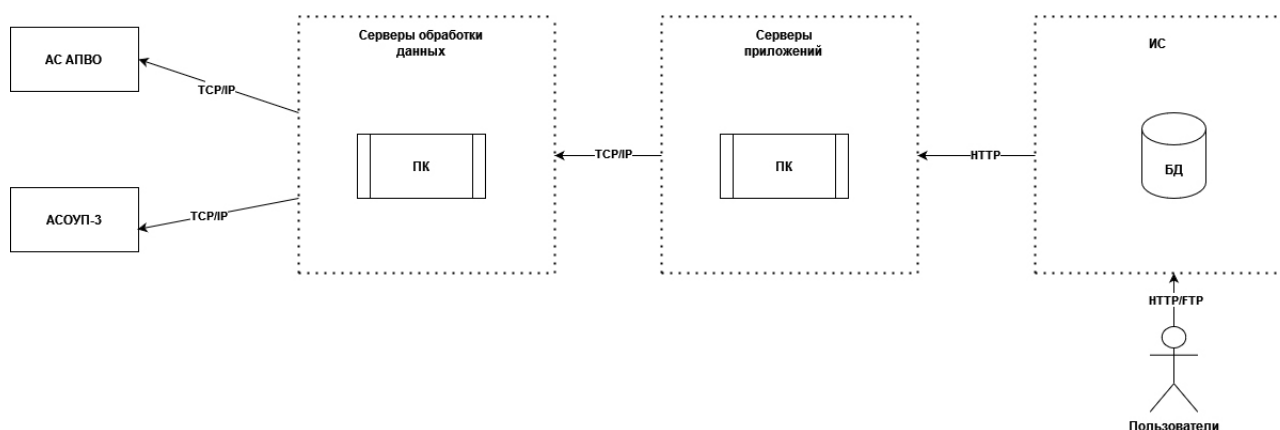


Рис. 5. Работа ИС

ям о числе ниток грузовых поездов по прогнозным графикам движения на выполнение ремонтно-путевых работ за год/месяц, а также ежесуточные оперативные изменения [17].

Пользовательские запросы в ИС обрабатываются и осуществляется поиск необходимых сведений в БД, которая накапливает информацию, поступающую с сервера приложения. Взаимодействие между ними осуществляется по http-протоколу. Сервер приложений получает обработанную информацию с сервера обработки данных по tcp/ip-протоколу. Сервер обработки, в свою очередь, запрашивает информацию из описанных АС также по tcp/ip-протоколу. Таким образом, клиент получает графическую информацию по запросу.

Дальнейшие расчеты по реализации системы доставки можно проводить при соответствующем программном обеспечении с использованием методик, изложенных в работах [18–24].

Блок-схема алгоритма получения необходимых сведений дана на рис. 5.

Заключение

Выполненное исследование направлено на обоснование необходимости внедрения технологий big data для совершенствования перевозочного процесса по части хранения, накопления и обработки информации, а также к последующему анализу. Следующим этапом совершенствования транспортных технологических процессов должны быть выбор и проектирование имитационной модели архитектуры хранилища данных, которая в будущем может повлиять на дальнейшую интеграцию различных технологий и методов, которые в рамках данной статьи не рассматриваются.

Надо полагать, что интеграция и применение существующих технологий больших данных уже на этапе реорганизации взаимодействия позволят оптимизировать затраты на хранение данных посредством перехода к единой консолидированной структуре. Рассмотренный подход направлен на упрощение понимания структуры взаимодействия, а также на подготовку базы и моделей для последующей обработки.

Библиографический список

1. Подхалюзина В. А. Анализ состояния железнодорожного транспорта в России // Экономика и социум. 2014. № 2–3 (11) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-zheleznodorozhnogo-transporta-v-rossii> (дата обращения: 17.01.2024).

2. Рогушина Ю. В. Разработка онтологической модели информационной потребности пользователя при семантическом поиске // Онтология проектирования. 2014. № 2 (12) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-ontologicheskoy-modeli-informatsionnoy-potrebnosti-polzovatelya-pri-semanticheskom-poiske> (дата обращения: 17.01.2024).

3. Власов А. И., Подорин А. А., Малеваный А. Ю. и др. Анализ визуальных моделей технологии больших данных при мониторинге перевозочного процесса на основе хранилища рейсов грузовых вагонов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 3 (67) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vizualnyh-modeley-tehnologii-bolshih-dannyh-pri-monitoringe-perevozochnogo-protsesa-na-osnove-hranilishcha-reysov-gruzovyh> (дата обращения: 17.01.2024).

4. Кравченко В. О., Крюкова А. А. Большие данные — практические аспекты и особенности // Academy. 2016. № 6 (9) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bolshie-dannye-prakticheskie-aspekty-i-osobennosti> (дата обращения: 17.01.2024).

5. Москат Н. А. Методы повышения эффективности автоматизированной системы оперативного управления на железнодорожном транспорте // ИВД. 2018. № 1 (48) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-povysheniya-effektivnosti-avtomatizirovannoy-sistemy-operativnogo-upravleniya-na-zheleznodorozhnom-transporte> (дата обращения: 15.01.2024).

6. Грошев Г. М., Климова Н. В., Суторовский А. В. и др. Автоматизация информационного обеспечения независимых участников мультимодальных перевозок контейнеров в морской порт в транспортном узле // Автоматика на транспорте. 2018. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-informatsionnogo-obespecheniya-nezavisimyh-uchastnikov-multimodalnyh-perevozok-konteynerov-v-morskoj-port-v> (дата обращения: 17.01.2024).

7. Архипова Е. С. Роль обработки больших данных в управлении современным предприятием // Огарёв-Online. 2019. № 7 (128) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-obrabotki-bolshih-dannyh-v-upravlenii-sovremennym-predpriyatiem> (дата обращения: 17.01.2024).

8. Маловецкая Е. В., Козловский А. П. Анализ моделей и принципов системного моделирования при построении прогнозных моделей погрузки грузов // International Journal of Open Information Technologies. 2020. № 12 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-modeley-i-printsipov-sistemnogo-modelirovaniya-pri-postroenii-prognoznyh-modeley-pogruzki-gruzov> (дата обращения: 17.01.2024).

9. Назаренко Ю. Л. Обзор технологии «большие данные» (big data) и программно-аппаратных средств, применяемых для их анализа и обработки // European science. 2017. № 9 (31) [Электронный

ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-tehnologii-bolshie-dannye-big-data-i-programmno-apparatnyh-sredstv-primenyaemyh-dlya-ih-analiza-i-obrabotki> (дата обращения: 17.01.2024).

10. Менщиков А. А., Перфильев В. Э., Федосенко М. Ю. и др. Основные проблемы использования больших данных в современных информационных системах // Столыпинский вестник. 2022. № 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnyye-problemy-ispolzovaniya-bolshih-dannyh-v-sovremennyh-informatsionnyh-sistemah> (дата обращения: 17.01.2024).

11. Пугачев С. В., Хомоненко А. Д., Ярмолинский Ф. А. О разработке информационной системы грузоперевозок ОАО «РЖД» на основе безопасной интеграции приложений // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № 1 (33) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-razrabotke-informatsionnoy-sistemy-gruzoperevozok-oao-rzhd-na-osnove-bezopasnoy-integratsii-prilozheniy> (дата обращения: 17.01.2024).

12. Кравченко М. В., Никитин А. С., Спиридонов С. И. Об унификации обмена данными между разнородными средствами и системами в едином информационном пространстве // I-methods. 2020. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-unifikatsii-obmena-dannymi-mezhdu-raznorodnymi-sredstvami-i-sistemami-v-edinom-informatsionnom-prostranstve> (дата обращения: 17.01.2024).

13. Плясова С. В., Калинин А. Р., Зеленкина Е. В. Big data как объект оценки // Имущественные отношения в РФ. 2022. № 1 (244) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bigdata-kak-obekt-otsenki> (дата обращения: 17.01.2024).

14. Акимов А. Е. Большие данные, искусственный интеллект и облачные технологии: цифровизация железных дорог // Инновации и инвестиции. 2023. № 3. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bolshie-dannye-iskusstvennyy-intellekt-i-oblachnye-tehnologii-tsifrovizatsiya-zheleznyh-dorog> (дата обращения: 17.01.2024).

15. Интерактивный автоинформатор для клиентов железнодорожного транспорта [Рукопись] : вып. квалиф. раб. ... степ. мгс. / Ф. А. Ярмолинский ; научный руководитель С. В. Пугачев ; рец. А. Н. Горкунов ; ФГБОУ ВО ПГУПС, кафедра ИВС. 2023. 147 с. 23 с.

16. Куренков П. В., Котляренко А. Ф. Внешнеторговые перевозки в смешанном сообщении: экономика, логистика, управление. Самара: СамГАПС, 2003. 636 с.

17. Куренков П. В. Материальные потоки в макрологистических системах: систематизация и классификация // Транспорт: наука, техника, управление. 2019. № 7. С. 21–26.

18. Куренков П. В., Давыдов С. В., Болгова Ю. С. Самарский центр консолидации грузопотоков в системе международных транспортных коридоров // Логистика сегодня. 2007. № 5. С. 312–322.

19. Куренков П. В., Багимов А. В. Взаимодействие отправителей и получателей каменного угля при экспортных перевозках в смешанном сообщении // Материалы международного научно-образовательного форума. Бургас: 2014. № 1 (5). С. 258–265.

20. Куренков П. В., Соловьева Л. В. Издержки взаимодействия компаний-операторов и ОАО «РЖД» // Материалы международного научно-образовательного форума. Бургас: 2014. № 1 (5). С. 266–275.

21. Куренков П. В., Соловьева Л. В. Логистические издержки взаимодействия компаний-операторов и ОАО «РЖД» // *Логистика*. 2014. № 4 (89). С. 24–27.

22. Куренков П. В., Солоп И. А., Чеботарева Е. А. и др. Оценка выполнения сроков доставки грузов на юге России // *Экономика железных дорог*. 2023. № 7. С. 13–25.

23. Солоп И. А., Чеботарева Е. А. Причинно-следственный анализ выполнения надежности доставки грузов железнодорожным транспортом в адрес потребителей Южного региона и портов Азово-Черноморского бассейна // *ИВД*. 2018. № 3 (50) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prichinno-sledstvennyy-analiz-vypolneniya-nadezhnosti-dostavki-gruzov-zheleznodorozhnym-transportom-v-adres-potrebiteley-yuzhnogo> (дата обращения: 17.01.2024).

24. Система управления окнами [Электронный ресурс]. URL: <https://niias.ru/products-and-services/products/asu/avtomatizirovannaya-sistema-planirovanie-uchet-i-analiz-provedeniya-okon-i-vypolneniya-khozyaystvenn/?ysclid=lrj4m2iauo361494077> (дата обращения: 17.01.2024).

Дата поступления: 29.01.2024

Решение о публикации: 01.03.2024

Контактная информация:

ЯРМОЛИНСКИЙ Федор Александрович — аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, тел.: 8 (921) 766-06-53

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, тел.: 8 (965) 035-42-54

ПАСЕЧНИК Екатерина Дмитриевна — ассистент кафедры бизнес-информатики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Россия, 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 24-26/49, литера А, тел.: 8 (911) 149-85-88

ПАКУЛИНА Елена Вячеславовна — ассистент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы», ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9.

ТРАПЕЗНИКОВ Александр Александрович — преподаватель 1-й кафедры (организации повседневной деятельности и безопасности военной службы), Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений ВА МТО им. генерала армии А. В. Хрулёва, trapeznikova1979@mail.ru

Features of the use of BIG DATA in the study of freight traffic on railway transport

F. A. Yarmolinsky¹, O. D. Pokrovskaya¹, E. D. Pasechnik¹, E. V. Pakulina¹,
A. A. Trapeznikov²

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

² Military Institute of Railway Troops and Military Communications of the VA MTO named after Army General A. V. Khrulev

For citation: Ermolinsky F.A., Pokrovskaya O. D., Pasechnik E. D. *i dr.* Features of the use of BIGDATA in the study of freight flows on railway transport // Bulletin of scientific research results. — 2024. — Iss. 1. — P. 107–122. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-107-122

Abstract

Objective: to characterize the features and prospects of using big data tools and technologies in the management of the transportation process on railways. **Methods:** neural network modeling, system analysis, forecasting, programming, big data, predictive analytics. **Results:** a datalogical model of entities for storing up-to-date data on cargo flows is proposed, and a structure for building a system for accumulating information is proposed. In addition, the paper examines the applied issues of solving the problems of storing, receiving and processing data using big data methods. **Practical significance:** Improving the management of railway transportation processes in the context of digital transformation in terms of obtaining more accurate forecasts.

Keywords: big data, cargo flows, predictive analytics, digitalization, forecast, neural network model.

References

1. Podhalyuzina V. A. Analiz sostoyaniya zheleznodorozhnogo transporta v Rossii // *Ekonomika i socium*. 2014. No. 2–3 (11) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-zheleznodorozhnogo-transporta-v-rossii> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
2. Rogushina Yu. V. Razrabotka ontologicheskoy modeli informacionnoj potrebnosti pol'zovatelya pri semanticheskom poiske // *Ontologiya proektirovaniya*. 2014. No. 2 (12) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-ontologicheskoy-modeli-informatsionnoj-potrebnosti-pol-zovatelya-pri-semanticheskom-poiske> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
3. Vlasov A. I., Podorin A. A., Malevanyj A. Yu. i dr. Analiz vizual'nyh modelej tekhnologii bol'shih dannyh pri monitoringe perevozochnogo processa na osnove hranilishcha rejsov gruzovyh vagonov // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2020. No. 3 (67) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vizualnyh-modeley-tehnologii-bolshih-dannyh-pri-monitoringe-perevozochnogo-protsesta-na-osnove-hranilischa-reysov-gruzovyh> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
4. Kravchenko V. O., Kryukova A. A. Bol'shie dannye — prakticheskie aspekty i osobennosti // *Academy*. 2016. No. 6 (9) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bolshie-dannye-prakticheskie-aspekty-i-osobennosti> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)

5. Moskat N. A. Metody povysheniya effektivnosti avtomatizirovannoy sistemy operativnogo upravleniya na zheleznodorozhnom transporte // IVD. 2018. No. 1 (48) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-povysheniya-effektivnosti-avtomatizirovannoy-sistemy-operativnogo-upravleniya-na-zheleznodorozhnom-transporte> (data obrashcheniya: 15.01.2024). (In Russian)
6. Groshev G. M., Klimova N. V., Sugorovskij A. V. i dr. Avtomatizatsiya informacionnogo obespecheniya nezavisimyh uchastnikov mul'timodal'nyh perevozok kontejnerov v morskoy port v transportnom uzle // Avtomatika na transporte. 2018. No. 3 [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-informatsionnogo-obespecheniya-nezavisimyh-uchastnikov-multimodalnyh-perevozok-konteynerov-v-morskoy-port-v> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
7. Arhipova E. S. Rol' obrabotki bol'shikh dannyh v upravlenii sovremennym predpriyatiem // Ogaryov-Online. 2019. No. 7 (128) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-obrabotki-bolshikh-dannyh-v-upravlenii-sovremennym-predpriyatiem> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
8. Maloveckaya E. V., Kozlovskij A. P. Analiz modelej i principov sistemnogo modelirovaniya pri postroenii prognoznyh modelej pogruzki gruzov // International Journal of Open Information Technologies. 2020. No. 12 [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-modeley-i-printsipov-sistemnogo-modelirovaniya-pri-postroenii-prognoznyh-modeley-pogruzki-gruzov> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
9. Nazarenko Yu. L. Obzor tekhnologii "bol'shie dannye" (big data) i programmno-apparatnyh sredstv, primenyaemyh dlya ih analiza i obrabotki // European science. 2017. No. 9 (31) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-tehnologii-bolshie-dannye-big-data-i-programmno-apparatnyh-sredstv-primenyaemyh-dlya-ih-analiza-i-obrabotki> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
10. Menshchikov A. A., Perfil'ev V. E., Fedosenko M. Yu., et. al. Osnovnye problemy ispol'zovaniya bol'shikh dannyh v sovremennykh informacionnykh sistemah // Stolypinskij vestnik. 2022. No. 1 [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-problemy-ispolzovaniya-bolshikh-dannyh-v-sovremennykh-informatsionnykh-sistemah> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
11. Pugachev S. V., Homonenko A. D., Yarmolinskij F. A. O razrabotke informacionnoj sistemy gruzoperevozok OAO "RZHD" na osnove bezopasnoj integratsii prilozhenij // Intellektual'nye tekhnologii na transporte. 2023. No. 1 (33) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-razrabotke-informatsionnoy-sistemy-gruzoperevozok-oao-rzhd-na-osnove-bezopasnoj-integratsii-prilozhenij> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
12. Kravchenko M. V., Nikitin A. S., Spiridonov S. I. Ob unifikatsii obmena dannyimi mezhduraznorodnymi sredstvami i sistemami v edinom informacionnom prostranstve // I-methods. 2020. No. 2 [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-unifikatsii-obmena-dannyimi-mezhduraznorodnymi-sredstvami-i-sistemami-v-edinom-informatsionnom-prostranstve> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
13. Plyasova S. V., Kalinin A. R., Zelenkina E. V. Big data kak ob'ekt ocenki // Imushchestvennye otnosheniya v RF. 2022. No. 1 (244) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bigdata-kak-obekt-otsenki> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)

14. Akimov A. E. Bol'shie dannye, iskusstvennyj intellekt i oblachnye tekhnologii: cifrovizatsiya zheleznyh dorog // Innovatsii i investitsii. 2023. No. 3. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bolshie-dannye-iskusstvennyy-intellekt-i-oblachnye-tehnologii-tsifrovizatsiya-zheleznyh-dorog> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
15. Interaktivnyj avtoinformator dlya klientov zheleznodorozhnogo transporta [Rukopis'] : vyp. kvalif. rab. ... step. mgs. / F. A. Yarmolinskij ; nauchnyj rukovoditel' S. V. Pugachev ; rec. A.N. Gorkunov ; FGBOU VO PGUPS, kafedra IVS. 2023. 147 p. 23 p. (In Russian)
16. Kurenkov P. V., Kotlyarenko A. F. Vneshnetorgovye perevozki v smeshannom soobshchenii: ekonomika, logistika, upravlenie. Samara: SamGAPS, 2003. 636 p. (In Russian)
17. Kurenkov P. V. Material'nye potoki v makrologisticheskikh sistemah: sistematizatsiya i klassifikatsiya // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2019. No. 7. P. 21–26. (In Russian)
18. Kurenkov P. V., Davydov S. V., Bolgova YU. S. Camarskij centr konsolidatsii gruzopotokov v sisteme mezhdunarodnyh transportnyh koridorov // Logistika segodnya. 2007. No. 5. P. 312–322. (In Russian)
19. Kurenkov P. V., Bagimov A. V. Vzaimodejstvie otpravitelej i poluchatelej kamennogo uglya pri eksportnyh perevozkah v smeshannom soobshchenii // Materialy mezhdunarodnogo nauchno-obrazovatel'nogo foruma. Burgas: 2014. No. 1 (5). P. 258–265. (In Russian)
20. Kurenkov P. V., Solov'eva L. V. Izderzhki vzaimodejstviya kompanij-operatorov i OAO "RZHD" // Materialy mezhdunarodnogo nauchno-obrazovatel'nogo foruma. Burgas: 2014. No. 1 (5). P. 266–275. (In Russian)
21. Kurenkov P. V., Solov'eva L. V. Logisticheskie izderzhki vzaimodejstviya kompanij-operatorov i OAO "RZHD" // Logistika. 2014. No. 4 (89). P. 24–27. (In Russian)
22. Kurenkov P. V., Solop I. A., Chebotareva E. A., et. al. Ocenka vypolneniya srokov dostavki gruzov na yuge Rossii // Ekonomika zheleznyh dorog. 2023. No. 7. P. 13–25. (In Russian)
23. Solop I. A., Chebotareva E. A. Prichinno-sledstvennyj analiz vypolneniya nadezhnosti dostavki gruzov zheleznodorozhnym transportom v adres potrebitelej YUzhnogo regiona i portov Azovo-CHernomorskogo bassejna // IVD. 2018. No. 3 (50) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prichinno-sledstvennyy-analiz-vypolneniya-nadezhnosti-dostavki-gruzov-zheleznodorozhnym-transportom-v-adres-potrebiteley-yuzhnogo> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)
24. Sistema upravleniya oknami [Elektronnyj resurs]. URL: <https://niias.ru/products-and-services/products/asu/avtomatizirovannaya-sistema-planirovanie-uchet-i-analiz-provedeniya-okon-i-vypolneniya-khozyaystvenn/?ysclid=lrj4m2iauo361494077> (data obrashcheniya: 17.01.2024). (In Russian)

Received: 29.01.2024

Accepted: 01.03.2024

Author's information:

Fyodor A. YARMOLINSKY — Postgraduate student of the Department "Operational Work Management" of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia, tel.: 8 (921) 766-06-53

Oksana D. POKROVSKAYA — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department “Operational Work Management” of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia, tel.: 8-965-035-42-54

Ekaterina D. PASECHNIK — Assistant of the Department of Business Informatics, St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), litera A, 24-26/49, Moskovsky ave., St. Petersburg, 190013, Russia, tel.: 8911-149-85-88

Elena V. PAKULINA — Assistant of the Department of Land Transport and Technological Complexes of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

Alexander A. TRAPEZNIKOV — lecturer of the 1st department (organization of daily activities and security of military service), Military Institute (Railway troops and military communications) of the of the Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulyov of the Ministry of Defense of the Russian Federation; trapeznikovaa1979@mail.ru

УДК 332.74

Переход от инвентаризационной стоимости объектов недвижимости к кадастровой при налогообложении недвижимости физических лиц: процесс и его последствия

А. М. Поликарпов¹, В. С. Меркушева², Д. А. Афонин²

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, Россия, 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, корп. 1

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

Для цитирования: Поликарпов А. М., Меркушева В. С., Афонин Д. А. Переход от инвентаризационной стоимости объектов недвижимости к кадастровой при налогообложении недвижимости физических лиц: процесс и его последствия // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 123–134. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-123-134

Аннотация

Цель: рассмотреть процесс изменения расчета налогообложения в России за последние годы, его порядок и последствия изменения расчета налога на недвижимость. Показать необходимость изменения введенной прогрессивной шкалы налога на имущества для собственников жилых объектов. Оценить возможность изменения методов расчета базы для налогообложения физических лиц. **Методы:** анализ хронологии установления налогов в РФ и перехода перерасчета земельного налога во времени. Сравнение расчета налога по инвентаризационной и кадастровой стоимостям, имущественных налогов в РФ. **Результаты:** выявлены основные причины, препятствующие формированию объективной базы налогообложения имущества: недостаточность и недостоверность используемых сведений, в том числе на начальном этапе применения массовой оценки имущества в качестве исходных данных, и несовершенство разработанной методологии кадастровой оценки. **Практическая значимость:** исторически с формированием государств была введена фискальная система. Налог на недвижимость в современной России регулируется набором нормативных документов. Среди основных понятий области налогообложения следует выделить понятие налоговой базы недвижимости. В последние годы были произведены изменения в определении налоговой базы недвижимости, что имеет ключевое влияние на формирование как стоимости и оценки недвижимости, так и формирования фискальной политики в России. В данной статье рассмотрены процесс изменения расчета налогообложения в России за последние годы, его порядок и последствия изменения расчета налога на недвижимость.

Ключевые слова: государственный кадастровый учет недвижимости, единый государственный реестр недвижимости, оценка недвижимости, инвентаризация объектов недвижимости, налогообложение объектов недвижимости.

Введение

Эволюция законодательства для оценки недвижимости происходит с начала 90-х годов. Вопросы совершенствования налогообложения имущества поднимаются в работах А. В. Осенней, Б. А. Хахук, С. В. Самарина [1]. Система

оценки кадастровой стоимости находится в состоянии постоянного уточнения и улучшения, особенно при определении кадастровой стоимости разных видов недвижимого имущества. Неравномерное и несправедливое распределение налогового бремени между собственниками недвижимости происходит, как отмечается в ряде научных публикаций [2–4], и связано с существенными различиями в получаемых рыночной и кадастровой стоимостях. В результате несправедливое и неравномерное распределение налогового бремени может привести к социальным возмущениям в обществе, что является недопустимым. Рассматривая налогообложение в РФ, можно отметить, что установление рыночных отношений потребовало построение новой экономики у государства. Принятие в 1991–1992 годах новых законов [5–7] является продолжением и углублением важнейшего элемента экономической реформы в России (рис. 1)

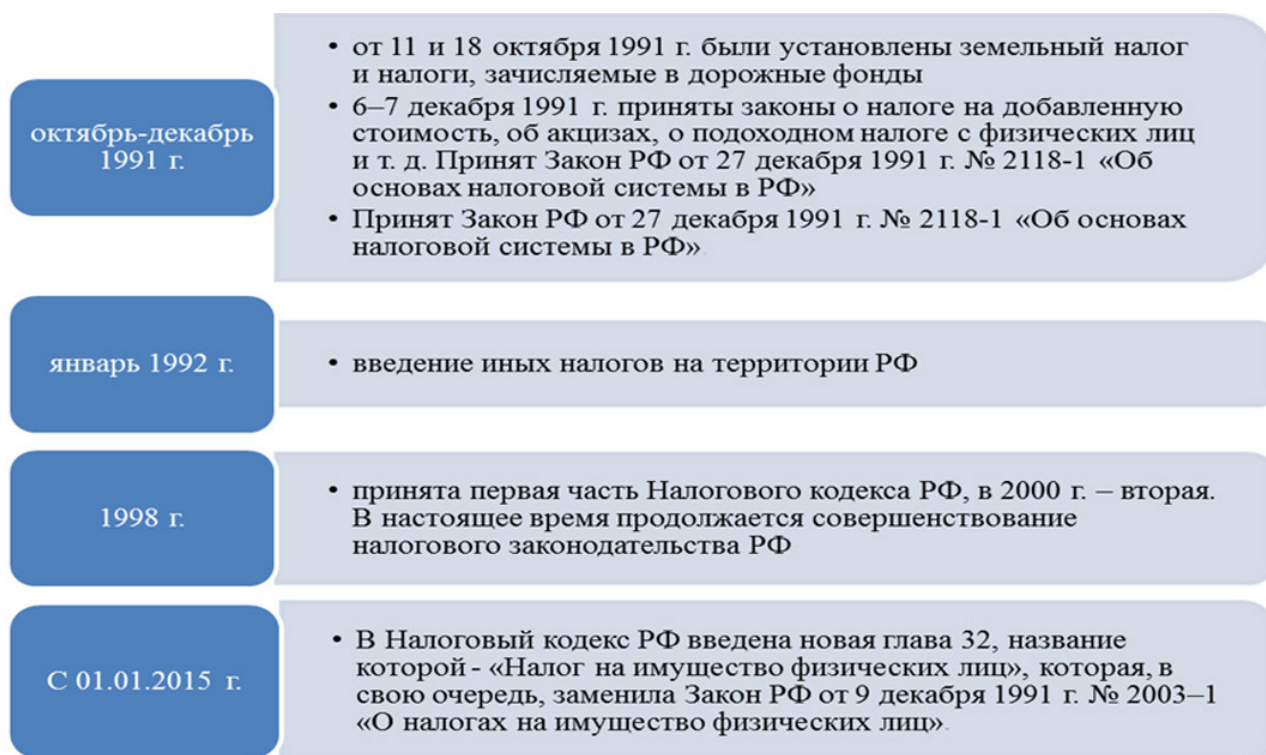


Рис. 1. Хронология установления налогов в РФ

Методология

Методологическую основу исследования составляют положения теории налогообложения РФ, анализ законодательства о налогах и сборах, обобщение данных о кадастровой стоимости недвижимого имущества, материалы, опубликованные в научной литературе и информационной сети Интернет.

Налоговая система современной России характеризуется сложным комплексом взаимоотношений, основанных на опыте и знаниях предыдущих поколений. Институт налогообложения представляет собой процесс взимания налогов и сборов, осуществление налогового контроля, защиты прав и законных интересов участников этого процесса.

Налоги РФ имеют три уровня формирования: федеральный, региональный и местный.

Земельный налог является одним из видов местных налогов, из которых формируется местный (региональный) бюджет.

Особенностью налоговой системы РФ является жесткое регулирование самого набора налогов. Число типов сборов и налогов представлено в виде конечной величины, и появление новых типов налогов возможно лишь путем введения изменений базы финансового законодательства РФ. Вместе с этим система предусматривает возможность введения изменений в расчет налогов. Заметным примером такой особенности и является расчет налога на имущество физических лиц.

Хронология формирования земельного налога по кадастровой стоимости представлена на рис. 2.

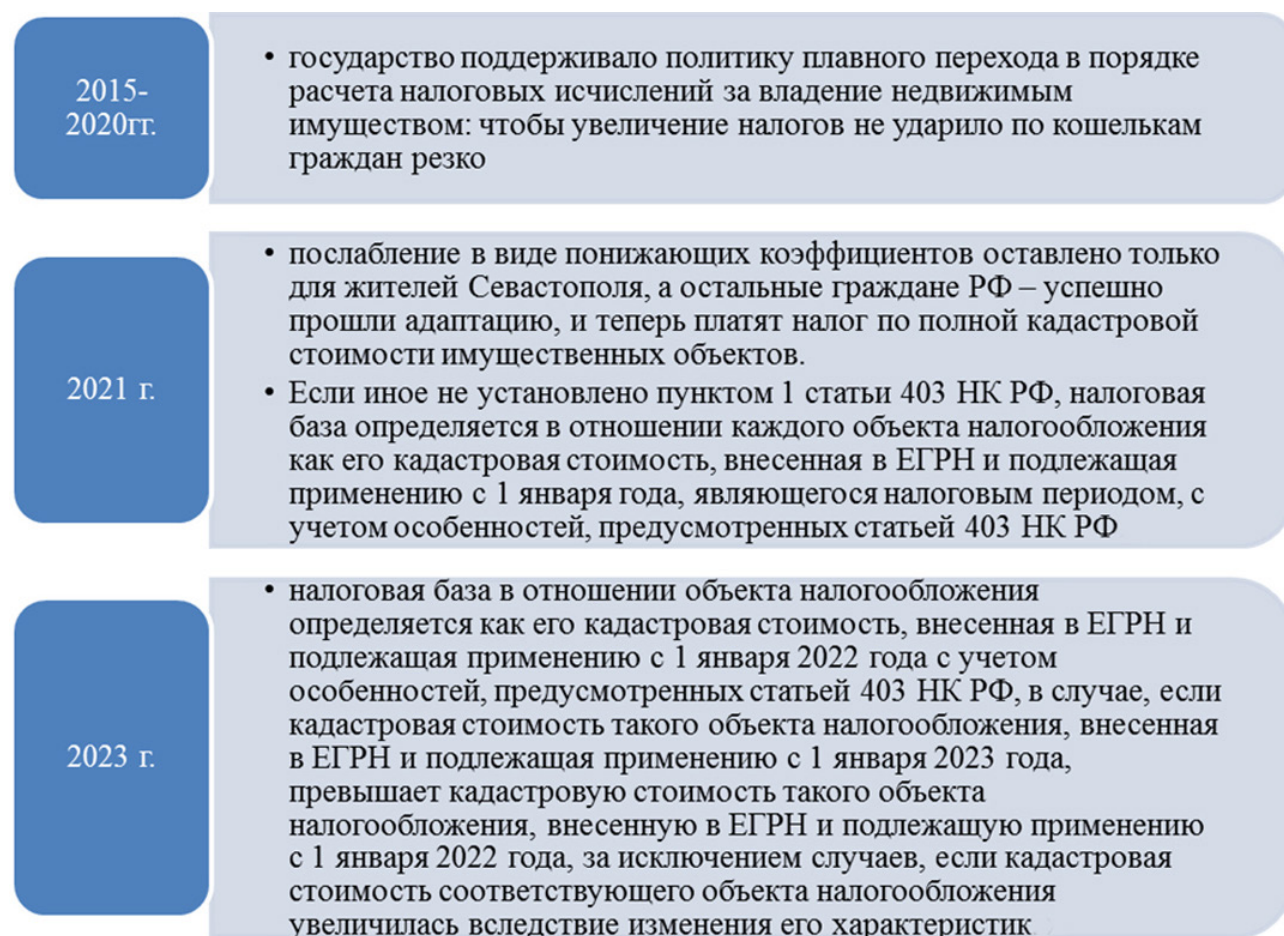


Рис. 2. Хронология перехода перерасчета земельного налога

Анализируя переход перерасчета земельного налога во времени, следует говорить о высокой динамике исчисления налога за каждый налоговый период (квартал года или календарный год).

Результаты исследования

В России расчет налога на недвижимость может выполняться двумя способами: исходя из инвентаризационной или кадастровой стоимости.

Стоит отдельно выделить различия между инвентаризационной и кадастровой стоимостью (рис. 3).

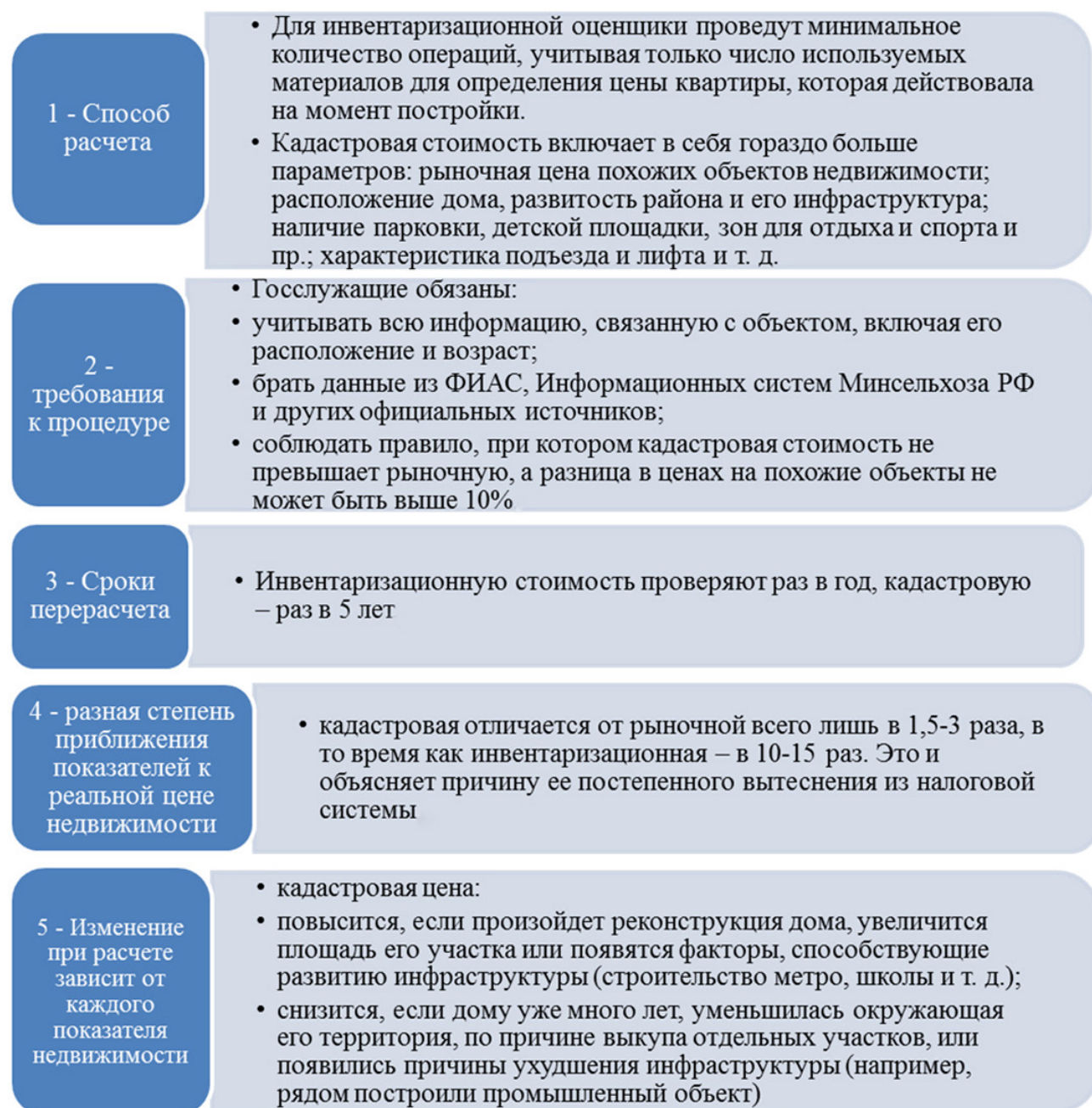


Рис. 3. Отличия расчета налога по инвентаризационной и кадастровой стоимостям

Фискальная система РФ соответствует действующей экономической, политической и социальной системе государства.

Налог на недвижимое имущество за последнее десятилетие стал предметом обсуждения законотворцев и научной среды России.

Вопрос налога на недвижимость был поднят в 1998–2000 годах. Правительством РФ была поставлена срочная задача по разработке механизма введения налога на имущество физических и юридических лиц и земельного налога. В ходе первых пробных проектов налоговая база была взята как стоимость недвижимости, учитываемая государством (стоимость, отображаемая в кадастре недвижимости). Подход на примере городов выявил необходимость развития института кадастра объектов недвижимости.

Кроме того, после введения поправок в 2004 году было установлено, что применение инвентаризационной стоимости в кадастре не отображает реальную информацию формируемого на территории РФ рынка недвижимости, что требует формирования методик кадастровой оценки, учитывающей данные рынка недвижимости, его динамику.

В период 2004–2014 годов система определения налога на основе инвентаризационной стоимости объекта значительно отличалась от рассчитываемой на основе рыночной цены и кадастровой стоимости. В итоге несоответствие рыночной и кадастровой цены аналогичных объектов формировало при этом налоговую базу одинаковой величины, что приводит к соответствующим потерям в части налоговых отчислений.

Переход на новую систему расчета начался еще в 2015 году. Тогда было решение о переходе на кадастровую стоимость как на базовую единицу. Данный вопрос был разрешен в 2017 году с принятием закона «О государственной оценке», согласно которому оценка объектов недвижимости будет исчисляться на основе кадастровой стоимости, а не инвентаризационной стоимости недвижимости.

При этом на сегодняшний день по-прежнему остался целый ряд проблем регулирования как стоимости недвижимости, так и исчисления налога на недвижимость.

1. Несовершенство процедуры учета недвижимости.

Учет недвижимого имущества на территории РФ по-прежнему несет заявительный характер, где заявителем может быть лишь лицо, претендующее на права на объект недвижимости. Как показывает статистика, на 2021 год около 35% объектов недвижимости не внесены в единый государственный реестр недвижимости (ЕГРН), что, соответственно, не дает возможности в отношении неучтенных объектов взимать налоговые отчисления.

2. Недостоверность сведений, отображаемых в ЕГРН.

В системе ЕГРН часто указаны неполные или недостоверные сведения, так как отсутствуют обязательный мониторинг сведений ЕГРН на их актуальность

и соответствие данным полевых наблюдений. Формирование самой системы мониторинга требует больших финансовых затрат со стороны государства, где необходимо учесть наличие квалифицированных кадров, сроки, социальный фактор, а главное, объем анализируемых данных (РФ является самой большой по площади страной мира).

3. Отсутствие в действующей системе смещения налоговой нагрузки в пользу более дорогих объектов недвижимости.

Если рассмотреть непосредственно переход с инвентаризационной стоимости на кадастровую стоимость как налоговую базу, то в целом по стране заметно возросли величины налогов на объекты недвижимости, но, если анализировать рынок недвижимого имущества, в частности жилых помещений, следует отметить налоговый прирост резкими темпами за счет ввода нового жилья.

Такая диспропорция приводит к диспропорции стоимости жилья в различных регионах и, как следствие, налоговых поступлений. В результате образуется дисбаланс бюджетов от региона к региону, что вкупе с иными экономическими факторами приводит к разрыву качества жизни в регионах.

По данным I полугодия 2022 года, структура поступивших имущественных налогов представлена на рис. 4.

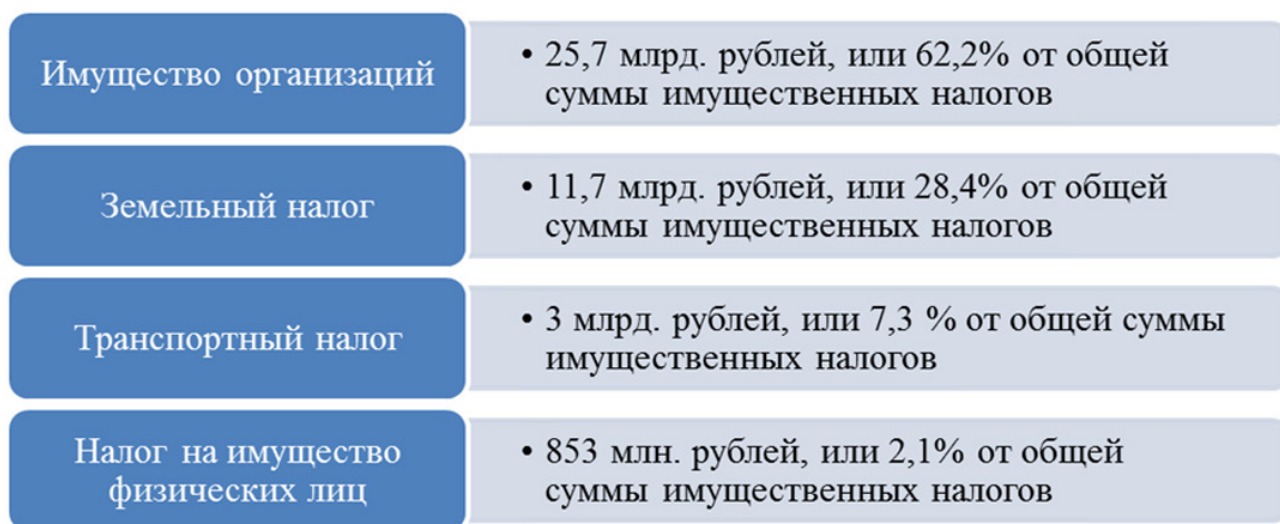


Рис. 4. Соотношение имущественных налогов в РФ

Данные по консолидированному бюджету субъектов РФ за первые три квартала 2022 года и динамика поступлений в 2017–2022 годах представлены на рис. 5.

ПОСТУПЛЕНИЯ В БЮДЖЕТНУЮ СИСТЕМУ РФ

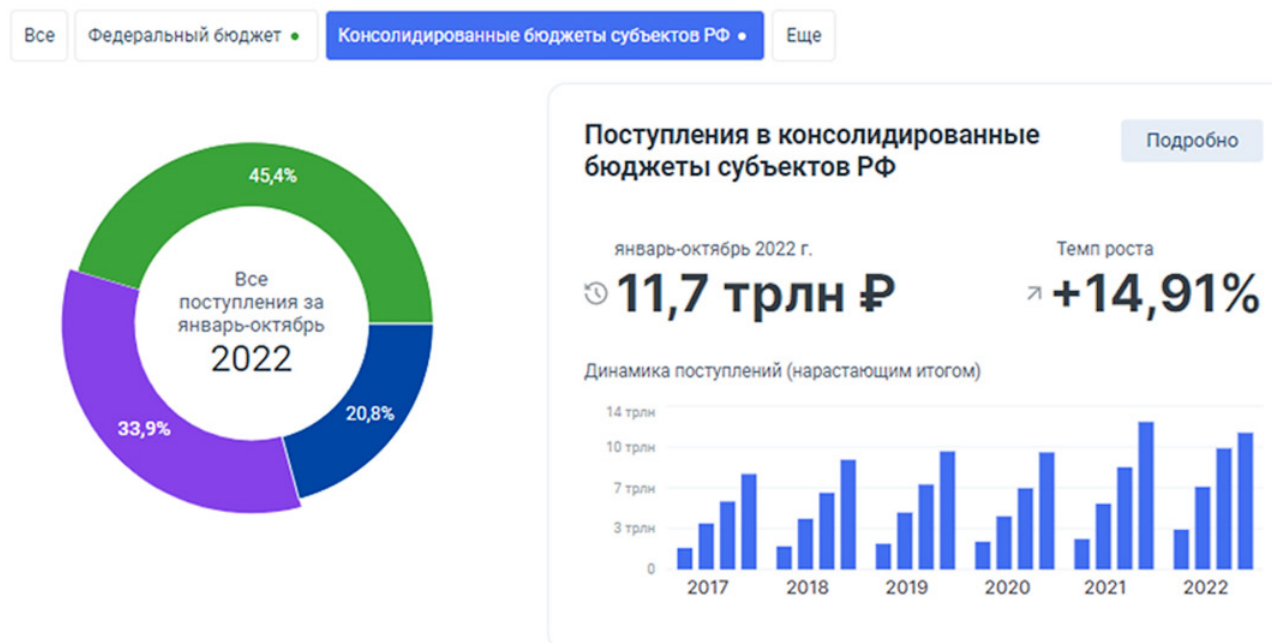


Рис. 5. Поступления в консолидированные бюджеты субъектов РФ

Вместе с повышением числа объектов отсутствует детализация льготного режима объектов. На сегодняшний день установлено 15 категорий лиц, имеющих право на налоговые льготы в отношении недвижимого имущества (инвалиды, пенсионеры, участники военных действий и т. д.), при этом лицо самостоятельно уведомляет налоговую службу о возможной льготе, что зачастую как раз затруднительно для данных (зачастую физически ограниченных) лиц.

Обсуждение результатов

Подводя итог вышесказанному, стоит отметить, что при попытке актуализации системы налогообложения недвижимости есть существенные недоработки в других областях деятельности, как раз регулирующих определение самой кадастровой стоимости, что в сумме с отсутствием дополнительных налоговых регуляторов приводит к раздутию рынка недвижимости в отдельных регионах, влияющих в том числе и на само определение кадастровой стоимости недвижимости.

Рассматривая земельный налог с физических лиц как местный налог, при его определении имеется целый ряд проблем (рис. 6).

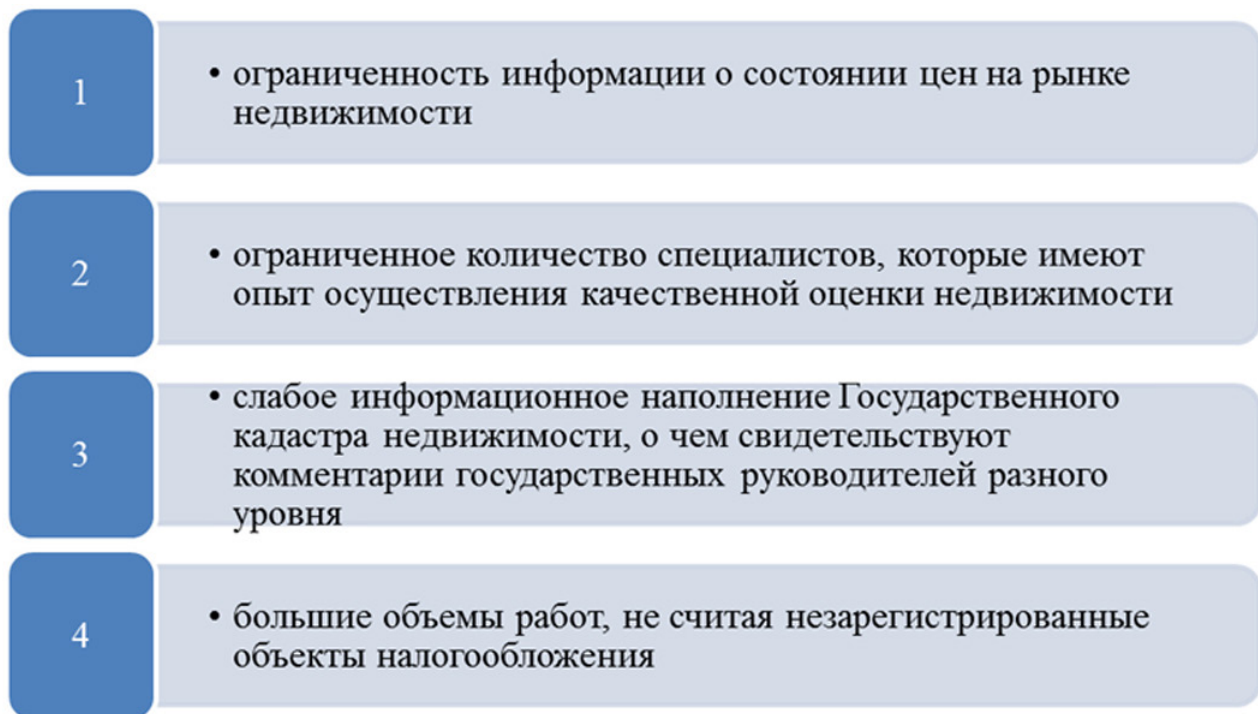


Рис. 6. Проблемы при исчислении земельного налога в РФ

Взимание имущественного налога в РФ не учитывает платежеспособности конкретного налогоплательщика. С целью уменьшения социальной напряженности в обществе подобные налоги следует вводить поэтапно, так как возможно недовольство со стороны слоев населения с низкими доходами.

Актуальный налог носит прогрессивный характер, и дорогостоящее имущество, которое принадлежит гражданам, обеспечивает значительную долю налоговых поступлений в муниципальные бюджеты, стимулирует экономику и социальную сферу на местном уровне.

При стоимости имущества, в отношении которого введена прогрессивная шкала, зачастую неприменима для жилых объектов из собственности физических лиц. Все же большее поступление имущественных налогов взимается с юридических, а не с физических лиц ввиду корректирующего коэффициента.

Заключение

Данная работа посвящена анализу основных причин, препятствующих формированию актуальной базы налогообложения недвижимого имущества в Российской Федерации. Представлены проблемы, устранение которых должно привести к существенной оптимизации налогообложения и, как следствие, к повышению поступлений в бюджет РФ. По итогам анализа поступлений имущественных налогов в консолидированный бюджет РФ оказалось, что они составляют почти 5 % в структуре всех налогов.

Полученные в работе результаты показывают, что дальнейшее совершенствование кадастрового учета недвижимого имущества и определение кадастровой стоимости позволит увеличить налоговые поступления в консолидированный бюджет Российской Федерации.

Библиографический список

1. Осенняя А. В., Хахук Б. А., Самарин С. В. Оспаривание кадастровой стоимости объектов недвижимости // Вопросы региональной экономики. 2022. № 2 (51). С. 195–205.
2. Осенняя А. В., Хахук Б. А., Быстрова А. В. и др. Тенденции развития российской системы учета и регистрации прав на объекты недвижимости. Часть II // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2022. № 12. С. 787–791. DOI: 10.33920/sel-04-2212-05.
3. Науменко Н. О., Осенняя А. В. Противоречивость информации, содержащейся в едином государственном реестре недвижимости и градостроительной документации // Кадастр недвижимости, геодезия, организация землепользования: опыт практического применения: Материалы всероссийской (национальной) заочной научно-практической конференции, Барнаул, 20 апреля 2022 года. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2022. С. 160–166.
4. Осенняя А. В., Науменко Н. О. Регулирование земельных отношений на примере города Краснодара // Устойчивое развитие земельно-имущественного комплекса муниципального образования: землеустроительное, кадастровое и геодезическое сопровождение: сборник научных трудов по материалам III Национальной научно-практической конференции, Омск, 24 ноября 2022 года. Омск: Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, 2022. С. 188–194.
5. Закон РФ от 27.12.1991 № 2118-1 (ред. от 11.11.2003) «Об основах налоговой системы в Российской Федерации» (с изм. и доп., вступающими в силу с 01.01.2004) [Электронный ресурс] КонсультантПлюс. Версия Проф. URL: <https://legalacts.ru/doc/zakon-rf-ot-27121991-n-2118-1-ob/>
6. Налоговый кодекс Российской Федерации (часть первая) от 31.07.1998 № 146-ФЗ (ред. от 04.08.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.10.2023) [Электронный ресурс] КонсультантПлюс. Версия Проф. URL: <https://legalacts.ru/kodeks/NK-RF-chast-1/>
7. Закон РФ от 09.12.1991 № 2003-1 (ред. от 02.11.2013) «О налогах на имущество физических лиц» [Электронный ресурс] КонсультантПлюс. Версия Проф. URL: <https://legalacts.ru/doc/zakon-rsfsr-ot-09121991-n-2003-1-o/>
8. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 04.08.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.10.2023) [Электронный ресурс] КонсультантПлюс. Версия Проф. URL: <https://legalacts.ru/kodeks/ZK-RF/>
9. Федеральный закон «Об оценочной деятельности в Российской Федерации» от 29.07.1998 № 135-ФЗ (принят ГД РФ 16.07.1998, одобрен СФ РФ 17.07.1998): ред. от 19.12.2022: [Электронный ресурс] КонсультантПлюс. Версия Проф. URL: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-29071998-n-135-fz-ob/>

10. Федеральный закон «О государственной кадастровой оценке» (с изм. и доп., вступ. в силу с 11.01.2023) от 03.07.2016 № 237-ФЗ (принят ГД РФ 22.06.2016, одобрен СФ РФ 29.06.2016): ред.от 19.12.2022: [Электронный ресурс] КонсультантПлюс. Версия Проф. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200504/

11. Приказ Минэкономразвития России от 25.09.2014 № 611 (ред. от 14.04.2022) «Об утверждении федерального стандарта оценки «Оценка недвижимости (ФСО № 7)» [Электронный ресурс] КонсультантПлюс. Версия Проф. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?>

12. Федеральный закон от 13.07.2015 № 218-ФЗ (ред. от 04.08.2023) «О государственной регистрации недвижимости» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.10.2023) [Электронный ресурс] КонсультантПлюс. ВерсияПроф. URL: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-13072015-n-218-fz-o/>

13. Федеральный закон от 24.07.2007 № 221-ФЗ (ред. от 24.07.2023) «О кадастровой деятельности» [Электронный ресурс] КонсультантПлюс. Версия Проф. URL: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-24072007-n-221-fz-o/>

14. Приказ Минэкономразвития РФ от 22.06.2015 № 387 «Об установлении формы карты-плана территории и требований к ее подготовке, формы акта согласования местоположения границ земельных участков при выполнении комплексных кадастровых работ и требований к его подготовке» // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов.

Дата поступления: 03.12.2023

Решение о публикации: 01.03.2024

Контактная информация

МЕРКУШЕВА Виктория Сергеевна — канд. экон. наук, доцент; vika.merkusheva@bk.ru

АФОНИН Дмитрий Андреевич — канд. техн. наук, доцент; afonin83@yandex.ru

ПОЛИКАРПОВ Анатолий Михайлович — канд. техн. наук, доцент; anatolipolikarp@mail.ru

The transition from the inventory value of real estate to the cadastral value in the taxation of real estate of individuals: the process and its consequences

A. M. Polikarpov¹, V. S. Merkusheva², V. S. Afonin²

¹ St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M.Kirov, Russian Federation, 194021, St. Petersburg, Institutsky lane 5, building.1

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

For citation: Polikarpov A. M., Merkusheva V. S., Afonin V. S. The transition from the inventory value of real estate to the cadastral value in the taxation of real estate of individuals: the process and its consequences // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 123–134. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-123-134

Annotation

Purpose: to consider the process of changing the calculation of taxation in Russia in recent years, its procedure and the consequences of changing the calculation of real estate tax. To show the need to change the introduced progressive scale of property tax for owners of residential facilities. To assess the possibility of changing the methods of calculating the base for taxation of individuals. **Methods:** analysis of the chronology of the establishment of taxes in the Russian Federation and the transition of recalculation of land tax in time. Comparison of tax calculation by inventory and cadastral values, property taxes in the Russian Federation. **Results:** the main reasons preventing the formation of an objective base for property taxation are identified: the insufficiency and unreliability of the information used, including at the initial stage of applying mass valuation of property as initial data and the imperfection of the developed methodology of cadastral valuation. **Practical significance:** historically, with the formation of states, a fiscal system was introduced. Taxation of real estate in modern Russia is regulated by a set of regulatory documents. Among the basic concepts of the field of taxation, the concept of the real estate tax base should be highlighted – the monetary expression of income from the sale of an immovable object. Thus, in recent years, changes have been made in the definition of the real estate tax base, which has a key impact on the formation of both the value and valuation of real estate and the formation of the fiscal policy itself in Russia. This article examines the process of changing the calculation of taxation in Russia in recent years, its procedure and the consequences of changing the calculation of real estate tax.

Keywords: State cadastral registration of real estate, unified state register of real estate, real estate valuation, inventory of real estate, taxation of real estate.

References

1. Osennyyaya A. V., Hahuk B. A., Samarin S. V. Osparivanie kadastrovoj stoimosti ob'ektov nedvizhimosti // Voprosy regional'noj ekonomiki. 2022. № 2 (51). S. 195–205. (In Russian)
2. Osennyyaya A. V., Hahuk B. A., Bystrova A. V. i dr. Tendencii razvitiya rossijskoj sistemy ucheta i registracii prav na ob'ekty nedvizhimosti. Chast' II / Zemleustrojstvo, kadastr i monitoring zemel'. 2022. № 12. S. 787–791. DOI: 10.33920/sel-04-2212-05. (In Russian)
3. Naumenko N. O., Osennyyaya A. V. Protivorechivost' informacii, sodержashchejsya v edinom gosudarstvennom reestre nedvizhimosti i gradostroitel'noj dokumentacii // Kadastr nedvizhimosti, geodeziya, organizaciya zemlepol'zovaniya: opyt prakticheskogo primeneniya: Materialy vsrossijskoj (nacional'noj) zaochnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Barnaul, 20 aprelya 2022 goda. Barnaul : Altajskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2022. S. 160–166. (In Russian)
4. Osennyyaya A. V., Naumenko N. O. Regulirovanie zemel'nyh otnoshenij na primere goroda Krasnodara // Ustojchivoe razvitie zemel'no-imushchestvennogo kompleksa municipal'nogo obrazovaniya: zemleustroitel'noe, kadastrovoe i geodezicheskoe soprovozhdenie: sbornik nauchnyh trudov po materialam III Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii, Omsk, 24 noyabrya 2022 goda. Omsk: Omskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet imeni P. A. Stolypina, 2022. S. 188–194. (In Russian)
5. Zakon RF ot 27.12.1991 № 2118-1 (red. ot 11.11.2003) “Ob osnovah nalogovoj sistemy v Rossijskoj Federacii” (s izm. i dop., vstupayushchimi v silu s 01.01.2004) [Elektronnyj resurs] Konsul'tantPlyus. Versiya Prof. URL: <https://legalacts.ru/doc/zakon-rf-ot-27121991-n-2118-1-ob/> (In Russian)

6. Nalogovyj kodeks Rossijskoj Federacii (chast' pervaya) ot 31.07.1998 № 146-FZ (red. ot 04.08.2023) (s izm. i dop., vstup. v silu s 01.10.2023) [Elektronnyj resurs] Konsul'tantPlyus. Versiya Prof. URL: <https://legalacts.ru/kodeks/NK-RF-chast-1/> (In Russian)

7. Zakon RF ot 09.12.1991 № 2003-1 (red. ot 02.11.2013) "O nalogah na imushchestvo fizicheskikh lic" [Elektronnyj resurs] Konsul'tantPlyus. Versiya Prof. URL: <https://legalacts.ru/doc/zakon-rsfsr-ot-09121991-n-2003-1-o/> (In Russian)

8. Zemel'nyj kodeks Rossijskoj Federacii ot 25.10.2001 № 136-FZ (red. ot 04.08.2023) (s izm. i dop., vstup. v silu s 01.10.2023) [Elektronnyj resurs] Konsul'tantPlyus. Versiya Prof. URL: <https://legalacts.ru/kodeks/ZK-RF/> (In Russian)

9. Federal'nyj zakon "Ob ocenочноj deyatelnosti v Rossijskoj Federacii" ot 29.07.1998 № 135-FZ (prinyat GD RF 16.07.1998, odobren SF RF 17.07.1998); red. ot 19.12.2022: [Elektronnyj resurs] Konsul'tantPlyus. Versiya Prof. URL: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-29071998-n-135-fz-ob/> (In Russian)

10. Federal'nyj zakon "O gosudarstvennoj kadastrovoj ocenke" (s izm. i dop., vstup. v silu s 11.01.2023) ot 03.07.2016 № 237-FZ (prinyat GD RF 22.06.2016, odobren SF RF 29.06.2016); red. ot 19.12.2022: [Elektronnyj resurs] Konsul'tantPlyus. Versiya Prof. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200504/ (In Russian)

11. Prikaz Minekonomrazvitiya Rossii ot 25.09.2014 № 611 (red. ot 14.04.2022) «Ob utverzhdenii federal'nogo standarta ocenki "Ocenka nedvizhimosti (FSO № 7)" [Elektronnyj resurs] Konsul'tant plyus. Versiya Prof. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?> (In Russian)

12. Federal'nyj zakon ot 13.07.2015 № 218-FZ (red. ot 04.08.2023) "O gosudarstvennoj registracii nedvizhimosti" (s izm. i dop., vstup. v silu s 01.10.2023) [Elektronnyj resurs] Konsul'tantPlyus. Versiya Prof. URL: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-13072015-n-218-fz-o/> (In Russian)

13. Federal'nyj zakon ot 24.07.2007 № 221-FZ (red. ot 24.07.2023) "O kadastrovoj deyatelnosti" [Elektronnyj resurs] Konsul'tantPlyus. Versiya Prof. URL: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-24072007-n-221-fz-o/> (In Russian)

14. Prikaz Minekonomrazvitiya Rossijskoj Federacii ot 22.06.2015 № 387 "Ob ustanovlenii formy karty-plana territorii i trebovanij k ee podgotovke, formy akta soglasovaniya mestopolozheniya granic zemel'nyh uchastkov pri vypolnenii kompleksnyh kadastryh rabot i trebovanij k ego podgotovke" // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tehnicheskikh dokumentov. (In Russian)

Received: 03.12.2023

Accepted: 01.03.2024

Author's information:

Viktoriya S. MERKUSHEVA – PhD in Economy, Associate Professor: vika.merkusheva@bk.ru

Dmitrij A. AFONIN – PhD in Engineering, Associate Professor: afonin83@yandex.ru

Anatolij M. POLIKARPOV – PhD in Engineering, Associate Professor: anatolipolikarp@mail.ru

УДК: 338.47

Развитие подходов к оценке эффективности функционирования пассажирских транспортно-пересадочных узлов

Е. М. Волкова¹, А. В. Гурьянов²

¹ Кафедра «Экономика транспорта». Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия, Санкт-Петербург

Для цитирования: Волкова Е. М., Гурьянов А. В. Развитие подходов к оценке эффективности функционирования пассажирских транспортно-пересадочных узлов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 135–142. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-135-142

Аннотация

Цель: в статье предложен метод оценки эффективности работы пассажирских транспортно-пересадочных узлов, основанный на ключевых принципах управления операциями. **Методы:** для достижения цели исследования используются методы расчета коэффициентов, оценивающих соблюдение основных принципов управления операциями, методы статистического анализа и обработки данных, метод имитационного моделирования. Для выполнения исследования были использованы материалы научных трудов по выбранной теме, периодических изданий, а также интернет-ресурсов, в том числе открытых данных Комитета по транспорту г. Санкт-Петербурга. **Результаты:** основным научным результатом является разработанный автором метод оценки эффективности функционирования пассажирских транспортно-пересадочных узлов, основанный на ключевых принципах управления операциями. Предложенный метод учитывает специфику и характеристики пассажирских транспортно-пересадочных узлов и может использоваться на любой стадии их жизненного цикла, в том числе и на проектной. В отличие от имеющихся методов предложенная методика позволяет своевременно обнаружить и ликвидировать узкие места в планировочных решениях пассажирского транспортно-пересадочного узла. **Практическая значимость:** в результате апробации методики на примере проекта транспортно-пересадочного узла «Волковская» сформированы практические рекомендации по ликвидации узких мест и увеличению пропускной способности объекта. Авторские разработки могут найти применение в исполнительных органах государственной власти, ответственных за развитие городской транспортной инфраструктуры, и в проектных организациях в процессах планирования строительства и модернизации пассажирских транспортно-пересадочных узлов, а также при проведении оценки эффективности их работы.

Ключевые слова: городской транспорт, пассажирский транспорт, транспортная инфраструктура, пассажирские перевозки, транспортно-пересадочный узел, управление операциями, имитационное моделирование.

Введение

Эффективное управление городскими транспортными системами в современных условиях предполагает их функционирование с учетом концепции синхромодализма, предполагающей гибкость логистических цепочек и возможность быстрого изменения их конфигурации. Применительно к городскому пассажирскому транспорту это выражается в согласованном развитии различных видов общественного и личного транспорта, продуманной организации мультимодаль-

ных поездок, нацеленной на сокращение потерь времени. В структуре времени мультимодальной пассажирской поездки можно выделить следующие элементы: время на перемещение от/до остановочного пункта, время на поездку (по видам транспорта), время на ожидание транспорта, время на пересадку. Значительная часть затраченного пассажиром времени, таким образом, будет определяться потерями времени на ожидание и пересадку. Минимизация данных потерь возможна при условии согласованного расписания движения пассажирского транспорта и эффективной работы пассажирских транспортно-пересадочных узлов. Последний аспект определил постановку цели и задач данного исследования.

Вопросам оценки качества и эффективности эксплуатации транспортно-пересадочных узлов уделяется внимание во многих трудах отечественных и зарубежных исследователей. Содержание дефиниции «транспортно-пересадочный узел» раскрыто в работе В. А. Воронова [1]. Классификация ТПУ с участием железнодорожного транспорта, их эволюция и мировой опыт развития детально рассмотрены в работах С. П. Вакуленко [2]. Разнообразие функций транспортно-пересадочных узлов анализирует О. Д. Покровская [3]. Применение инструментария математического моделирования для оптимизации пассажирских потоков на территории ТПУ предложено в работе Yuting Zhu [4]. Подход к оценке качества работы транспортно-пересадочного узла предложен Т. Копыловой и др. Авторы отмечают, что качество работы ТПУ определяется в первую очередь временем пересадки, которое может варьировать в зависимости от ее вида. Н. Ю. Евреенова [5] также предлагает авторскую методику оценки качества работы транспортно-пересадочного узла, включая в перечень показателей для оценки не только затраты времени, но и пропускную способность, востребованность ТПУ у пассажиров, а также показатели разгрузки улично-дорожной сети вследствие работы транспортно-пересадочного узла.

Отметим, что имеющиеся методы оценки работы пассажирских транспортно-пересадочных узлов основываются на качестве транспортного обслуживания, предполагают проведение опросов пассажиров. Не умаляя значения данного аспекта, в данной работе мы предлагаем дополнить эти методы объективными характеристиками работы ТПУ, основанными на принципах управления операциями с использованием эмпирических данных. Кроме того, имеет смысл разработка методики оценки эффективности работы ТПУ, применимой не только на стадии его эксплуатации, но и на стадии проектной разработки. Таким образом, целью данного исследования является разработка метода оценки эффективности работы пассажирских транспортно-пересадочных узлов, основанного на ключевых принципах управления операциями.

Материалы и методы

Для получения результатов исследования были использованы теоретические основы управления операциями, с помощью которых были раскрыты шесть

ключевых принципов применительно к пассажирским транспортно-пересадочным узлам. Для оценки соблюдения выделенных принципов использовались методы статистического наблюдения и обработки статистической информации. Для определения прогнозных показателей по проектным характеристикам ТПУ «Волковская» были использованы методы и средства имитационного моделирования. Источниками информации для проведения исследования выступали научные труды, посвященные проблемам оценки эффективности работы ТПУ, а также проект ТПУ «Волковская», разработанный ООО «Архиди». Некоторые статистические данные были получены путем анализа информации по объектам-аналогам и по данным иных открытых источников.

Результаты

Методы оценки эффективности функционирования пассажирских транспортно-пересадочных узлов должны базироваться на разработанной методологической основе и учитывать особенности современного этапа развития данных объектов. К последним можно отнести в первую очередь расширение функционала пассажирских транспортно-пересадочных узлов, которое схематично представлено на рис. 1.

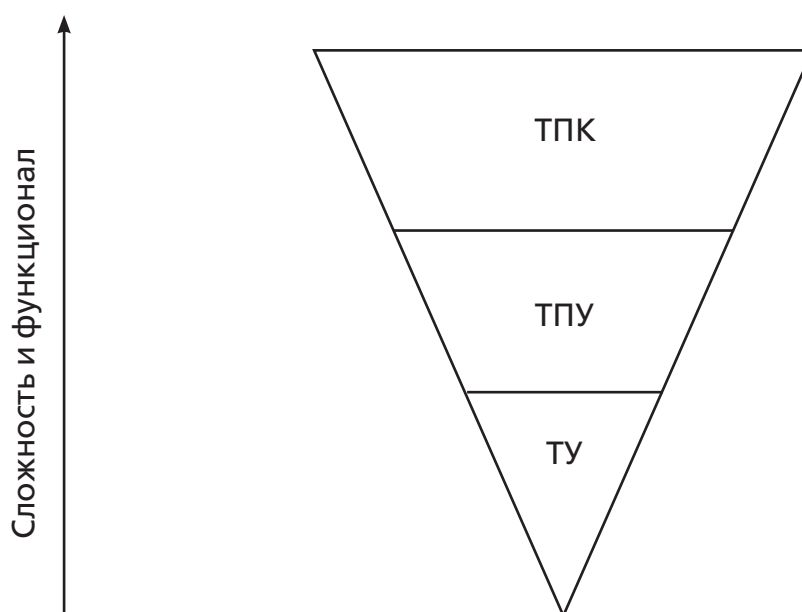


Рисунок 1. Расширение функциональной составляющей пассажирского транспортно-пересадочного узла (ТУ — транспортный узел, ТПУ — транспортно-пересадочный узел, ТПК — транспортно-пересадочный комплекс)

Источник: составлено автором

Как видно из рис. 1, ТПУ по мере расширения функций превращается в транспортно-пересадочный комплекс, на территории которого оказываются различные виды услуг, функционируют бытовые, торгово-развлекательные, сервисные, деловые структуры. С одной стороны, это делает проекты новых пассажирских транспортно-пересадочных узлов привлекательными для частных инвесторов. С другой стороны, избыточное развитие дополнительных сервисов на территории ТПУ приводит к затруднению навигации пассажиров и увеличению времени на пересадку. Существуют примеры того, как дополнительные функции снижают эффективность транспортно-пересадочных узлов. В частности, к ним можно отнести ТПУ «Планерная» в Москве, планировка которого предполагает переход пассажиров между остановочными пунктами через территорию торгового комплекса [6]. Следовательно, на современном этапе развития планировочные решения и грамотное зонирование территории ТПУ приобретают особую значимость для обеспечения его эффективной работы. Это необходимо учитывать при разработке методов оценки эффективности функционирования пассажирских ТПУ.

Предлагаемый автором метод основывается на ключевых принципах управления операциями. Каждый принцип последовательно раскрывается: сначала с точки зрения формулировки, затем с точки зрения оценки (разрабатывается соответствующий коэффициент). В компактном виде метод оценки эффективности функционирования пассажирского транспортно-пересадочного узла представлен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Метод оценки эффективности функционирования пассажирского транспортно-пересадочного узла

Принцип	Формула для оценки соблюдения (коэффициент)	Пределы изменения коэффициента	Эталон коэффициента
1. Принцип рационального размещения функциональных зон на территории ТПУ	$K_1 = \frac{N_z}{N_f}$ <p>где N_z — количество выделенных зон; N_f — количество выполняемых функций.</p>	$0 < K_1 < 1$	1
2. Принцип баланса пропускной способности смежных участков ТПУ	$K_2 = \frac{P_1}{P_2 \cdot \gamma}$ <p>где P_1 — количество пассажиров, проходящих по территории участка 1 (чел./ч); P_2 — то же, участка 2 (чел./ч); γ — доля пассажиров, переходящих между смежными участками.</p>	$-\infty < K_2 < +\infty$	1

3. Принцип совмещения во времени операций по обслуживанию	$K_3 = \frac{T_{max}}{T}$ <p>где T_{max} — время обслуживания пассажира при отсутствии совмещения операций во времени, ч; T — среднее время обслуживания пассажира (фактическое с учетом совмещения операций), ч.</p>	$1 < K_3 < +\infty$	$K_3 \rightarrow +\infty$
4. Принцип сокращения потерь времени пассажира	$K_4 = \frac{T_s}{T_s + T_w}$ <p>де T_s — время на операции по обслуживанию пассажира; T_w — время ожидания пассажира (в очереди, в ожидании подачи транспортного средства).</p>	$0 < K_4 < 1$	1
5. Принцип передвижения пассажира по кратчайшему пути	$K_5 = \frac{T_{tr.min}}{T_{tr}}$ <p>где $T_{tr.min}$ — время движения пассажира по кратчайшему пути; T_{wait} — фактические затраты времени пассажира.</p>	$0 < K_5 < 1$	1
6. Принцип резервирования пропускной способности ТПУ	$K_6 = \frac{P_{max}}{P}$ <p>где P_{max} — максимальная мощность ТПУ, чел./ч; P — фактическая мощность ТПУ, чел./ч.</p>	$1 < K_6 < +\infty$	$K_6 \rightarrow +\infty$

Апробация предложенного метода проведена с использованием данных проекта транспортно-пересадочного узла «Волковская» (г. Санкт-Петербург), разработанного ООО «Архиди» при участии ИЭРТ. Для получения значений показателей, используемых в расчетах, применялись методы и средства имитационного моделирования. Результаты апробации показаны в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты апробации

Принцип	Значение коэффициента	Соответствие значения эталонному
1. Принцип рационального размещения функциональных зон на территории ТПУ	0,80	соответствует
2. Принцип баланса пропускной способности смежных участков ТПУ	0,67	не соответствует
3. Принцип совмещения во времени функций ТПУ	1,56	соответствует
4. Принцип сокращения потерь времени пассажира	0,75	соответствует
5. Принцип передвижения пассажира по кратчайшему пути	0,75	соответствует
6. Принцип резервирования пропускной способности ТПУ	0,82	соответствует

Как видно из табл. 2, значение коэффициента K_2 не соответствует эталону, что свидетельствует о несоблюдении принципа баланса пропускной способности смежных участков ТПУ. Более детальный анализ планировки транспортно-пересадочного узла позволит выявить на его территории потенциальное узкое место — участок, ограничивающий пропускную способность. Это небольшой проход между зонами ТПУ, расширение которого сможет решить выявленную проблему и сбалансировать пропускную способность смежных зон. Таким образом, рекомендуется доработка данного проекта в части ликвидации потенциального узкого места.

Обсуждение результатов и выводы

Предложенный метод оценки эффективности функционирования пассажирского транспортно-пересадочного узла характеризуется рядом ограничений. Так, он может быть доработан для ТПУ различных видов (плоскостные, многоуровневые, с наличием перехватывающих парковок и др.), обладающих особенностями, существенными для оценки. Кроме того, зачастую эффективность и востребованность ТПУ определяется в большей степени внешними факторами, чем внутренней организацией и планировкой, поэтому в перспективе следовало бы дополнить методику оценкой расположения ТПУ, его встраивания в окружающую территорию. Однако при имеющихся недостатках методика может служить отправной точкой для оценки эффективности пассажирских ТПУ на стадии проекта, что смогло бы предотвратить появление узких мест на стадии их эксплуатации. При этом полученные результаты во многом будут определяться достоверностью исходных данных и грамотным выбором метода имитационного моделирования.

Предложенный метод может найти практическое применение в исполнительных органах государственной власти, ответственных за развитие городской транспортной инфраструктуры, и в проектных организациях в процессах планирования строительства и модернизации пассажирских транспортно-пересадочных узлов, а также при проведении оценки эффективности их работы.

Библиографический список

1. Воронов В. А. Транспортно-пересадочные узлы и интермодальные комплексы. Термины и определения / В. А. Воронов, К. Ю. Чистяков // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020. № 3 (52). С. 252–264.
2. Вакуленко С. П., Евреенова Н. Ю. Техническое оснащение и технология работы транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта. М.: МИИТ, 2015. 195 с.

3. Pokrovskaya O., Kurenkov P., Goncharenko S., et al. Evolutionary and functional development of transport nodes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. VIII International Scientific Conference “Transport of Siberia 2020”. 2020. P. 012033.

4. Zhu Y., Hu C., Xu D., et al. Research on Optimization for Passenger Streamline of Hubs // Procedia. Social and Behavioral Sciences. 2014. 138. P. 776–782.

5. Евреенова Н. Ю. Выбор параметров транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта: автореф. дис. ... канд. техн. наук, специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок». М.: МИИТ, 2014. 22 с.

6. Волкова Е. М., Кононов Д. П. Оценка эффективности функционирования пассажирских транспортных хабов / Транспорт: проблемы, идеи, перспективы. Сб. трудов LXXXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т. СПб.: ПГУПС, 2023. С. 114–118.

Дата поступления: 23.12.2023

Решение о публикации: 01.03.2024

Контактная информация

ВОЛКОВА Елена Михайловна — канд. экон. наук, доцент, Moonlight34@ya.ru

ГУРЬЯНОВ Андрей Владимирович — докт. экон. наук, доцент, e-mail: siluckova@yandex.ru

Development of approaches for the assessment of passenger transport hubs efficiency

E. M. Volkova¹, A. V. Guryanov²

¹ Department of Transport Economics. Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

For citation: *Volkova E. M., Guryanov A. V.* Development of approaches for the assessment of passenger transport hubs efficiency // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 135–142. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-135-142

Abstract

Objective: the article proposes a method for assessing the efficiency of passenger transport hubs, based on the key principles of operation management. **Methods:** to achieve the goal of the study, methods of calculating coefficients evaluating compliance with the basic principles of operations management, methods of statistical analysis and data processing, and the method of simulation are used. To carry out the research, materials from scientific papers on the chosen topic, periodicals, as well as Internet resources, including open data from the St. Petersburg Transport Committee, were used. **Results:** the main scientific result is a method developed by the author to evaluate the efficiency of passenger transport hubs, based on the key principles of operations management. The proposed method takes into account the specifics and characteristics of passenger transport hubs and can be used at any stage of their life cycle, including at the design stage. Unlike the available methods, the proposed methodology allows timely detection and elimination of “bottlenecks” in the planning solutions of a passenger transport hub. **Practical significance:** as a result of testing the methodology on the example of the Volkovskaya transport interchange hub project, practical recommendations were formed to eliminate bottlenecks and increase the capacity of the facility. The

author's developments can be used in the executive bodies of state power responsible for the development of urban transport infrastructure, and in design organizations in the planning processes for the construction and modernization of passenger transport hubs, as well as in evaluating the effectiveness of their work.

Keywords: urban transport, passenger transport, transport infrastructure, passenger transportation, transport hub, operations management, simulation modelling.

References

1. Voronov V. A. Transportno-peresadochnye uzly i intermodal'nye komplekсы. Terminy i opredelenija / V. A. Voronov, K. Ju. Chistjakov // Architecture and Modern Information Technologies. 2020. № 3 (52). S. 252–264. (In Russian)
2. Vakulenko S. P., Evreenova N. Ju. Tehnicheskoe osnashhenie i tehnologija raboty transportno-peresadochnyh uzlov, formiruemyh s uchastiem zheleznodorozhnogo transporta. M.: MIIT, 2015. 195 s. (In Russian)
3. Pokrovskaya O., Kurenkov P., Goncharenko S., et al. Evolutionary and functional development of transport nodes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. VIII International Scientific Conference “Transport of Siberia 2020”. 2020. P. 012033.
4. Zhu Y., Hu C., Xu D., et al. Research on Optimization for Passenger Streamline of Hubs // Procedia. Social and Behavioral Sciences. 2014. 138. P. 776–782.
5. Evreenova N. Ju. Vybor parametrov transportno-peresadochnyh uzlov, formiruemyh s uchastiem zheleznodorozhnogo transporta: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk, special'nost' 05.22.08 «Upravlenie processami perevozok». M.: MIIT, 2014. 22 s. (In Russian)
6. Volkova E. M., Kononov D. P. Ocenka jeffektivnosti funkcionirovanija passazhirskih transportnyh habov / Transport: problemy, idei, perspektivy. Sb. trudov LXXXIII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh: v 2 t. SPb.: PGUPS, 2023. S. 114–118. (In Russian)

Received: 23.12.2023

Accepted: 01.03.2024

Author's information

Elena M. VOLKOVA — PhD in Economy, Moonlight34@ya.ru

Andrey V. GURYANOV — Dr. Sci. in Economy, siluckova@yandex.ru

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 625.033.34

Обзор методов контроля и диагностики систем накопления электрической энергии

Си Чжэньчао, К. В. Константинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф.

Для цитирования: Си Чжэньчао, Константинов К. В. Обзор методов контроля и диагностики систем накопления электрической энергии // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 143–154. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-143-154

Аннотация

Цель: обзор текущей ситуации и перспективных направлений развития технологии тестирования систем хранения электрической энергии на базе литийионных аккумуляторных батарей. **Методы:** используя литературный анализ, были проведены обзор и систематизация истории развития технологии контроля литийионных аккумуляторных систем и проведено сравнение преимуществ и недостатков наиболее распространенных методов определения состояния заряда (SOC). **Результаты:** литийионные аккумуляторные системы представляют собой неизбежную тенденцию в будущем электрохимического хранения энергии. Для повышения их стабильности и экономической эффективности необходимо, чтобы системы диагностики позволяли с достаточной точностью определять внутренние параметры аккумулятора и быстро диагностировать типы неисправностей. В будущем исследования в этой области будут продолжаться в направлении улучшения точности систем сбора данных и создания точных цифровых моделей аккумуляторов. **Практическая значимость:** проведены обзор и систематизация истории развития технологии контроля состояния литийионных аккумуляторных систем с целью выявления текущих проблем и перспективных направлений будущих исследований в данной области.

Ключевые слова: системы хранения электрической энергии, технология диагностики литийионных аккумуляторов, системы управления батареями, метод ампер-временного интегрирования, метод напряжения разомкнутой цепи, модель эквивалентной RC-цепи второго порядка, системы сбора данных, цифровая модель аккумулятора.

В условиях быстрого развития мировой экономики истощение ископаемых источников энергии привело к возникновению ряда серьезных проблем, охватывающих целый ряд ключевых областей, включая электроэнергетику, транспорт и экологию. Эта проблема побуждает страны мира активно разрабатывать новые энергетические технологии. Правительство Китая в 2020 году поставило двойную цель по сокращению выбросов углекислого газа: не допускать дальнейшего роста выбросов углекислого газа после достижения пика в 2030 году и достичь углеродной нейтральности к 2060 году. В соответствии с данным стратегическим направлением энергетический сектор Китая пережил значительный технологический перелом, причем электрический транспорт и системы для хранения энергии (СНЭ) получили приоритетное развитие.

В настоящее время основные технологии хранения энергии, используемые в Китае, включают прежде всего гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), электрохимические системы накопления электрической энергии (СНЭЭ), накопители на маховиках и сжатом воздухе. По состоянию на 2022 год наибольшую долю накопителей энергии в Китае традиционно составляют гидроаккумулирующие станции, на долю которых приходится 77 % систем накопления энергии. Среди новых технологий хранения энергии доминируют накопители на литийионных батареях, на долю которых приходится 93,7 % оставшегося объема, что объясняется главным образом быстрорастущим рынком электромобилей и СНЭЭ. Продажи электромобилей достигли 6 872 000 единиц, рост за год составил 96 %, а объем поставок энергетических батарей достиг 480 ГВт·ч, рост за год составил 118,2 %. В секторе хранения энергии объем поставок литийионных батарей в Китае в 2022 году достиг 130 ГВт·ч, увеличившись на 170,8 % по сравнению с предыдущим годом. Литиевый рынок переживает бум, но в то же время на первый план выходит ряд проблем, наиболее заметной из которых является безопасность СНЭЭ. В связи с этим фактом системы управления питанием (Battery management system, BMS) стали одним из ведущих направлений исследований. Согласно статистическим данным, с 2014 по 2022 год спрос на системы управления аккумуляторными батареями в Китае вырос с 81 000 до 4 845 000 комплектов, в 2022 году объем китайского рынка систем управления питанием достиг 23,53 млрд юаней, и ожидается, что в будущем он будет продолжать расти.

Системы управления батареями (BMS). Ключом к развитию технологии тестирования электрохимических накопителей энергии является система управления батареями (BMS), которая имеет решающее значение для величины мощности, безопасности и стоимости электрохимических систем хранения энергии. В настоящее время СНЭЭ имеют высокую степень интеграции, устанавливаются в ограниченном пространстве, и, как следствие, локальная плотность энергии накопителей велика. Если происходит авария, то она обычно вызывает ряд цепных реакций, которые ставят под угрозу безопасность всей системы, поэтому к достоверности обнаружения и точности выходных данных системы BMS предъявляются высокие требования. Современная BMS контролирует ток и напряжение отдельного элемента батареи, способна управлять балансом заряда и разряда элемента, наблюдать за токами и температурами в процессе заряда и разряда батареи, определяет степень заряда аккумулятора (State of charge, SOC) и степень работоспособности аккумулятора (State of health, SOH), осуществляет связь с внешней системой заряда и мониторинга в реальном времени, координирует распределение мощности аккумуляторной батареи. Это позволяет предотвратить перезаряд, переразряд, перегрев и другие неисправности; увеличить срок службы батареи и обеспечить стабильную работу СНЭЭ в целом.

Основные функции системы управления батареями показаны на рис. 1.



Рис. 1. Основные функции системы управления батареями

В настоящее время основные направления развития BMS охватывают следующие аспекты:

- оценку внутренних параметров: использование измеряемых параметров, таких как ток, температура, напряжение, и создание динамической математической модели для точной оценки неизмеряемых внутренних параметров, таких как SOC, SOH;
- выравнивание мощности отдельных элементов батареи на основе измерения внутренних параметров (SOC, SOH) для достижения оптимальной производительности блока батарей;
- контроль внутренней температуры батарейного блока и терморегулирование во избежание необратимого повреждения;
- выявление и обработка ошибок.

Диагностика неисправностей литийионных накопителей энергии является одной из задач, решаемой BMS, и совершенный метод диагностики неисправностей может обеспечить безопасную работу СНЭЭ.

Неисправности литийионных накопителей энергии можно разделить на четыре вида:

1. Отказ системы безопасности — отказ, угрожающий безопасности пользователя, в основном вызванный тепловым выходом батареи из строя, например возгоранием аккумуляторного блока. Когда температура литиевого аккумулятора превышает 150 °С, элемент может загореться и взорваться.

2. Отказ аккумулятора — отказ батареи, в основном вызван случайным приостановлением зарядки и разрядки батареи, нарушающим нормальную работу системы накопления энергии. Такие отказы в основном вызваны внешним коротким замыканием батареи, нарушением изоляции батареи, перезарядкой, разрядкой, перегревом батареи, слишком большим зарядным и разрядным током.

3. Общие неисправности не приводят к прекращению работы системы хранения энергии, но влияют на емкость батареи и скорость заряда-разряда. К этому типу неисправностей относятся в основном неисправности, связанные с перепадом давления и температуры в батарее.

4. Аппаратные сбои вызваны отказом блока сбора информации о напряжении, токе, температуре и изоляции батареи, информация оказывается неточной, BMS не может эффективно управлять системой накопления энергии на основе собранной информации, система накопления энергии не может продолжать нормально работать. Этот тип неисправности в основном вызван нарушениями в линиях связи и питания датчиков.

В настоящее время основным методом диагностики неисправностей систем хранения энергии является метод диагностики неисправностей на основе моделей. Основная исследовательская трудность этого метода заключается в определении порога срабатывания сигнализации о неисправностях. В силу различных причин, таких как шумы датчиков системы, ошибки при сборе информации и погрешности в точности моделирования, слишком низкое пороговое значение приводит к ложным срабатываниям системы диагностики неисправностей. Если же порог слишком высок, то неисправность будет пропущена, что повлияет на общую безопасность эксплуатации системы хранения энергии. В работе Liu [1] были предложены методы диагностики и пороговые значения для различных типов неисправностей аккумуляторных батарей, например предложен метод диагностики и выявления неисправностей датчиков аккумуляторных батарей на основе модели с низкой вычислительной сложностью. Wu [2] провел серию экспериментов по тестированию характеристик неисправностей батарей при перезаряде, разряде и работе при низких температурах, Chen [3] исследовал характеристики неисправностей батарей при внешних коротких замыканиях.

Состояние заряда (State of charge, SOC) — это важный параметр, характеризующий состояние батареи, определяемый как количество заряда, которое имеет батарея при определенной температуре. Состояние полностью заряженной батареи при определенной температуре определяется как 100%, а состояние заряда, когда батарея уже не может разрядиться, — как 0%. Состояние заряда литиевых батарей является одним из наиболее критичных параметров для работы BMS, точная оценка SOC аккумуляторных батарей имеет большое значение для безопасности и производительности систем хранения энергии. Основными методами оценки SOC являются метод напряжения разомкнутой цепи, метод оценки внутреннего сопротивления и метод интегрирования ампер-времени.

Метод напряжения разомкнутой цепи — данный метод оценки SOC основан на зависимости между напряжением разомкнутой цепи (OCV) и SOC батареи. Различные типы батарей имеют определенные значения разности электрических потенциалов между электродами при отсутствии тока в цепи для различных значений SOC. Соответствие между SOC и OCV является нелинейным, поэтому, если для оценки SOC используется метод напряжения разомкнутой цепи, необходимо предварительно построить кривую OCV-SOC.

На рис. 2 показана кривая OCV-SOC батареи LiFePO₄, измеренная Китайской литиевой ассоциацией [4]. Метод напряжения разомкнутой цепи имеет преимущество быстрого и недорогого измерения, но на его точность сильно влияют длительная эксплуатация и экстремальные температурные условия, и этот метод не позволяет проводить мониторинг в режиме реального времени, то есть осуществлять функциональную диагностику СНЭЭ.

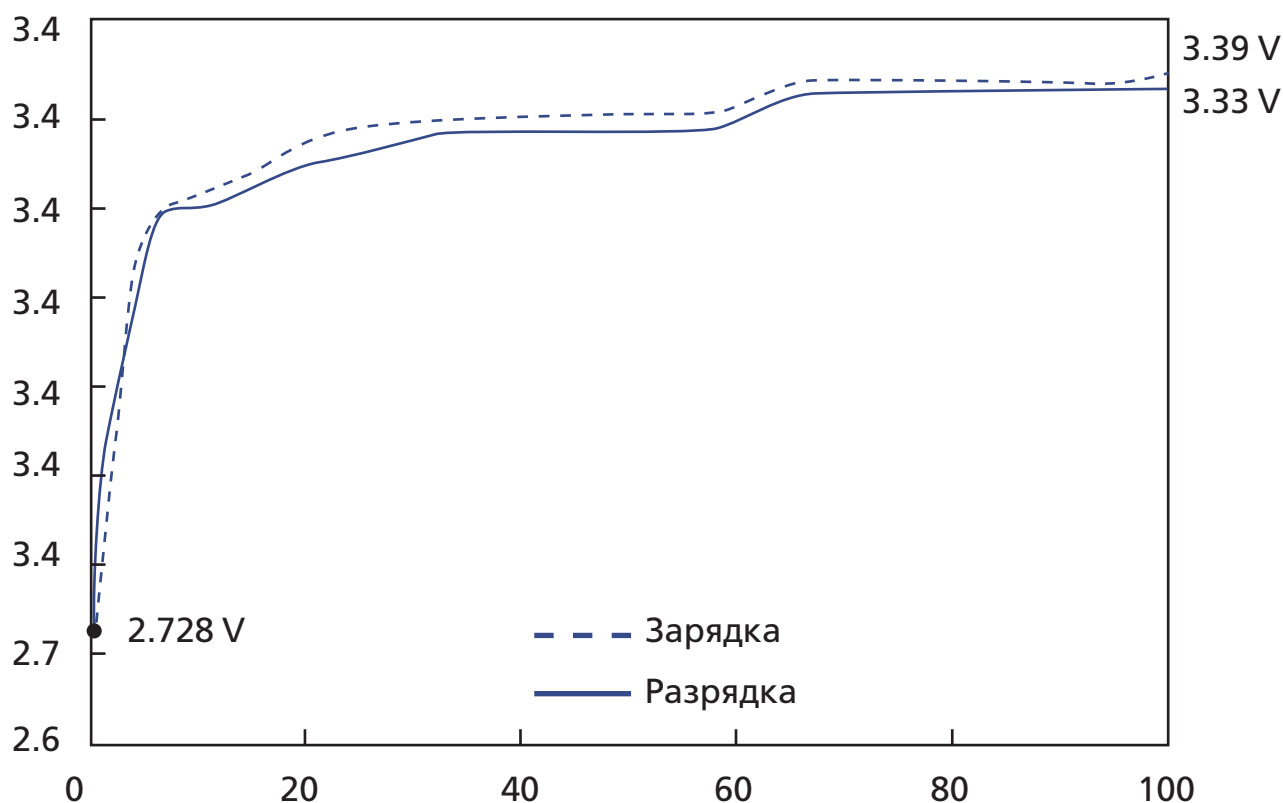


Рис. 2. Кривая OCV-SOC литий-железо-фосфатного аккумулятора

Метод оценки SOC по внутреннему сопротивлению — при этом методе используется зависимость между внутренним сопротивлением батареи и SOC. Обычно производитель батареи калибрует батарею при различных значениях SOC и строит кривую SOC-внутреннего сопротивления. Текущее состояние батареи можно оценить, сравнив фактически измеренное значение внутреннего сопротивления со значением на кривой. Точность метода ограничена рядом факторов, таких как колебания температуры и состояние контактных поверхностей батареи и т. п. Внутреннее сопротивление батареи R_0 в реальном времени может быть измерено в соответствии с изменениями напряжения и тока по следующей формуле:

$$R_0 + R_r = \Delta U / \Delta I$$

где: ΔU — разница между двумя измеренными значениями напряжения;

ΔI — разница между двумя измеренными значениями тока; R_p обозначает поляризованное внутреннее сопротивление литиевой батареи. Хотя этот метод может быть объединен с методом интегрирования по ампер-времени для оценки SOC силовых батарей на поздней стадии разряда, применение этого метода становится менее популярным по мере развития других интеллектуальных алгоритмов.

Метод ампер-временного интегрирования позволяет оценить SOC, отслеживая накопление тока во время зарядки и разрядки батареи. Уравнение для расчета SOC методом ампер-временного интегрирования выглядит следующим образом:

$$S_c = S_{co} - \frac{\int I_{eff} dt}{Q_{max}},$$

где S_c — остаточный заряд; S_{co} — начальный остаточный заряд; I_{eff} — ток батареи, который содержит внешний ток заряда и разряда, а также ток саморазряда; t — текущее время работы; Q_{max} — теоретическая максимальная емкость батареи.

Данный метод обеспечивает оценку SOC в реальном времени и более прост в реализации. В то же время метод ампер-временного интегрирования имеет определенные недостатки. Например, при длительной эксплуатации могут накапливаться ошибки интегрирования, что приводит к неточной оценке SOC. Этот метод обычно не учитывает старение батареи, что может привести к неточной оценке SOC в конце срока ее службы.

Метод интегрирования ампер-времени требует измерения только величины тока батареи по сравнению с методом сопротивления, поэтому его схема проще.

Каждый из этих трех методов оценки SOC имеет свои преимущества и недостатки, и на практике их обычно комбинируют для получения результатов, более соответствующих реальному рабочему состоянию батареи. Например, возможно объединить метод напряжения разомкнутой цепи с методом интегрирования по ампер-часам и использовать метод напряжения разомкнутой цепи для измерения SOC до и в конце работы батареи, чтобы скорректировать SOC, измеренное методом интегрирования по ампер-часам.

В процессе заряда-разряда литийионного аккумулятора существует определенная зависимость между током и напряжением. Наблюдая и анализируя кривые заряда-разряда, можно получить следующую информацию для оценки SOC.

Информация о напряжении: как уже говорилось выше, изменение напряжения на кривой заряда-разряда может дать некоторые подсказки о SOC аккумулятора. В различных диапазонах SOC характер изменения напряжения батареи различен, поэтому SOC можно оценить на основе тенденции изменения напряжения.

Информация о токе, характеристики тока на кривой заряда-разряда также могут дать некоторую информацию о SOC. Изменение тока может характеризовать состояние зарядки и разрядки батареи.

В соответствии с различными методами зарядки и разрядки процесс зарядки и разрядки литиевой батареи в основном подразделяется на зарядку постоянным током, зарядку постоянной мощностью, зарядку постоянным током и постоянным напряжением. Ток в процессе зарядки сначала остается постоянным и неизменным. Когда напряжение заряжается до верхней границы напряжения, то напряжение будет оставаться постоянным и неизменным, а ток постепенно уменьшается до заданного значения после окончания зарядки. На рис. 3.6 показаны кривые тока и напряжения этих процессов зарядки и разрядки.

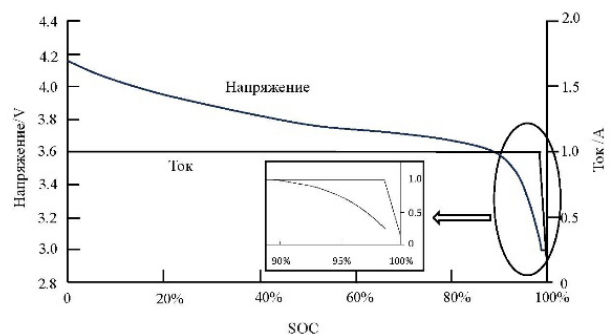
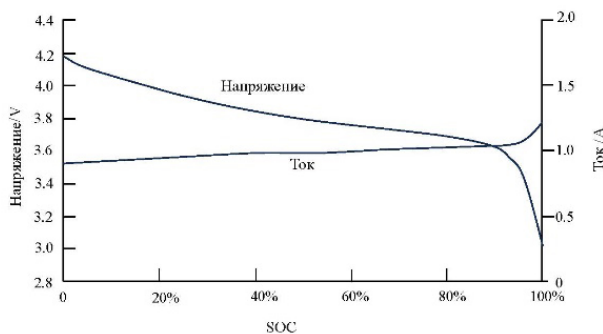
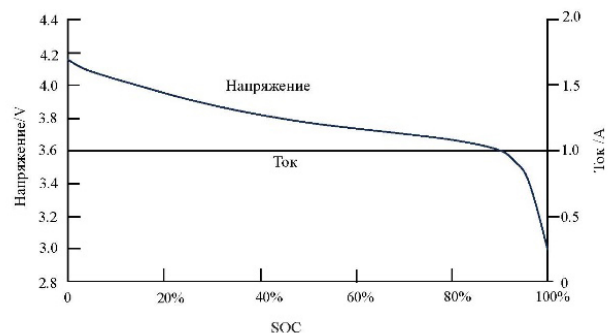
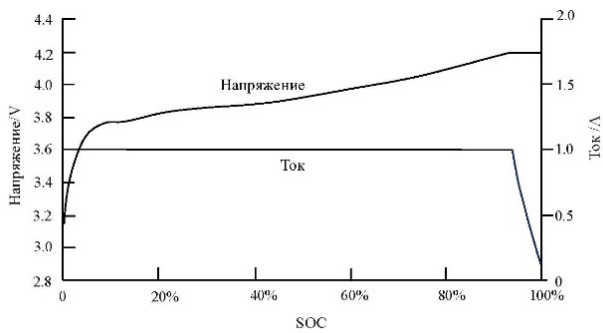
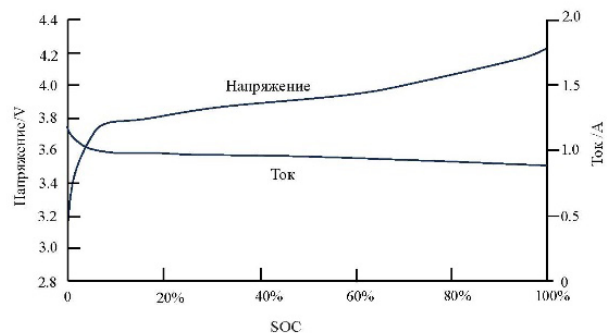
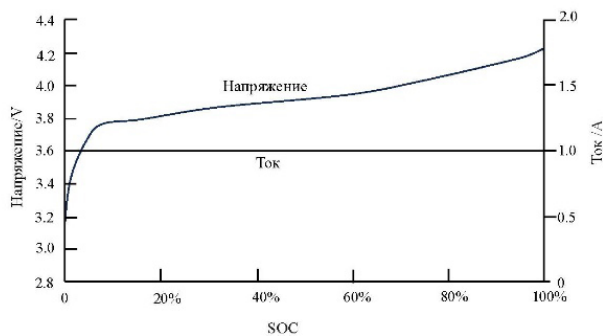


Рис. 3. Кривые тока и напряжения в процессе зарядки и разряда литиевой батареи

Для оценки SOC батареи может быть использована математическая модель аккумуляторной батареи. В соответствии с различиями в методах моделирования существует три основных типа математических моделей аккумуляторов:

Моделирование электрохимических процессов, которое используется для описания процессов электрохимических реакций в батарее. Физико-химические процессы, такие как перенос электронов и ионов, химические реакции, перенос заряда и энергии в батарее, моделируются с помощью дифференциальных уравнений. Несмотря на высокую точность, они обычно используются на этапе исследований и разработки батарей из-за высокой вычислительной сложности, что затрудняет их непосредственное применение в системах управления батареями с ограниченными вычислительными ресурсами.

Моделирование с управляемыми данными — модели, в которых взаимосвязь между входными и выходными сигналами батареи устанавливается путем анализа большого количества фактических данных о работе батареи и применения алгоритмов искусственного интеллекта. В отличие от традиционных моделей, основанных на физических принципах, в моделях, управляемых данными, не требуется учитывать внутреннее устройство батареи, а для изучения ее поведения используются сами данные. Точность и эффективность таких моделей в значительной степени зависит от объема и качества имеющихся данных, а точное моделирование может быть достигнуто только при наличии достаточного количества достоверных данных.

Модель в виде эквивалентной схемы использует электронные компоненты для имитации таких характеристик, как сопротивление, задержка заряда и разряда внутри батареи, что позволяет смоделировать поведение батареи. Эта модель имеет относительно простую архитектуру и сравнительно небольшую вычислительную нагрузку, поэтому она широко используется в таких областях, как оценка состояния батареи и управление зарядом-разрядом. Однако модель эквивалентной схемы имеет ряд ограничений, включая сложность точного описания нелинейного отклика, температурных эффектов и многочисленных химических реакций в батарее, поэтому в некоторых сценариях применения для более точного моделирования поведения батареи необходимо рассматривать более сложные модели. Некоторые из наиболее распространенных моделей эквивалентных цепей — модель Ринта (R_{int}), модель Тевенина, модель PNGV и многопорядковая RC-модель.

Самой простой моделью является модель Ринта, которая состоит из линейного внутреннего сопротивления R_0 и последовательно включенного источника питания постоянного напряжения U_0 , U_t — это напряжение на выходе тестируемого одиночного элемента.

Из-за низкой точности RC-модели первого порядка и исходя из вычислительных возможностей BMS более широко используется RC-модель второго порядка (рис. 4). Поляризационное сопротивление электрохимической реакции

батареи моделируется в виде резистора R_s , концентрационное поляризационное сопротивление моделируется с помощью R_L , поляризационная емкость батареи моделируется емкостью C_s , а концентрационная поляризационная емкость моделируется $-C_L$, R_c моделирует увеличение внутреннего сопротивления с увеличением количества отработанных элементов циклов заряда-разряда.

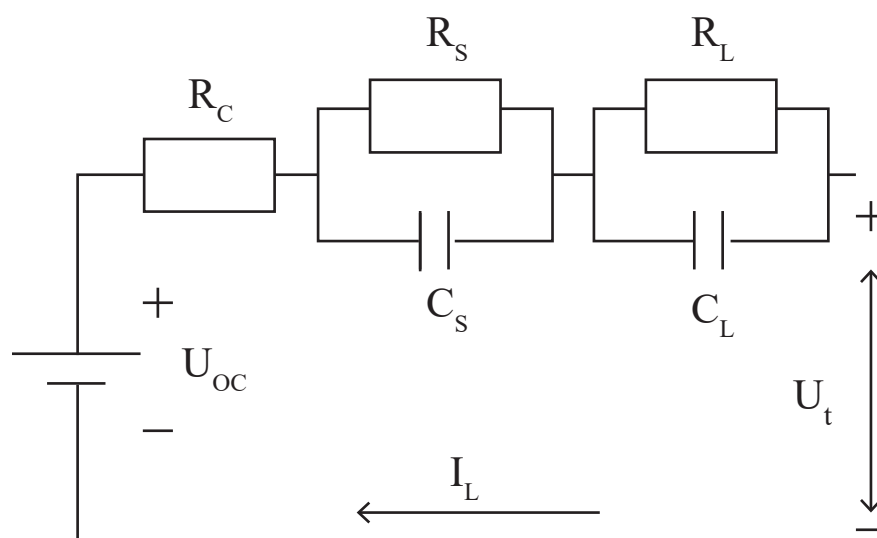


Рис. 4. Модель эквивалентной RC-цепи второго порядка для литиевого аккумулятора

У Сяохуэй и др. [7] предложили нелинейную модель оптимизации по методу наименьших квадратов для эквивалентной RC-модели литиевых батарей второго порядка и использовали алгоритм LM (Levenberg — Marquardt) для решения задачи определения RC-параметров, который относится к разновидности алгоритмов с зависимой областью. Этим алгоритмом возможно быстро и точно определить значения RC-параметров реальных батарей в различных состояниях SOC.

Заключение. Основной задачей системы управления батареями является повышение безопасности и экономичности литийионной системы хранения энергии. Для выполнения этого требования BMS должна точно определять внутренние параметры батареи и точно рассчитывать значение ее SOC, а также точно отслеживать и диагностировать возникающие неисправности. Однако из-за крайне нелинейных и чувствительных к температуре характеристик литиевых батарей, а также несогласованности каждого параметра после формирования батареи в группу значительно усложняет алгоритм работы BMS по управлению балансировкой и определению неисправностей СНЭЭ в режиме реального времени. Несмотря на массовое производство BMS, алгоритмы ее работы все еще находится на стадии исследований в следующих основных направлениях:

1. Повышение точности измеряемых данных — оценка ненаблюдаемых параметров элемента в значительной мере зависит от достоверности, точности, частоты обновления и объема основных данных батареи;

2. Создание точной цифровой модели батареи с хорошими динамическими характеристиками, высокой точностью, пригодной для сильноточных режимов зарядки и разрядки, соответствующих условиям работы литийионных систем хранения энергии. Имеет большое значение для своевременного обнаружения и диагностики неисправностей СНЭЭ. Сочетание алгоритмической модели и компьютерного интеллектуального управления с нечеткой логикой позволяет точно оценить SOC аккумуляторного блока с полным учетом теплового процессов, электрических характеристик, срока службы и безопасности, а также оценить состояние и оставшееся время использования аккумуляторного блока.

Библиографический список

1. Лю Ц., Хэ Х. Обнаружение и изоляция дефектов датчика для литийионного аккумуляторного блока в электромобилях с использованием адаптивного расширенного фильтра Калмана // Прикладная энергетика. 2017. № 185. С. 2033–2044.
2. U Ch., Chzhu Ch., Ge Ja. A new fault diagnosis and prognosis technology for high-power lithium-ion battery // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. 45 (7): 1533–1538.
3. Чэнь З., Сюн Р., Тянь Ц. и др. Модельно-ориентированный подход к диагностике неисправностей во внешней короткой цепи литийионного аккумулятора, используемого в электромобилях // Прикладная энергетика. 2016. № 184. С. 365–374.
4. Анализ характеристик кривой напряжения холостого хода литий-железо-фосфатного аккумулятора [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eet-china.com/mp/a258915.html>
5. Комплексный анализ разряда литиевого аккумулятора [Электронный ресурс]. URL: https://www.fangzhenxiu.com/post/7282360/?uri=24_bUEtxGcRkc1
6. Сравнение 12 моделей кривых заряда и разряда литийионных аккумуляторов. [Электронный ресурс]. URL: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/623571540>
7. У Сяохуэй, Чжан Сян. Идентификация параметров модели второго порядка эквивалентной цепи RC для литиевых аккумуляторов // Журнал Нанкинского университета. 2020. № 56 (5). С. 755–761.

Дата поступления: 25.12.2023

Решение о публикации: 01.03.2024

Контактная информация:

СИ ЧЖЭНЬЧАО — аспирант, xizhenchaogege@gmail.com

КОНСТАНТИНОВ Константин Витальевич — доцент, const.festu@mail.ru

Review of methods for monitoring and diagnosing electrical energy storage systems

Xi Zhenchao, K. V. Konstantinov

St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", 5, st. Professora Popova, St. Petersburg, 197022, Russia

For citation: *Si Chzhe`n`chao, Konstantinov K. V. Obzor metodov kontrolya i diagnostiki sistem nakopleniya e`lektricheskoy e`nergii // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 1. P. 143–154. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-143-154*

Abstract

Goal: review of the current situation and perspective directions for the development of technology for testing electrical energy storage systems based on lithium-ion batteries. **Methods:** using literature analysis, a review and systematization of the history of lithium-ion battery system monitoring technology development was conducted and the advantages and disadvantages of the most common state of charge (SOC) methods were compared. **Results:** lithium-ion battery systems represent an inevitable trend in the future of electrochemical energy storage. To increase their stability and economic efficiency, it is necessary that diagnostic systems allow the internal parameters of the battery to be determined with sufficient accuracy and the types of faults to be quickly determined. In the future, research in this area will continue to improve the accuracy of data acquisition systems and create accurate digital battery models. **Practical significance:** a review and systematization of the history of development of technology for monitoring the condition of lithium-ion battery systems was carried out in order to identify current problems and promising directions for future research in this area.

Keywords: electrical energy storage systems, lithium-ion battery diagnostic technology, battery management systems ampere-time integration method, open circuit voltage method second order RC equivalent circuit model, data acquisition systems, digital battery model.

References

1. Lju C., Hje H. Obnaruzhenie i izoljacija defektov datchika dlja litij-ionnogo akku-mul-jatornogo bloka v jelektromobiljah s ispol'zovaniem adaptivnogo rasshirennogo fil'tra Kalmana // Prikladnaja jenergetika. 2017. No. 185. P. 2033–2044. (In Russian)
2. U Ch., Chzhu Ch., Ge Ja. A new fault diagnosis and prognosis technology for high-power lithium-ion battery // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. No. 45 (7): 1533-1538. (In Russian)
3. Chjen' Z., Sjun R., Tjan' C. i dr. Model'no-orientirovannyj podhod k diagnostike neis-pravnostej vo vneshnej korotkoj cepi litij-ionnogo akkumuljatora, ispol'zuemogo v jelektromobil-jah // Prikladnaja jenergetika. 2016. No. 184. P. 365–374. (In Russian)
4. Analiz karakteristik krivoj naprjazhenija holostogo hoda litij-zhelezo-fosfatnogo akkumul-jatora [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.eet-china.com/mp/a258915.html> (In Russian)
5. Kompleksnyj analiz razrjada litievogo akkumuljatora [Jelektronnyj resurs]. URL: https://www.fangzhenxiu.com/post/7282360/?uri=24_bUEtxGcRkc1 (In Russian)
6. Sravnenie 12 modelej krivyh zarjada i razrjada litij-ionnyh akkumuljatorov. [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/623571540> (In Russian)

7. U Sjaohujej, Chzhan Sjan. Identifikacija parametrov modeli vtorogo porjadka jekvivalentnoj cepi RC dlja litievyh akkumuljatorov // Zhurnal Nankinskogo universiteta. 2020. No. 56 (5). P. 755–761. (In Russian)

Received: 25.12.2023

Accepted: 01.03.2024

Author's information:

XI ZHENCHAO — PhD student. xizhenchaogege@gmail.com

Konstantin V. KONSTANTINOV — Associate Professor, const.festu@mail.ru