

ISSN 0201–727X

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

ВЕСТНИК

**Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

№ 2 (94)

Ростов-на-Дону
2024

ВЕСТНИК

Ростовского государственного университета путей сообщения

2024
№ 2 (94)

Научно-технический журнал
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи
информационных технологий и массовых
коммуникаций.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала

В.И. Колесников, академик Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

К.С. Ахвердиев, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

М.П. Бадёр, д-р техн. наук, проф., Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС),
г. Москва

А.В. Белый, член-корреспондент НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., Физико-технический институт
НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

А.В. Божениук, д-р техн. наук, проф., Южный федеральный университет (ЮФУ), г. Таганрог

М.А. Бутакова, д-р техн. наук, проф., Южный федеральный университет (ЮФУ), г. Ростов-на-Дону

В.Д. Верескун, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.Н. Гуда, д-р техн. наук, проф., заместитель главного редактора, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ф. Даниэль, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет дю Мэн, г. Ле-Ман, Франция

И.Д. Долгий, д-р техн. наук, проф., Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт
информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), г. Москва

Ю.И. Жарков, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.А. Зарифьян, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.В. Зырянов, д-р техн. наук, проф., Донской государственный технический университет (ДГТУ),
г. Ростов-на-Дону

С.М. Ковалев, д-р техн. наук, проф., Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт
информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), г. Москва

И.В. Котенко, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург

А.Г. Кочур, д-р физ.-мат. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Н.Н. Лябах, д-р техн. наук, проф., Международная Академия Менеджмента и Технологий INTAMT,
г. Дюссельдорф, Северный Рейн-Вестфалия, Германия

И.А. Майба, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Э.А. Мамаев, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ю.Ф. Мигаль, д-р физ.-мат. наук, проф., Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

И.С. Морозкин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.И. Новакович, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ж. Палечек, д-р техн. наук, проф., Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика

А.Д. Петрушин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Е.С. Свицков, д-р техн. наук, проф., Петербургский государственный университет путей сообщения
(ПГУПС), г. Санкт-Петербург

А. Сладковски, д-р техн. наук, проф., Силезский технический университет, г. Катовице, Польша

С.В. Соколов, д-р техн. наук, проф., Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ),
г. Москва

В.А. Соломин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В. Стыскала, д-р, ассоц. проф., Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика

В.Л. Сухоруков, д-р физ.-мат. наук, проф., Южный федеральный университет (ЮФУ), НИИ Физики,
г. Ростов-на-Дону

В.Н. Таран, д-р физ.-мат. наук, проф., Донской государственный технический университет (ДГТУ),
г. Ростов-на-Дону

В.А. Финоченко, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

О.Н. Числов, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.Н. Чукарин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.В. Шаповалов, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.Л. Шаповалов, д-р техн. наук, доц., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

И.А. Яицков, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.О. Полунина, ответственный секретарь, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

VESTNIK RGUPS
Scientific and Technical Journal

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

- V.I. Kolesnikov**, academician of Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- K.S. Akhverdiev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- M.P. Bader**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow State Transport University (MSTU), Moscow
- A.V. Belyj**, Corresponding member NAS of Belarus, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Physic Technical Institute NAS of Belarus, Minsk, Belarus
- A.V. Bozhenyuk**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southern Federal University (SFedU), Taganrog
- M.A. Butakova**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southern Federal University (SFedU), Rostov-on-Don
- V.D. Vereskun**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.N. Guda**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don (deputy editor-in-chief)
- Ph. Daniel'**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Universite du Maine, Le Mans, France
- I.D. Dolgiy**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow
- Y.I. Zharkov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.A. Zarifyan**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.V. Zyryanov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don
- S.M. Kovalev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow
- I.V. Kotenko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg
- A.G. Kochur**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- N.N. Lyabakh**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, The International Academy for Management and Technology (INTAMT), Dusseldorf, North Rhine-Westphalia, Germany
- I.A. Mayba**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- E.A. Mamaev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- Y.F. Migal**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Southern Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don
- I.S. Morozkin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.I. Novakovich**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- Z. Palechek**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic
- A.D. Petrushin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- E.S. Svintsov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg
- A. Sladkowski**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Silesian University of Technology, Katowice, Poland
- S.V. Sokolov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Technical University of Communication and Informatics (MTUCI), Moscow
- V.A. Solomin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V. Stýskala**, Doctor, PhD, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic
- V.L. Sukhorukov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Southern Federal University (SFedU), Research Institute of Physics, Rostov-on-Don
- V.N. Taran**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don
- V.A. Finochenko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- O.N. Chislov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.N. Chukarin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.V. Shapovalov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.L. Shapovalov**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- I.A. Yait'skov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.O. Polunina**, executive secretary, RSTU, Rostov-on-Don

СОДЕРЖАНИЕ

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

- Сергеев И.К., Пищик А.В.** Эффективность применения сдвоенных эластомерных и резинометаллических поглощающих аппаратов на длиннобазных вагонах-платформах.... 8

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Никитченко С.Л., Зырянкина К.Э.** Прогнозирование потребности в запасных частях гидросистем машин с применением нейронной сети..... 15
- Соколов С.В., Охотников А.Л., Костюков А.В., Маршаков Д.В.** Высокоточное позиционирование беспилотного локомотива в условиях нестабильных спутниковых измерений..... 25

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

- Бадахов Г.А., Болгова Е.А., Мукутадзе М.А., Чуб Е.Г., Шведова В.Е.** Разработка нового математического метода моделирования движения смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника с нестандартным опорным профилем..... 34

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- Богданова К.В., Добрынин Е.В.** Математическая модель автоматизированной системы профилактического подогрева проводов контактной сети..... 42
- Вильгельм А.С., Никифоров М.М.** Применение имитационного моделирования для оценки эффективности вариантов усиления системы тягового электроснабжения при интервальном регулировании движения поездов 48
- Кацай А.В., Зубакин В.А.** Стоимостной анализ рекуперативной энергии городского электротранспорта..... 57
- Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е.** Моделирование электрических и тепловых режимов тяговых трансформаторов..... 73
- Митрофанов А.Н., Жарков Ю.И., Окладов С.А.** Методология построения моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов..... 82
- Сироткин В.В.** Эффективное использование энергии рекуперации в тяговой сети электроснабжения..... 100
- Черных В.Н., Осипов В.А.** Совершенствование системы обнаружения раннего гололёдообразования для контактных сетей электрифицированных железных дорог..... 110

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

- Глаголев С.Н., Новиков И.А., Линник Ю.Н., Акулов А.А.** Государственная поддержка работы грузовой транспортно-логистической системы 119
- Грефенштейн А.П.** Условия применения железнодорожного транспорта в городских грузовых перевозках..... 132
- Мартыненко А.В., Ваколюк К.К.** Моделирование расщепления междугородних пассажиропотоков с учетом расписания и затрат на внутригородские перемещения..... 143
- Москвичев О.В., Москвичева Е.Е., Хишова А.А.** Обзорный анализ реализации отечественных цифровых технологий в работе грузовых железнодорожных станций..... 156
- Попова Н.Б., Корягин М.Е., Калидова А.Д.** Работа контейнерных операторов на Западно-Сибирской железной дороге..... 165
- Тимофеева Г.А., Хазимуллин А.Д.** Выбор оптимальных управленческих решений железнодорожного перевозчика с использованием нечеткой логики..... 173

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Морозкин И.С., Даровской Г.В. Оптимизация процесса сварки короткой дугой при ремонте подвижного состава железных дорог.....	181
Поляков В.Н. Параметры эксцентриситета гидродинамического подшипника скольжения.....	188
Яицков И.А., Поляков П.А., Федотов Е.С., Тагиев Р.С., Дедусенко Р.Н. Обеспечение стабильности торможения силовых устройств барабанно-колодочного типа	194

CONTENTS

ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY

- Sergeev I.K., Pishchik A.V.** The effectiveness of the using combined elastomer and rubber-metal draft gears on long base platform cars..... 8

INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION
AND TELECOMMUNICATIONS

- Nikitichenko S.L., Zyryankina K.E.** Forecasting the need for spare parts of machine hydraulic systems using a neural network..... 15
- Sokolov S.V., Okhotnikov A.L., Kostyukov A.V., Marshakov D.V.** High-precision positioning of an autonomous locomotive in conditions of unstable satellite measurements..... 25

MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

- Badakhov G.A., Bolgova E.A., Mukutadze M.A., Chub E.G., Shvedova V.E.** Development of a new mathematical method for simulating the movement of lubricant in the working clearance of a radial bearing with a non-standard support profile..... 34

POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

- Bogdanova K.V., Dobrynin E.V.** Mathematical model of an automated system for preventive heating of contact network wires..... 42
- Vilgelm A.S., Nikiforov M.M.** The use of simulation modeling to evaluate efficiency makes it possible to strengthen traction power supply systems with interval regulation of train movement.... 48
- Katsai A.V., Zubakin V.A.** Cost analysis of regenerative energy of urban electric transport..... 57
- Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E.** Modeling of electrical and thermal modes of traction transformers..... 73
- Mitrofanov A.N., Zharkov Yu.I., Okladov S.A.** Methodology for designing models of digital twins of train traction power supply processes..... 82
- Sirotkin V.V.** Usage of the energy recovering efficiency in the electric-traction network..... 100
- Chernykh V.N., Osipov V.A.** Improving the early ice formation detection system for contact networks of the electrified railways 110

OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

- Glagolev S.N., Novikov I.A., Linnik Y.N., Akulov A.A.** State support for the operation of the cargo transport and logistics system..... 119
- Grefenshteyn A.P.** Conditions for the use of railway transport in urban freight transportation.... 132
- Martynenko A.V., Vakolyuk K.K.** Modelling of the intercity passenger traffic division with consideration of timetable and costs for intracity movements 143
- Moskvichev O.V., Moskvicheva E.E., Hishova A.A.** Overview analysis of the implementation of digital technologies in the operation of freight railway stations..... 156
- Popova N.B., Koryagin M.E., Kalidova A.D.** The container operators` work on the West Siberian Railway..... 165
- Timofeeva G.A., Khazimullin A.D.** Selecting optimal management decisions for a railway carrier using fuzzy logic..... 173

MECHANICAL ENGINEERING

Morozkin I.S., Darovskoy G.V. Optimization of short arc welding process during repair of railway rolling stock	181
Polyakov V.N. Eccentricity parameters of hydrodynamic plain bearing.....	188
Yaitskov I.A., Polyakov P.A., Fedotov E.S., Tagiev R.S., Dedusenko R.N. Ensuring the stability of braking power devices drum and shoe type.....	194

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

УДК 629.4.02

DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_8

*И. К. Сергеев, А. В. Пищик***ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СДВОЕННЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ И РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТОВ НА ДЛИННОБАЗНЫХ ВАГОНАХ-ПЛАТФОРМАХ**

Аннотация. Рассмотрены особенности условий эксплуатации длиннобазных вагонов-платформ, а также проанализированы основные причины отказов эластомерных поглощающих аппаратов. Предложены и обоснованы наиболее рациональные пути снижения нагруженности длиннобазных вагонов-платформ при перевозке особо ценных грузов. Проведен анализ изменений температуры окружающей среды при следовании контейнерных поездов из Центральной части России в Республику Саха (Якутия), предложены пути обеспечения безотказной работы эластомерных и резинометаллических поглощающих аппаратов. Предложена расчетная модель для исследования работы последовательно расположенных (сдвоенных) поглощающих аппаратов. Обоснована необходимость применения методов компьютерного моделирования для проверки эффективности предложенной схемы расположения поглощающих аппаратов.

Ключевые слова: грузовые вагоны, динамика вагонов, особо ценные грузы, поглощающие аппараты, ускоренные контейнерные поезда, железные дороги Якутии.

Для цитирования: Сергеев, И. К. Эффективность применения сдвоенных эластомерных и резинометаллических поглощающих аппаратов на длиннобазных вагонах-платформах / И. К. Сергеев, А. В. Пищик // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 8–14. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_8.

Введение

Решение задач продольной динамики грузовых вагонов является одним из ключевых направлений железнодорожной науки [1]. Реализация указанных задач достигается путём разработки перспективных грузовых вагонов и их узлов, включая ударно-поглощающие устройства (поглощающие аппараты).

Для снижения динамических нагрузок, особенно при маневровом соударении, разработано несколько вариантов поглощающих аппаратов с более «мягкой» (полной) характеристикой. К числу таких относятся гидрогазовые, гидрорезиновые и некоторые эластомерные поглощающие аппараты.

Однако некоторые из перечисленных направлений требуют коренного изменения конструкции путем применения в ударно-поглощающих устройствах пневматических и гидравлических цилиндров, а также использования высокопрочных марок стали. Применение гидрорезиновых и эластомерных поглощающих аппаратов сдерживалось необходимостью использования специальных материалов (рабочего тела) для обеспечения безотказной работы при низких температурах ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и менее).

Основная часть

Стремительный рост контейнерных перевозок привёл к значительному увеличению на сети вагонов-платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров. В течение последних 15 лет отечественными вагоностроителями налажен выпуск широкого модельного ряда указанных типов вагонов. Вагоностроители выпускают вагоны-платформы, оборудованные поглощающими аппаратами классов Т1, Т2 и Т3. Всё большее распространение получают поглощающие аппараты повышенной энергоёмкости (эластомерные поглощающие аппараты) классов Т2 и Т3. При этом необходимо отметить, что не вся нормативная документация учитывает современные реалии организации перевозок. Например, Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [2] не учитывают особых требований для обеспечения сохранности перевозки особо ценных грузов. К категории особо ценных относят следующие грузы: изделия из фарфора, высокотехнологическое промышленное и бытовое оборудование, спутники, культурные ценности, узлы и детали самолетов, антиквариат и др.

На вагонах пассажирского парка широкое распространение получили резинометаллические аппараты Р-2П и Р-5П, а аппарат Р-4П – на рефрижераторном подвижном составе (в рефрижераторных

секциях последних годов выпуска применялись поглощающие аппараты ПМК-110А). Опыт применения поглощающих аппаратов Р-4П и Р-5П позволяет рассматривать возможность их использования в конструкции длиннобазных вагонов-платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров. Полагаем, что первоначально применение указанных аппаратов в конструкции длиннобазных вагонов-платформ целесообразно внедрить на том подвижном составе, который следует по замкнутым кольцевым маршрутам (например, Москва – Владивосток – Москва) и практически не пропускается через горочные комплексы (сортировочные горки). Это обстоятельство позволит исключить (снизить) влияние нагрузок, которые воспринимает вагон при прохождении горочных комплексов (сортировочных горок). Необходимо подчеркнуть, что применение поглощающих аппаратов Р-4П и Р-5П рассматривается с учетом применения их совместно с эластомерными поглощающими аппаратами (последовательно расположенные (сдвоенные) поглощающие аппараты) с целью обеспечения необходимой суммарной энергоемкости, что обусловлено требованиями безопасности.

Поглощающий аппарат Р-5П (рис. 1) разрабатывался для перспективных условий эксплуатации пассажирских вагонов, отличительной особенностью указанного аппарата от Р-2П является то, что поперечные размеры резинометаллических элементов увеличены, а их толщина уменьшена до 33 вместо 41 мм. В поглощающем аппарате Р-4П резинометаллические элементы подобны элементам, применяемым в аппарате Р-2П. Отличием является то, что в аппарате Р-4П применяются резинометаллические элементы толщиной 24,2 мм [3]. Одним из ученых [4] проведены исследования продольной динамики подвижного состава при использовании поглощающих аппаратов Р-5П. Анализ расчетов, полученных по уравнениям регрессии, которые найдены из условия наилучшей аппроксимации экспериментального ряда точек, полученных при динамических испытаниях, показал эффективность применения указанных аппаратов в нормальных условиях эксплуатации.

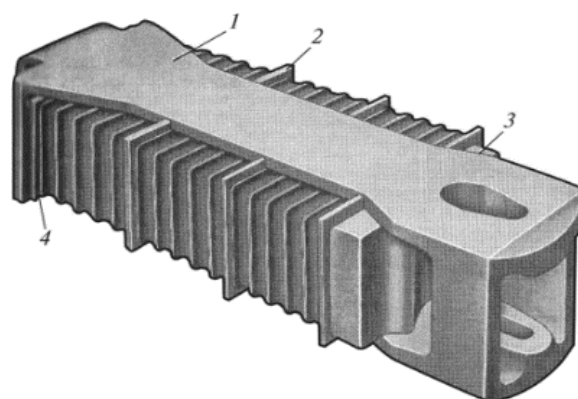


Рис. 1. Резинометаллический поглощающий аппарат Р-5П:

1 – корпус-хомут; 2 – промежуточные плиты; 3 – упорная плита; 4 – плита

В табл. 1 приводятся основные технические характеристики резинометаллических поглощающих аппаратов Р-4П и Р-5П.

Таблица 1

Основные параметры резинометаллических поглощающих аппаратов Р-4П и Р-5П

Параметр	Р-4П	Р-5П
Номинальная энергоемкость, кДж	28	40-50
Сила сопротивления при сжатии, МН	1,8	1,2
Коэффициент поглощения энергии	0,55	0,31–0,36
Конструктивный рабочий ход, мм	72	80

Проведенный анализ технических характеристик поглощающих аппаратов Р-4П и Р-5П показал, что их возможное применение на вагонах-платформах в обязательном порядке должно учитывать полигоны курсирования (включая перспективные) в разрезе значительного изменения температуры (её перепадов). Ключевым недостатком таких аппаратов является изменение диссипативных свойств резины в процессе старения под действием нагрузок, температуры и времени эксплуатации, что в свою очередь ухудшает силовую характеристику и уменьшает конструктивный рабочий ход поглощающих

аппаратов [5]. Особое внимание, на наш взгляд, должно уделяться изменению жесткости упругих элементов аппаратов при низких температурах.

Схожая ситуация наблюдается в процессе эксплуатации эластомерных поглощающих аппаратов при следовании длиннобазных вагонов-платформ по территории IV климатического пояса России [6], где средняя температура в зимний период может быть ниже отметки -60°C . В настоящее время АО «АК «Железные дороги Якутии» рассматривают проект строительства участка Нижний Бестях – Магадан (порт) [7]; уже проведены работы по предварительному изучению оптимальной трассировки нового участка железнодорожной магистрали. Указанный участок будет проходить через Оймяконский улус (район) Республики Саха (Якутия), где температура в зимний период может достигать отметки -70°C .

Данное обстоятельство обязывает обратить особое внимание на обеспечение безотказной работы железнодорожного подвижного состава, включая эффективную работу эластомерных и резинометаллических поглощающих аппаратов при низких температурах. В целях обеспечения стабильной работы ударно-поглощающих устройств целесообразно обеспечить рациональный выбор эластомерного материала и резинометаллических элементов, которые способны максимально эффективно диссипировать кинетическую энергию удара при различных температурных воздействиях.

Длиннобазные вагоны-платформы эксплуатируются в ускоренных контейнерных поездах, которые следуют по территории Российской Федерации со значительной маршрутной скоростью (среднее значение ~ 860 км/сутки). В связи с этим особое внимание, на наш взгляд, необходимо уделять контейнерным поездам, которые следуют из Центральной части России (Московская ж. д.) в Республику Саха (Якутия) по следующим железным дорогам: Московская, Горьковская, Свердловская, Западно-Сибирская, Красноярская, Восточно-Сибирская, Дальневосточная, АО «АК «Железные дороги Якутии». В табл. 2 приводится информация о климатических поясах России с привязкой к расположению в их границах вышеуказанных железных дорог.

Таблица 2

Расположение железных дорог в границах климатических поясов России

Климатический пояс	Железные дороги в границе пояса	Средняя температура зимой, $^{\circ}\text{C}$
II	Московская, Горьковская	$-9,7$
III	Свердловская, Красноярская, Западно-Сибирская, Восточно-Сибирская, Дальневосточная	-18
IV	АО «АК «Железные дороги Якутии» (железнодорожные станции Нерюнгри-Грузовая, Нижний Бестях и Алдан)	-41 (минимальная -60)

Анализируя указанные температурные показатели, можно сделать вывод, что при следовании ускоренных контейнерных поездов из Центральной части России в Республику Саха (Якутия) происходят существенные перепады температур (особенно при передаче вагонов с Дальневосточной ж. д. на АО «АК «Железные дороги Якутии»), что при совокупности эксплуатационных факторов может приводить к отказу эластомерных и резинометаллических поглощающих аппаратов. Неисправности поглощающих аппаратов исключают возможность гашения части энергии удара, увеличивают продольные силы, а также могут привести к повреждению особо ценных грузов.

Неисправности поглощающих аппаратов выявляются при проведении технического обслуживания грузовых вагонов на пунктах технического обслуживания и при выполнении плановых видов ремонта (деповской, капитальный). Критерии браковки поглощающих аппаратов регламентированы Инструкцией по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрищику вагонов) № 808-2022 ПКБ ЦВ [8] и Инструкцией по ремонту и обслуживанию автосцепного устройства подвижного состава железных дорог [9]. Основные неисправности эластомерных поглощающих аппаратов приводятся в табл. 3.

Отказы эластомерных поглощающих аппаратов фиксируются на полигонах всех железных дорог, включая железнодорожные станции Беркакит (Нерюнгринский район Якутии) и Тында Дальневосточной железной дороги – филиал ОАО «Российские железные дороги», а также Нижний Бестях и Алдан АО «АК «Железные дороги Якутии».

Наиболее распространенные неисправности эластомерных поглощающих аппаратов

Неисправность	Порядок браковки
Суммарный зазор между передним упором и упорной плитой и задним упором и корпусом аппарата более 5 мм	Является браковочным критерием в эксплуатации и при выполнении всех видов ремонта грузовых вагонов
Протечка эластомерной массы	Является браковочным критерием только при выполнении плановых видов ремонта грузовых вагонов, в эксплуатации не является браковочным критерием (при условии отсутствия просадки поглощающего аппарата)

По информации Проектно-конструкторского бюро вагонного хозяйства – филиала ОАО «Российские железные дороги», в 2023 году по неисправности «суммарный зазор эластомерного поглощающего аппарата более 5 мм» (код 352 Классификатора «Основные неисправности грузовых вагонов» К ЖА 2005 05) на железных дорогах стран СНГ и Балтии в текущий отцепочный ремонт было отцеплено 10,5 тыс. грузовых вагонов парка Российской Федерации, что на 15,9 % больше по сравнению с предыдущим годом [10]. Указанная статистика свидетельствует о необходимости применения организационно-технологических решений для обеспечения безотказной работы эластомерных поглощающих аппаратов.

Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества (далее – Совет) проводится работа по обеспечению безотказной работы поглощающих аппаратов. Так, решением семьдесят шестого заседания Совета утверждено (с вводом в действие с 1 января 2023 года) Извещение № 2 об изменении Инструкции по ремонту и обслуживанию автосцепного устройства подвижного состава железных дорог, которое обязывает проводить силами сервисного центра капитальный (сервисный) ремонт поглощающих аппаратов со сроком службы более 16 лет в соответствии с требованиями нормативной документации производителей поглощающих аппаратов.

В настоящее время наиболее рациональным способом снижения нагруженности можно считать применение последовательно расположенных (сдвоенных) поглощающих аппаратов, что может позволить практически в два раза увеличить энергоемкость (в случае применения однотипных эластомерных и/или резинометаллических поглощающих аппаратов), а посредством применения двух разнотипных поглощающих аппаратов (эластомерный и резинометаллический) – повысить её. На рис. 2 приводится модель, которая может применяться для исследования динамических процессов соударения длиннобазных вагонов-платформ, оборудованных последовательно расположенными (сдвоенными) эластомерными и/или резинометаллическими поглощающими аппаратами.

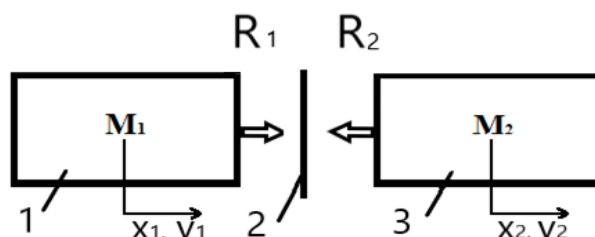


Рис. 2. Расчетная модель с последовательно расположенными (сдвоенными) поглощающими аппаратами:

1 – поглощающий аппарат № 1; 2 – промежуточная масса; 3 – поглощающий аппарат № 2

Пренебрегая промежуточной массой и принимая допущение, что скорость изменяется пропорционально величине деформации, получаем систему уравнений (1), которую можно использовать для целей численного интегрирования:

$$\begin{cases} R_1(\Delta x_1, \Delta v_1) = R_1(\Delta x_2, \Delta v_2) \\ \Delta x_1 + \Delta x_2 = x_2 - x_1 \\ \Delta v_1 + \Delta v_2 = v_2 - v_1 \\ \frac{\Delta v_2}{\Delta v_1} = \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} \end{cases}, \quad (1)$$

где $R_{1,2}$ – реакции в поглощающих аппаратах № 1 и 2 соответственно;
 $\Delta x_{1,2}$ – величина деформации поглощающих аппаратов № 1 и 2 соответственно;
 $\Delta v_{1,2}$ – величина скорости деформации поглощающего аппарата № 1 и 2 соответственно;
 $x_{1,2}$ – величина перемещения поглощающих аппаратов № 1 и 2 соответственно;
 $v_{1,2}$ – величина скорости перемещения поглощающего аппарата № 1 и 2 соответственно.

Исследование работы последовательно расположенных (сдвоенных) поглощающих аппаратов целесообразно вначале выполнить, прибегнув к методам компьютерного моделирования, что позволит испытать предложенную в данной работе концепцию применения сдвоенных поглощающих аппаратов без значительных финансовых затрат. Подобный подход нередко используется отечественными специалистами для проверки научных гипотез [4]. Методика такого исследования может заключаться во внедрении составленной математической модели (1) как в специализированный программный комплекс (ПК), так и в собственную программу, спроектированную с помощью интегрированной среды разработки (IDE). При выборе первого подхода в качестве программного комплекса целесообразно использовать «Универсальный механизм» (УМ). Таким образом, перспективной научной разработкой данной темы является разработка модели вагона в ПК УМ, интеграция системы (1) внутрь составленной модели и дальнейшие её испытания посредством модуля UM Simulation, включенного в состав программного комплекса «Универсальный механизм».

Заключение

Задействование длиннобазных вагонов-платформ в контейнерных перевозках назначением в регионы России с крайне низкими температурами, на наш взгляд, обязывает обратить внимание собственников грузовых вагонов, железнодорожные администрации, вагоноремонтные предприятия на обеспечение безотказной работы эластомерных и резинометаллических поглощающих аппаратов. Обеспечение сохранности перевозки особо ценных грузов требует внесения изменений в конструкцию автосцепного устройства в части применения последовательно расположенных (сдвоенных) поглощающих аппаратов. При этом эффективность данного конструктивного решения на начальном этапе целесообразно оценить с помощью математического и компьютерного моделирования.

Список литературы

1 **Вершинский, С. В.** Динамика вагона : учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов ; под ред. С. В. Вершинского. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1991. – 360 с. – ISBN 5-277-00917-5.

2 Нормы для расчёта и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 317 с. – URL: <https://dwg.ru/dnl/2822> (дата обращения: 12.04.2024).

3 **Лукин, В. В.** Вагоны. Общий курс : учебник / В. В. Лукин, П. С. Анисимов, Ю. П. Федосеев. – Москва : Маршрут, 2004. – 424 с. – ISBN 5-89035-106-0.

4 Моделирование нагруженности конструкции локомотива при лобовом столкновении с препятствием на железнодорожном пути : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга

References

1 **Vershinsky, S. V.** Dynamics of a car : textbook for railway transport universities / V. N. Danilov, V. D. Khusidov ; edited by S. V. Vershinsky. – 3rd ed., revised. and additional – Moscow : Transport, 1991. – 360 p. – ISBN 5-277-00917-5.

2 Standards for the calculation and design of 1520 mm gauge railway carriages of the Ministry of Railways (non-self-propelled). – Moscow : GosNIIV-VNIIZhT, 1996. – 317 p. – URL: <https://dwg.ru/dnl/2822> (date of access: 04/12/2024).

3 **Lukin, V. V.** Cars. General course : textbook / V. V. Lukin, P. S. Anisimov, Yu. P. Fedoseev // Moscow : Route, 2004. – 424 p. – ISBN 5-89035-106-0.

4 Modeling the loading of a locomotive structure during a head-on collision with problems on the railway track : specialty 05.22.07 «Railway roll-

поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Красюков Николай Федорович ; Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)). – Москва, 2020. – 152 с.

5 Прогнозирование демпфирующих свойств эластомерных элементов поглощающих аппаратов пассажирских вагонов / Н. М. Курзина, В. Н. Филиппов, А. В. Пищик [и др.] // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4. – С. 51–57. – ISSN 1818-5509.

6 Карта климатических поясов России // ГК «Авангард Сэйфети» : официальный сайт. – 2024. – URL: <https://www.avangard-sp.ru/services/karta-klimaticheskikh-poyasov/> (дата обращения: 12.04.2024).

7 Для строительства железной дороги до Магадана будут готовить местных специалистов // Первый республиканский информационно-аналитический портал «SakhaNews» («Новости Якутии») : официальный сайт. – 2024. – URL: <https://1sn.ru/dlya-stroitelstva-zeleznoi-dorogi-do-magadana-budut-gotovit-mestnyx-specialistov> (дата обращения: 12.04.2024).

8 Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрищику вагонов) № 808-2022 ПКБ ЦВ : утверждена на 77-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, (протокол от 08.12.2022 № 77). – 2022. – 200 с. – ISBN 979-5-902080-20-5.

9 Инструкция по ремонту и обслуживанию автоцепного устройства подвижного состава железных дорог : утверждена на 54-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, (протокол от 18–19.05.2010 № 54). – 2010. – 96 с. – ISBN 978-5-16-013042-2.

10 **Агафонов, М. С.** Отцепки грузовых вагонов в неплановый ремонт за 2023 г. / М. С. Агафонов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2024. – № 1. – С. 12–13. – ISSN 1817-6089.

ing stock, train traction and electrification» : dissertation for the degree of Candidate of Engineering Sciences / Krasuykov Nikolay Fedorovich ; Russian University of Transport (RUT (MIIT)). – Moscow, 2020. – 152 p.

5 Prediction of damping properties of elastomeric elements of tracking devices of passenger cars / N. M. Kurzina, V. N. Filippov, A. V. Pishchik [at al.] // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 4. – P. 51–57. – ISSN 1818-5509.

6 Map of climatic zones of Russia // Avangard Safety Group of Companies : official website. – 2024. – URL: <https://www.avangard-sp.ru/services/karta-klimaticheskikh-poyasov/> (date of access: 04/12/2024).

7 Local specialists will be trained for the construction of the railway to Magadan // First republican information and analytical portal «SakhaNews» («News of Yakutia») : official website. – 2024. – URL: <https://1sn.ru/dlya-stroitelstva-zeleznoi-dorogi-do-magadana-budut-gotovit-mestnyx-specialistov> (date of access: 04/12/2024).

8 Instructions for the maintenance of wagons in operation (instructions for wagon inspectors) No. 808-2022 PKB TsV : approved at the 77th meeting of the Council on Railway Transport of the Commonwealth Member States, (protocol dated 12/08/2022 No. 77). – 2022. – 200 p. – ISBN 979-5-902080-20-5.

9 Instructions for the repair and maintenance of automatic couplers of railway rolling stock : approved at the 54th meeting of the Council on Railway Transport of the Commonwealth Member States, (protocol dated 18–19.05.2010 No. 54). – 2010. – 96 p. – ISBN 978-5-16-013042-2.

10 **Agafonov, M. S.** Uncoupling of freight cars for unscheduled repairs for 2023 / M. S. Agafonov // Cars and carriage industry. – 2024. – No. 1. – P. 12–13. – ISSN 1817-6089.

I. K. Sergeev, A. V. Pishchik

THE EFFECTIVENESS OF THE USING COMBINED ELASTOMER AND RUBBER-METAL DRAFT GEARS ON LONG BASE PLATFORM CARS

Abstract. The paper considers some peculiarities of the operating conditions of long-wheelbase flatcars. It is analyzed the main reasons for the failure of elastomeric draft gears. The most rational ways to reduce the load on long-wheelbase flatcars are proposed and justified. An analysis of changes in ambient temperature during the passage of container trains from the Central part of Russia to the Republic of Sakha (Yakutia) was carried out, and ways to ensure trouble-free operation of elastomer and rubber-metal draft gears were proposed. A computational model is proposed to study the operation of sequentially located (double) draft gears. The necessity of using computer modeling methods to test the effectiveness of the proposed arrangement of draft gears is substantiated.

Keywords: freight cars, car dynamics, high-value commodities, draft gears, high-speed container trains, railways of Yakutia.

For citation: Sergeev, I. K. The effectiveness of the using combined elastomer and rubber-metal draft gears on long base platform cars / I. K. Sergeev, A. V. Pishchik // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 8–14. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_2_8.

Сведения об авторах

Сергеев Иван Константинович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: sergeev.workmail@yandex.ru

Пищик Александр Всеволодович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
прикрепленный для подготовки диссертации
на соискание ученой степени кандидата наук
без освоения программы подготовки
научных и научно-педагогических кадров в
аспирантуре,
e-mail: alexander.p96@mail.ru

Information about the authors

Sergeev Ivan Konstantinovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair «Wagons and Wagons Economy»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: sergeev.workmail@yandex.ru

Pishchik Alexander Vsevolodovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair «Wagons and Wagons Economy»,
Attached to prepare a dissertation for the scientific
degree of Candidate of Sciences without mastering
the program for training scientific
and scientific-pedagogical personnel
in graduate school,
e-mail: alexander.p96@mail.ru

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 004.032.26 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_15

*С. Л. Никитченко, К. Э. Зырянкина***ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В ЗАПАСНЫХ ЧАСТЯХ ГИДРОСИСТЕМ МАШИН
С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

Аннотация. Рассмотрена возможность применения искусственных нейронных сетей с целью прогнозирования потребности в запасных частях гидросистем машин. Проведен анализ распределения неисправностей применительно к наземным транспортно-технологическим средствам, а также представлены результаты анализа существующих традиционных методов резервирования. Предложен подход к обучению искусственной нейронной сети, основанный на модели многослойного персептрона. Представлена реализация варианта переобучения искусственной нейронной сети типа многослойный персептрон для прогнозирования потребности в запасных частях гидросистем машин на базе малых объемов входных данных за прошедшие годы с использованием современной технологии «Data Mining» на платформе «1С: Предприятие». Результаты исследования могут быть полезны для оптимизации запасов запасных частей и повышения эффективности работы гидросистем машин.

Ключевые слова: методы прогнозирования, методы резервирования, нейросетевые методы, гидросистемы машин, прогноз, алгоритм, отказ, нейронные сети, искусственный интеллект, обучающая выборка, многослойный персептрон, эффективность, ERP-решения, среднеквадратическая ошибка.

Для цитирования: Никитченко, С. Л. Прогнозирование потребности в запасных частях гидросистем машин с применением нейронной сети / С. Л. Никитченко, К. Э. Зырянкина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 15–24. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_15.

Введение

Бесперебойная работа технологического оборудования на предприятиях является одним из условий экономического успеха. Для выполнения данного условия важно не только правильно организовать эксплуатацию, качественный ремонт и техническое обслуживание машин, но и обеспечить некоторый резерв запасных частей на предприятии. Резервирование позволяет сократить простои машин по техническим причинам и увеличить их производительность. Применительно к наземным транспортно-технологическим средствам актуальным является вопрос резервирования запасных частей для гидравлических систем. По данным авторов [1] для элементов гидроприводов характерно следующее распределение неисправностей: гидронасосы – 11...20 %; гидрораспределители – 15...30 %; распределительные устройства – до 20 %; отказы элементов привода гидронасосов и других устройств – до 18 %. Наши исследования также показывают, что доля отказов гидравлических рукавов здесь может составлять 40–50 %. Важно, что частые отказы элементов гидросистем машин в основном приходятся на период работ, когда простои техники крайне нежелательны. Снижение простоев через резервирование запасных частей требует наличия соответствующего метода расчета величины резерва.

Анализ существующих традиционных методов резервирования показывает, что они в основном базируются на применении нормативов расхода запчастей или на теории статистики и требуют значительного числа наблюдений потребления запасных частей в прошлые периоды [2–4]. Также в последнее время распространены методы эволюционного моделирования, в том числе с применением генетических алгоритмов [5] и нейросетевые методы [6]. Последние два являются интеллектуальными методами. Сложность применения традиционных методов в том, что существующие нормативы расхода запасных частей устарели и не отражают реального потребления, а статистические методы требуют больших объемов исходных данных, которые в предприятиях получить не всегда возможно.

Одним из возможных современных решений данной проблемы является использование нейросетевых алгоритмов для прогнозирования потребности в запчастях. Нейронные сети обладают способностью обучения на основе исторических данных о потреблении конкретной запасной части со

склада в прошлые периоды. При этом малые выборки собственных данных предприятий здесь не являются существенным препятствием для выработки прогноза. Пример применения нейросетей в ERP-решениях реализован в виде отечественного программного обеспечения «1С: Предприятие» [7].

Основная часть

Целью проводимого исследования выступает обоснование нейросетевого метода прогнозирования потребности в запчастях гидросистем машин, позволяющий вести прогноз на малых объемах данных за прошлые годы.

Научная новизна работы заключается в реализации варианта переобучения искусственной нейронной сети типа многослойный перцептрон для прогнозирования потребности в запасных частях гидросистем машин на базе малых объемов входных данных за прошедшие годы с использованием современной технологии «Data Mining» на платформе «1С: Предприятие» [8]. Использование нейросетей «1С: Предприятие» для программного обеспечения позволит интегрировать данный метод прогнозирования с существующими информационными системами, что упростит его внедрение и использование.

Для достижения поставленной цели был использован алгоритм интеллектуального метода прогнозирования потребности в запасных частях, основанный на модели многослойного перцептрона [9, 10]. При этом реализован метод прогнозирования для временных рядов, основанный на искусственных нейронных сетях. Это позволяет получить более точные прогнозы по сравнению с традиционными методами, например, такими, как линейная регрессия или простая описательная статистика.

В качестве метода оценки качества прогноза в рамках задачи прогнозирования было принято решение использовать метрику для регрессионных моделей – среднеквадратичную ошибку (MSE), которая измеряет разницу между предсказанными значениями и истинными значениями зависимой переменной. Показатель MSE полезен для симметричных ошибок, так как способен оценить среднее значение и колебания грубых ошибок, что упрощает разбивку и анализ демонстрации различных моделей. Также данная метрика эффективна для определения точек данных или выбросов, которые существенно влияют на производительность модели [11].

Нейросетевой метод осуществляет автоматическое прогнозирование спроса исходя из входных характеристик временного ряда потребления запасных частей за предыдущие годы. Предварительный этап прогнозирования включает восстановление спроса из ряда потребления запасных частей для гидросистем машин предприятия. В табл. 1 показаны временные ряды потребления с 2014 по 2022 годы для запасных частей гидросистем машин, отказ которых наиболее часто случается в период эксплуатации и приводит к продолжительным простоям техники.

Таблица 1

Данные о потреблении запасных частей для гидросистем машин предприятия

№ п/п	Наименование запасной части	Потребление по годам, ед.								
		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	Насос шестеренный НШ-32А-3	4	2	5	3	5	1	0	4	2
2	Насос шестеренный НШ-10	6	3	2	4	5	2	2	1	4
3	Гидрораспределитель МР-80-4/4-222	3	1	5	4	1	2	4	2	3
4	Рукав 16×25-1,6, (м)	7,2	9,0	10,8	9,3	12,5	18,7	15,6	9	11
5	Рукав 20×1,5 L 810	3	2	6	2	4	2	4	8	5
6	Рукав 20×1,5 L-1210	9	8	10	11	4	9	12	16	11
7	Рукав 20×1,5L-1010	19	23	17	12	8	20	12	27	18
8	Клапан перепускной 41А-16с13	4	3	1	3	3	2	0	1	3
9	Привод 238АК-4611210 насоса НШ-32	3	1	5	4	4	2	1	0	3
10	Трубка 245-1104180-А1-Х	7	9	11	5	5	10	8	7	9

С целью повышения качества прогноза была разработана схема подготовки входной информации нейронной сети, которая является одним из важных этапов проведения исследований (рис. 1).

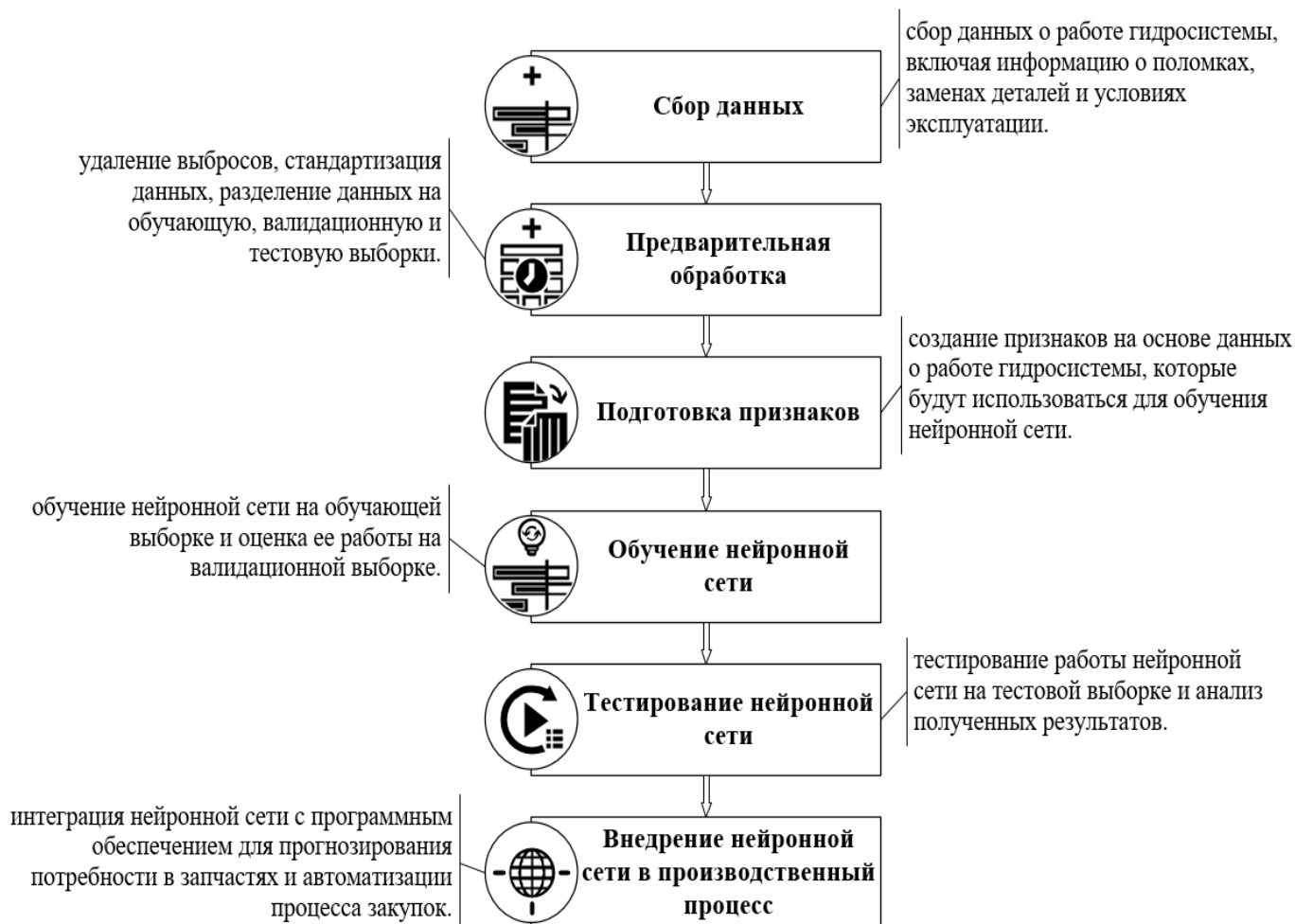


Рис. 1. Схема подготовки входной информации и реализации прогноза с помощью искусственной нейронной сети

Схема подготовки входной информации важна для корректной работы нейронной сети и обеспечения точных результатов прогнозирования. В отличие от многих других нейронных сетей, предлагаемое решение автоматизирует процесс расчета границ и обучения нейронной сети, которое занимает относительно небольшое количество времени даже при большом количестве итераций.

Разрабатываемая нейронная сеть будет строиться на основе многослойного персептрона, который в свою очередь имеет три слоя:

- 1) входной;
- 2) выходной;
- 3) скрытый.

Многослойный персептрон состоит из элементов с нелинейной функцией активации. Данный вид искусственной нейронной сети широко применяется для задач классификации и регрессии [12]. Математическая модель нейрона многослойного персептрона представляет собой расчет выхода k -нейрона слоя $i + 1$ как взвешенной суммы всех его входов со слоя i , к которой, в свою очередь, применена функция активации, нормализующая выходной сигнал (рис. 2) [13].

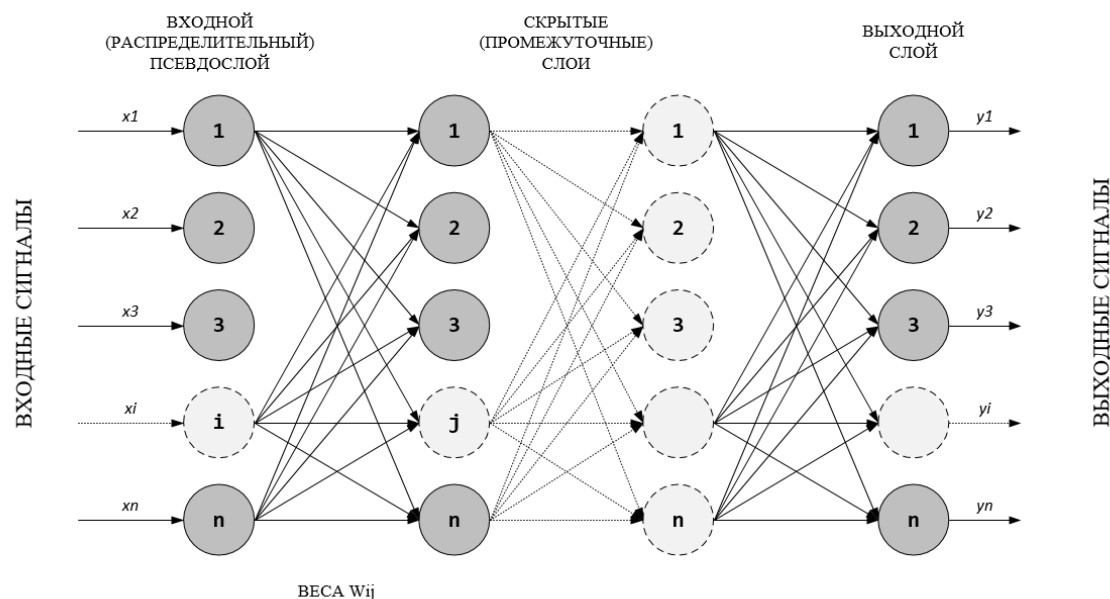


Рис. 2. Структурная схема многослойного персептрона

Для персептрона используют функции активации – сигмоид или ReLu, что позволяет сети обучаться более сложным функциям и делать более точные предсказания. Обучение многослойного персептрона на наборе данных осуществляли с использованием алгоритма обучения с обратным распространением ошибки [14]. При этом сеть настраивает свои веса и смещения, чтобы минимизировать ошибку на обучающем множестве.

Для программной реализации нейросетевого метода прогнозирования было принято решение использовать технологическую платформу «1С: Предприятие». Данный программный продукт предусматривает собственный встроенный язык программирования, который обеспечивает гибкость для реализации решений задач, стоящих перед пользователями. На выбор среды разработки здесь повлияли следующие факторы:

- массовое распространение в отечественном бизнесе и вхождение в реестр отечественного ПО;
- легкость встраивания в решения и независимость от сторонних продуктов;
- простота понимания программного кода и механики работы;
- отсутствие высоких технических требований к рабочему месту для запуска информационной платформы.

В 1С-программировании реализацию многослойного персептрона можно осуществить с использованием сигмоида и библиотек нейронных сетей TensorFlow и Keras, являющихся внешними компонентами. Имея в наличии исходные данные о потреблении запасных частей за прошедшие годы и вводя их в нейронную сеть на прогнозируемый период, пользователь получит ожидаемый прогноз потребления запасных частей на будущий год.

При реализации процедуры обучения и прогнозирования данных сложность представляют процесс нормализации и масштабирования входных данных, а также интерпретация результата на выходе. Это вызвано тем, что сигмоид осуществляет работу в диапазоне от 0 до 1 как на входе, так и на выходе. В работе были нормализованы данные на входе и денормализованы на выходе, для чего был разработан соответствующий программный код.

Процесс обучения нейронной сети осуществляли по методу обратного распространения ошибки. Фрагмент кода для реализации процедуры обучения сети показан на рис. 3. Он позволяет настроить веса связей между нейронами таким образом, чтобы сеть выдавала правильный результат на выходе для заданного входного сигнала.

```

//создаем сеть
Сеть = ТОBJECT.СоздатьСеть (ОBJECT.КоличествоВходов, OBJECT.КоличествоНейроновСкрытогоСлоя, OBJECT.КоличествоВыходов);

Для n = 1 по OBJECT.КоличествоИтераций Цикл

    Для каждого стр из OBJECT.ВходнаяВыборка Цикл
        //вычисление на прямом проходе
        ТОBJECT.Feedforward(Сеть, стр);
        //обучение
        ТОBJECT.ОбратноеРаспространениеИОбучение(Сеть, стр);
    КонечЦикла;
КонечЦикла;

ИмяВременногоФайлаСеть = ПолучитьИмяВременногоФайла();
ИмяВременногоФайлаГраницы = ПолучитьИмяВременногоФайла();

ЗначениеВФайл(ИмяВременногоФайлаСеть, Сеть);
ЗначениеВФайл(ИмяВременногоФайлаГраницы, OBJECT.ГраницыИнтервалов.Выгрузить());

АдресФайлСети = ПоместитьВоВременноеХранилище(Новый ДвоичныеДанные(ИмяВременногоФайлаСеть), УникальныйИдентификатор);
АдресФайлГраницы = ПоместитьВоВременноеХранилище(Новый ДвоичныеДанные(ИмяВременногоФайлаГраницы), УникальныйИдентификатор);

```

Рис. 3. Фрагмент кода обучения нейронной сети на основе метода обратного распространения ошибки

Суть метода обратного распространения ошибки заключается в том, что сначала входной сигнал проходит через все слои нейронной сети, и на выходе получают некоторый результат. Затем сравнивают этот результат с тем, что хотели получить, и вычисляют ошибку. После этого идут в обратном направлении по слоям сети и корректируют веса связей таким образом, чтобы ошибка уменьшилась. Этот процесс повторяется до тех пор, пока ошибка не станет достаточно малой [15].

При выборе количества нейронов скрытого слоя руководствовались тем, что при их малом количестве искусственная нейронная сеть не будет способна выучить сложную зависимость, а при избыточном числе нейронов – велика вероятность «зазубривания» возможных результатов. Под поставленную нами задачу для обучения сети было определено: 4 входных слоя, нейроны скрытого слоя в количестве 15 и один ожидаемый выход.

Была определена последовательность действий для работы с разрабатываемой информационной системой:

- 1) указать локальные файлы, в которые будет производиться сохранение рассчитанных весов сети (синапсов) и границ интервалов;
- 2) определить параметры нейронной сети (количество входов, нейронов скрытого слоя, выходов) и количество необходимых итераций;
- 3) заполнить данными обучающую выборку;
- 4) заполнить границы интервалов;
- 5) выполнить обучение нейронной сети;
- 6) ввести данные для прогнозирования;
- 7) получить результат.

Обучение сети для решения задачи прогнозирования потребности в запасных частях на 2023 год выполнялось на основе данных временного ряда, представленных в табл. 1. Для обучения сети было определено количество итераций в размере 30 000.

После того, как искусственная нейронная сеть прошла процедуру обучения и записала в файлы рассчитанные синапсы и границы интервалов, проведено тестирование процедуры прогноза (рис. 4).

Вход1	Вход2	Вход3	Вход4	Вход5	Ожидаемый выход1	
Вход1 (норм.)	Вход2 (норм.)	Вход3 (норм.)	Вход4 (норм.)	Вход5(норм.)	Ожидаемый выход1 (норм.)	
5,00	1,00			4,00	2,00	2,31660
0,18182		-0,05263	0,20000	0,07407	0,08580	
5,00	2,00	2,00	1,00	4,00		2,14407
0,18182	0,04545	0,05263	0,05000	0,14815	0,07941	
1,00	2,00	4,00	2,00	3,00		2,27934
	0,04545	0,15789	0,10000	0,11111	0,08442	
8,00	20,00	12,00	27,00	18,00		19,91628
0,31818	0,86364	0,57895	1,35000	0,66667	0,73764	
3,00	2,00		1,00	3,00		1,81440
0,09091	0,04545	-0,05263	0,05000	0,11111	0,06720	
4,00	2,00	1,00		3,00		1,60839
0,13636	0,04545			0,11111	0,05957	
5,00	10,00	8,00	7,00	9,00		9,93276
0,18182	0,40909	0,36842	0,35000	0,33333	0,36788	

Рис. 4. Фрагмент окна программы в процессе тестирования процедуры прогноза

Предлагаемый нейросетевой метод прогнозирования потребности в запасных частях сравнивали с традиционно используемым методом прогноза по критерию – сумма модулей ошибок отклонений $|\Delta_i|$:

$$E = \sum_{i=1}^n |\Delta_i| = \sum_{i=1}^n |y_{\phi i} - y_{pi}|,$$

где $y_{\phi i}$ – фактическое значение потребления i -й запасной части в планируемом году, шт.;

y_{pi} – расчетное значение резерва для i -й запасной части на планируемый год, полученное по предлагаемому методу или традиционному методу расчета, шт.;

n – количество наименований резервируемых запасных частей.

Более эффективным считали тот метод расчета, для которого критерий (см. формулу) имел наименьшее значение. В качестве традиционного метода расчета величины резерва рассматривали метод по определению среднего значения годового потребления запчастей за прошлые годы.

На рис. 5 показан график реального расхода запасных частей на примере гидрораспределителя МР-80-4/4-222 за последние 9 лет и результат нейросетевого прогноза потребности на 2023 год.



Рис. 5. График фактического расхода запчастей «Гидрораспределитель МР-80-4/4-222» для 2014–2023 гг. и прогноза на 2023 г.

При обучении нейронной сети для указанной запчастей удалось добиться минимального среднего расстояния $|\Delta_i| = 1$ между прогнозируемыми значениями из модели и фактическими значениями в наборе данных «Функция» из среднеквадратичной ошибки MSE является оценкой качества прогноза. В нашем случае ошибка прогноза для наиболее нагруженных в потреблении запасных частей составляет 6–7 %, что допустимо.

Результаты определения величины резерва на 2023 год для каждой рассматриваемой запасной части по предлагаемому нейросетевому методу и по традиционному методу среднего годового потребления показаны в табл. 2. Здесь же представлены значения фактического потребления запасных частей в 2023 году и величины критерия E для обоих методов расчета.

Таблица 2

Результаты прогнозирования потребности в запасных частях гидросистем машин на 2023 год по предлагаемому и традиционному методам

№ п/п	Наименование запасной части	Фактическое потребление в 2023 г., шт.	Традиционный метод прогноза		Нейросетевой метод прогноза	
			Величина резерва, шт.	Модуль отклонения $ \Delta_i $	Величина резерва, шт.	Модуль отклонения $ \Delta_i $
1	Насос шестеренный НШ-32А-3	2	3	1	3	1

Окончание табл. 2

№ п/п	Наименование запасной части	Фактическое потребление в 2023 г., шт.	Традиционный метод прогноза		Нейросетевой метод прогноза	
			Величина резерва, шт.	Модуль отклонения $ \Delta_i $	Величина резерва, шт.	Модуль отклонения $ \Delta_i $
2	Насос шестеренный НШ-10	3	3	0	3	0
3	Гидрораспределитель МР-80-4/4-222	4	3	1	3	1
4	Рукав 16x25-1,6	11,5	11,4	0,1	11,4	0,1
5	Рукав 20x1,5 L 810	4	4	0	4	0
6	Рукав 20x1,5 L-1210	11	10	1	11,1	0,1
7	Рукав 20x1,5L-1010	20	17	3	20	0
8	Клапан перепускной 41А-16с13	2	2	0	2	0
9	Привод 238АК-4611210 насоса НШ-32	3	2	1	2	1
10	Трубка Трубка 245-1104180-А1-Х	8	9	1	10	2
Величина критерия $E = \sum_{i=1}^n \Delta_i $			–	8,1	–	5,2

По данным табл. 2 видно, что результаты прогноза резерва запасных частей по предлагаемому нейросетевому методу максимально близки к значениям фактического потребления. При этом значение принятого оценочного критерия $E = 5,2$ минимально для случая применения нейросетевого метода, что говорит о его более высокой точности прогноза.

Выводы

В данной статье был рассмотрен метод прогнозирования потребности в запчастях для гидросистем машин с использованием нейросетевых технологий, который позволяет вести прогноз на малых объемах собственных данных предприятия за прошлые годы с допустимой ошибкой прогноза 6–7 %. Используемая нейросетевая архитектура основана на многослойном персептроне с функцией активации сигмоид, четырьмя входными слоями, 15 нейронами скрытого слоя и одним ожидаемым выходом. Был предложен метод подготовки данных, а также проведено обучение нейронной сети на основе собственных данных конкретного предприятия за прошлые девять лет. Реализация предлагаемых решений на платформе «1С: Предприятие» показывает, что использование нейросетевого подхода позволяет повысить точность прогнозирования потребности в запчастях по сравнению с традиционными методами. Это может способствовать снижению затрат на обслуживание гидросистем и снижению простоев машин по техническим причинам. Учитывая массовое распространение продуктов 1С, можно интегрировать предлагаемую методику прогноза потребности в запчастях с существующими информационными системами без дополнительных затрат для конечных пользователей.

Дальнейшее развитие этой темы предполагает повышение точности прогноза за счет совершенствования архитектуры нейронной сети.

Список литературы

- 1 **Рылякин, Е. Г.** Влияние эксплуатационных факторов на изменение надежности гидроагрегатов мобильных машин / Е. Г. Рылякин, А. В. Курылев // Молодой ученый. – 2014. – № 4 (63). – С. 247–249. – ISSN 2072-0297.
- 2 **Филатов, М. И.** Формирование резерва запасных частей для ремонта транспортно-технологических машин / М. И. Филатов, О. В. Юсупова // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – № 10 (171). – С. 213–218. – ISSN 1814-6457.

References

- 1 **Rylyakin, E. G.** Influence of operational factors on changes in the reliability of hydraulic units of mobile machines / E. G. Rylyakin, A. V. Kurylev // Young scientist. – 2014. – No. 4 (63). – P. 247–249. – ISSN 2072-0297.
- 2 **Filatov, M. I.** Formation of a reserve of spare parts for repair of transport technological machines / M. I. Filatov, O. V. Yusupova // Bulletin of the Orenburg State University. – 2014. – No. 10 (171). – P. 213–218. – ISSN 1814-6457.

3 **Верительник, Е. А.** Возможности определения потребности запасных частей для автотранспортных предприятий с использованием нейронной сети / Е. А. Верительник, А. В. Калинин // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2021. – № 12 (54). – С. 146–150. – ISSN 2522-4905.

4 Прогнозирование расходов запасных частей на автосервисных предприятиях с использованием корреляционно-регрессионного анализа / И. Ф. Воронина, Ф. М. Судак, А. С. Чернецкий, А. И. Матин // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2019. – № 2 (29). – С. 27–34. – ISSN 1990-7796.

5 Оптимизация заказа запасных частей на автотранспортных / И. Ф. Воронина, Ф. М. Судак, В. С. Перов [и др.] // Вести автомобильно-дорожного института. – 2021. – № 1 (36). – С. 50–55. – ISSN 1990-7796.

6 **Никитченко, С. Л.** Совершенствование методов резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники на основе генетических алгоритмов / С. Л. Никитченко, Д. В. Гринченков // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24, № 6. – С. 25–31. – DOI 10.26897/2687-1149-2022-6-25-31.

7 **Серебряков, Н. А.** Выбор оптимальной архитектуры и конфигурации нейросети в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления гарантирующего поставщика электроэнергии / Н. А. Серебряков // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2021. – № 2 (64). – С. 26–42. – DOI 10.53015/18159958_2021_2_26.

8 **Шитова, Т. Ф.** 1С : ERP – эффективный инструмент развития цифровой экономики / Т. Ф. Шитова, С. Ф. Молодецкая // Муниципалитет : экономика и управление. – 2021. – № 3 (36). – С. 36–45. – DOI 10.22394/2304-3385-2021-3-36-45.

9 **Филяк, П. Ю.** Применение инструментальных средств для работы с Big Data и Data Mining в решении проблем обеспечения безопасности организации / П. Ю. Филяк, Э. Э. Байларли, В. И. Старченко // Информация и безопасность. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 133–136. – ISSN 1682-7813.

10 **Гейдаров, П. Ш.** Исследование устойчивости многослойного перцептрона с вычисляемыми весами синапсов к меньшим объемам обучающей выборки / П. Ш. Гейдаров // Информационно-управляющие системы. – 2023. – № 2 (123). – С. 2–14. – DOI 10.31799/1684-8853-2023-2-2-14.

3 **Veritelnik, E. A.** Possibility of determining the need for spare parts for motor transport enterprises using a neural network / E. A. Veritelnik, A. V. Kalinin // Bulletin of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. – 2021. – No. 12 (54). – P. 146–150. – ISSN 2522-4905.

4 Prediction of spare parts consumption at service centers using correlation and regression analysis / I. F. Voronina, F. M. Sudak, A. S. Chernetsky, A. I. Matin // News of the Automobile and Highway Institute. – 2019. – No. 2 (29). – P. 27–34. – ISSN 1990-7796.

5 Optimization of the spare parts order at the motor transport enterprises / I. F. Voronina, F. M. Sudak, V. S. Perov [et. al.] // News of the Automobile and Highway Institute. – 2021. – No. 1 (36). – P. 50–55. – ISSN 1990-7796.

6 **Nikitchenko, S. L.** Possibilities of determining the demand of spare parts for transport enterprises using a neural network / S. L. Nikitchenko, D. V. Grinchenkov // Agroengineering. – 2022. – Vol. 24, No. 6. – P. 25–31. – DOI 10.26897/2687-1149-2022-6-25-31.

7 **Serebryakov, N. A.** The selection of the optimal architecture and configuration of the neural network for a short-term load forecasting of default provider / N. A. Serebryakov // News of higher educational institutions of the Chernozem region. – 2021. – No. 2 (64). – P. 26–42. – DOI 10.53015/18159958_2021_2_26.

8 **Shitova, T. F.** 1С : ERP – an efficient tool of the digital economy development / T. F. Shitova, S. F. Molodetskaya // Municipality: economics and management. 2021. – No. 3 (36). – P. 36–45. – DOI 10.22394/2304-3385-2021-3-36-45.

9 **Filyak, P. Yu.** Application of tools for working with Big Data and Data Mining in solving problems of ensuring the security of an organization / P. Yu. Filyak, E. E. Baylarli, V. I. Starchenko // Information and Security. – 2017. – Vol. 20, No. 1. – P. 133–136. – ISSN 1682-7813.

10 **Heydarov, P. Sh.** Investigating stability of a multilayer perceptron with calculated synaptic weights to smaller training sample sizes / P. Sh. Heydarov // Information and control systems. – 2023. – No. 2 (123). – P. 2–14. – DOI 10.31799/1684-8853-2023-2-2-14.

11 **Пастухов, А. А.** Применение самоорганизующихся карт Кохонена для формирования представительской выборки при обучении многослойного перцептрона / А. А. Пастухов, А. А. Прокофьев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2016. – № 2 (242). – С. 95–107. – DOI 10.5862/JPM.242.11.

12 **Андриевская, Н. К.** Применение статистических методов, кластерного анализа и нейросетевых технологий при прогнозировании закупочных цен лекарств / Н. К. Андриевская, Т. В. Мартыненко, Т. А. Васяева // Проблемы искусственного интеллекта. – 2023. – № 4 (31). – С. 41–55. – DOI 10.34757/2413-7383.2023.31.4.005.

13 **Сивак, М. А.** Настройка робастных нейронных сетей для решения задачи классификации / М. А. Сивак, В. С. Тимофеев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2021. – Т. 24, № 3. – С. 26–32. – DOI 10.21293/1818-0442-2021-24-3-26-32.

14 **Пономарев, Д. С.** Применение нейронных сетей на основе многослойного перцептрона с сигмоидальной функцией активации к решению проблем дезодорации воды / Д. С. Пономарев, В. Г. Исаков, М. М. Горохов // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сборник трудов региональной научно-технической конференции, Ижевск, 31 мая 2018 года / ответственный редактор К. Ю. Петухов. – Ижевск : Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова, 2018. – С. 19–24. – ISBN 978-5-7526-0812-4.

15 **Абрамова, Е. С.** Сравнение машины экстремального обучения и метода обратного распространения ошибки при решении задачи распознавания физической активности человека / Е. С. Абрамова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 117–124. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-2-117-124.

16 **Ивановский, М. Н.** Применение метода обратного распространения ошибки для обучения нейронной сети / М. Н. Ивановский, О. П. Шафеева // Информационные технологии в науке и производстве : материалы V Всероссийской молодежной научно-технической конференции, Омск, 25–26 апреля 2018 года. – Омск : Омский государственный технический университет, 2018. – С. 39–43. – ISBN 978-5-8149-2624-1.

11 **Pastukhov, A. A.** Kohonen self-organizing map application to representative sample formation in the training of the multilayer perceptron / A. A. Pastukhov, A. A. Prokofiev // Scientific and technical bulletins of the Saint Petersburg State Polytechnic University. Physical and mathematical sciences. – 2016. – No. 2 (242). – P. 95–107. – DOI 10.5862/JPM.242.11.

12 **Andrievskaya, N. K.** Application of statistical methods, cluster analysis and neural network technologies in forecasting procurement prices for medicines / N. K. Andrievskaya, T. V. Martynenko, T. A. Vasyaeva // Problems of artificial intelligence. – 2023. – No. 4 (31). – P. 41–55. – DOI 10.34757/2413-7383.2023.31.4.005.

13 **Sivak, M. A.** Adjusting robust neural networks for solving the classification problem / M. A. Sivak, V. S. Timofeev // Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. – 2021. – Vol. 24, No. 3. – P. 26–32. – DOI 10.21293/1818-0442-2021-24-3-26-32.

14 **Ponomarev, D. S.** Substantiation of the use of a neural network based on a multilayer perceptron with sigmoidal activation function to solve the problem of water deodorization / D. S. Ponomarev, V. G. Isakov, M. M. Gorokhov // Information technologies in science and industry and education : Collection of proceedings of the regional scientific and technical conference, Izhevsk, May 31, 2018 / Executive editor K. Yu. Petukhov. – Izhevsk : Izhevsk State Technical University named after. M. T. Kalashnikova, 2018. – P. 19–24. – ISBN 978-5-7526-0812-4.

15 **Abramova, E. S.** Comparison of extreme learning machine and backpropagation method in the human activity recognition / E. S. Abramova // News of Tula State University. Technical science. – 2023. – No. 2. – P. 117–124. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-2-117-124.

16 **Ivanovsky, M. N.** Application of the backpropagation method for training a neural network / M. N. Ivanovsky, O. P. Shafeeva // Information technologies in science and production : materials of the V All-Russian Youth Scientific and Technical Conference, Omsk, April 25–26, 2018. – Omsk : Omsk State Technical University, 2018. – P. 39–43. – ISBN 978-5-8149-2624-1.

S. L. Nikitchenko, K. E. Zyryankina

FORECASTING THE NEED FOR SPARE PARTS OF MACHINE HYDRAULIC SYSTEMS USING A NEURAL NETWORK

Abstract. The paper considers the possibility of using artificial neural networks to predict the need for spare parts for machine hydraulic systems. The analysis of the distribution of faults is carried out in relation to ground transport and technological means, and the results of the analysis of existing traditional methods of reservation are presented. An approach to training an artificial neural network based on the multilayer perceptron model is proposed. The implementation of a variant of retraining an artificial neural network of the multilayer perceptron type for predicting the need for spare parts for machine hydraulic systems based on small volumes of input data for the past years using modern Data Mining technology on the 1C: Enterprise platform is presented. The results of the study can be useful for optimizing spare parts stocks and increasing the efficiency of machine hydraulic systems.

Keywords: forecasting methods, reservation methods, neural network methods, hydraulic systems of machines, forecast, algorithm, failure, neural networks, artificial intelligence, training sample, multilayer perceptron, efficiency, ERP solutions, mean square error.

For citation: Nikitchenko, S. L. Forecasting the need for spare parts of machine hydraulic systems using a neural network / S. L. Nikitchenko, K. E. Zyryankina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 15–24. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_15.

Сведения об авторах

Никитченко Сергей Леонидович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: binom_a@rambler.ru

Зырянкина Ксения Эдгаровна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления»,
ассистент,
e-mail: kzyryankina@yandex.ru

Information about the authors

Nikitchenko Sergey Leonidovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computer Technology and Automated Control Systems»,
Candidate of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: binom_a@rambler.ru

Zyryankina Ksenia Edgarovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computer Technology and Automated Control Systems»,
Assistant,
e-mail: kzyryankina@yandex.ru

С. В. Соколов, А. Л. Охотников, А. В. Костюков, Д. В. Маршаков

ВЫСОКОТОЧНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛОКОМОТИВА В УСЛОВИЯХ НЕСТАБИЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация. Предложено решение проблемы, возникающей при позиционировании беспилотных транспортных объектов, в частности локомотивов, в условиях городской застройки и интенсивных помех. В настоящее время широкий класс объектов городской и железнодорожной инфраструктуры создает непредсказуемый характер помех, воздействующих на сенсоры беспилотного локомотива. В этом случае при подъезде к опорному объекту инфраструктуры становится невозможным использование как спутниковых измерений, так и различных датчиков системы технического зрения. В связи с этим в статье для решения поставленной задачи (устойчивого высокоточного решения задачи позиционирования локомотива) предлагается использовать в качестве навигационных датчиков автономные измерители параметров линейного движения локомотива, а для обработки зашумленных измерений – фильтр Калмана и метод робастной фильтрации.

Ключевые слова: спутниковые измерения, навигационные параметры, фильтр Калмана, робастный фильтр, навигационная система локомотива, система технического зрения, цифровая модель пути.

Для цитирования: Высокоточное позиционирование беспилотного локомотива в условиях нестабильных спутниковых измерений / С. В. Соколов, А. Л. Охотников, А. В. Костюков, Д. В. Маршаков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 25–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_25.

Введение

При управлении локомотивом в беспилотном режиме одной из центральных задач является его высокоточное позиционирование. Помимо навигационных аспектов решения этой задачи в этом случае обеспечивается еще и повышение безопасности движения, т. к. резко снижается вероятность столкновения с препятствиями и недопустимого проезда различных опорных объектов (платформ, стрелок и пр.) [1]. Высокоточное позиционирование также решает множество других задач, актуальных для всех видов железнодорожного транспорта: определение номера занимаемого пути, переходов по стрелкам, расстояний до любых объектов железнодорожной инфраструктуры, границ путевых секций и др.

На сегодняшний день проблема высокоточного позиционирования локомотивов решается самыми различными способами: использованием спутниковых навигационных сообщений, электронных карт местности (а также их комплексированием [2]), датчиков положения локомотива, активных и пассивных реперных элементов (ориентиров) и т. д. При использовании спутниковых навигационных сообщений основной нерешенной проблемой является отказ навигационной системы при невалидности (пропадании) спутникового сигнала, значительное время выхода на стационарный режим высокоточного позиционирования по окончании периода невалидности (что достаточно ощутимо проявляется, в частности, при приближении локомотива к различным объектам железнодорожной инфраструктуры: станции, железнодорожному знаку, семафору и др.), а также усложнение и удорожание информационно-вычислительного комплекса локомотива за счет дополнительной установки внештатной аппаратуры [3–6]. Другие вышеперечисленные способы также усложняют и удорожают информационно-вычислительный комплекс локомотива: дополнительным введением радаров или инфракрасных камер/датчиков [7], комплекса, измеряющего расстояние на основе разделения изображений [8], видеокамер, геодезической 3D-базы данных, акселератора, электронного и рулевого блоков управления [2] и пр.

Постановка задачи

Наличие подобных проблем приводит к необходимости поиска новых подходов к решению задачи позиционирования локомотива, причем высокоточного и в условиях неизбежных помех измерения используемых сенсоров информационно-вычислительного комплекса локомотива.

Ниже исследуем один из наиболее перспективных вариантов ее решения – с использованием автономных измерителей штатного информационно-управляющего комплекса локомотива и методов теории нелинейной фильтрации.

Решение задачи

На рис. 1 представлена функциональная схема реализации метода высокоточного позиционирования локомотива при приближении к реперному элементу или другому опорному объекту инфраструктуры (станции, железнодорожному знаку, семафору и др.).

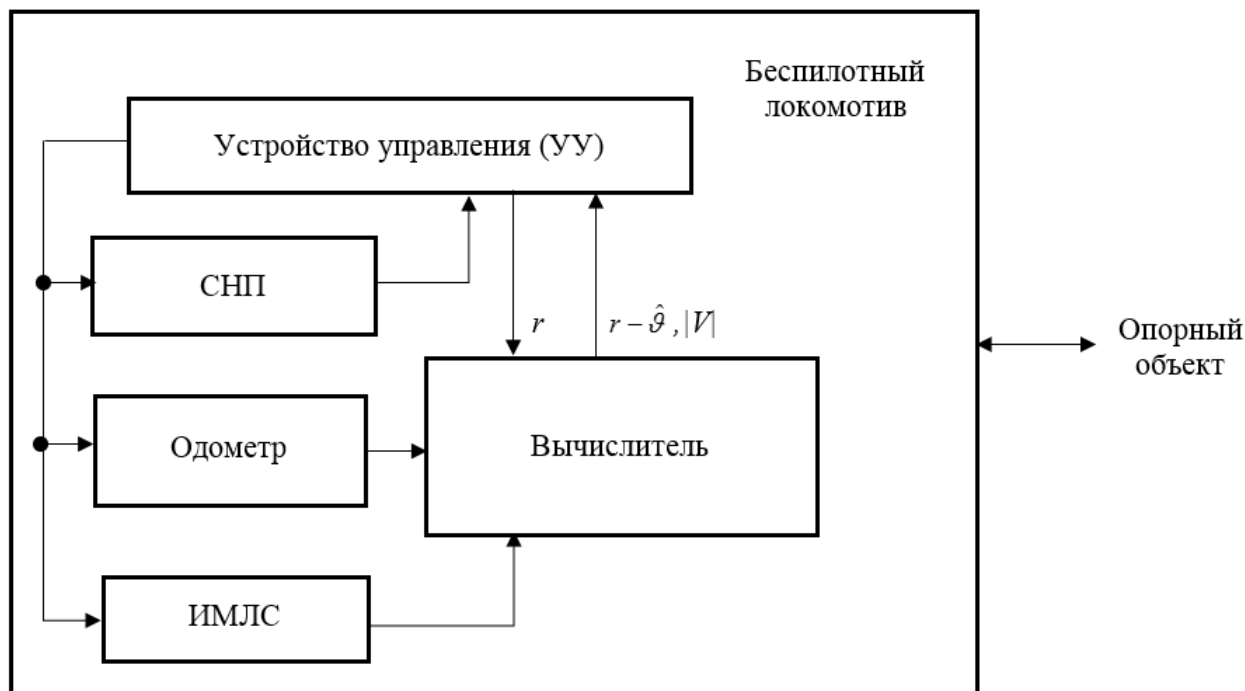


Рис. 1. Функциональная схема реализации метода высокоточного позиционирования беспилотного локомотива

Данный метод позиционирования реализуется следующим образом.

Высокоточное позиционирование локомотива в штатном режиме

При определении положения локомотива относительно какого-либо реперного элемента (ориентира), точные координаты которого заданы в цифровой модели пути (ЦМП), полагаем, что в устройство управления (УУ) в штатном режиме с выхода спутникового навигационного приемника (СНП) поступают текущие координаты локомотива, измеренные по принятым спутниковым навигационным сообщениям. Совместное использование координат локомотива и ЦМП обеспечивает в этом случае очевидную возможность текущего определения положения локомотива относительно заданного реперного элемента (ориентира). Но, как правило, при подъезде к реперному элементу спутниковые измерения или пропадают, или сильно искажаются, т. е. оказываются невалидными.

Подобное обстоятельство приводит к необходимости использования для определения текущего положения локомотива автономных средств измерения: доплеровского измерителя скорости или лидара (как измерителей модуля линейной скорости), а также одометра. Данные измерители включаются в момент возникновения невалидности спутниковых измерений. Выходные сигналы одометра (т. е. текущие приращения пути $\hat{\vartheta}$) и измерителя модуля линейной скорости (ИМЛС) поступают в бортовой вычислитель локомотива (в который также поступает с выхода УУ расстояние r локомотива до реперного элемента (ориентира) на момент включения данных измерителей). В бортовом вычислителе с использованием цифровой модели пути и измерений ИМЛС и одометра определяются как оценка текущего расстояния локомотива до реперного элемента ($r - \hat{\vartheta}$), так и оценка текущего модуля скорости локомотива $|\hat{V}|$. Данные оценки далее поступают в УУ, где используются при формировании управления скоростью локомотива и его остановкой по достижении реперного элемента.

При построении реализуемого в бортовом вычислителе алгоритма помехоустойчивого высокоточного оценивания текущего приращения пути $\hat{\vartheta} = \int_0^t |V| dt$, а также модуля скорости $|\hat{V}|$, используются следующие теоретические соображения.

Сигнал измерения одометра Z может быть представлен следующим образом:

$$Z = \int_0^t |V| dt + W_o, \quad (1)$$

где W_o – помеха одометрического измерения, аппроксимируемая далее центрированным белым гауссовским шумом (БГШ) с интенсивностью D_o .

В свою очередь, выходной сигнал измерения ИМЛС Z_s описывается как

$$Z_s = |V| + W_s, \quad (2)$$

где W_s – помеха измерения модуля скорости, аппроксимируемая далее центрированным БГШ с интенсивностью D_s .

При подобных характеристиках помех измерения для оптимального решения задачи высокоточного помехоустойчивого позиционирования локомотива используем далее фильтр Калмана, как обеспечивающий минимум среднеквадратической ошибки оценивания. С целью возможности построения фильтра Калмана в рассматриваемом случае используем новую переменную, описывающую текущее приращение пути: $\vartheta = \int_0^t |V| ds$. Или в дифференциальной форме

$$\dot{\vartheta} = |V|,$$

трансформируемой с учетом уравнения (2) к виду

$$\dot{\vartheta} = Z_s - W_s. \quad (3)$$

Уравнения (3) и (1), рассматриваемые как уравнения объекта и наблюдателя соответственно, позволяют решить поставленную задачу как задачу оптимального линейного оценивания переменной ϑ по наблюдениям

$$Z = \vartheta + W_o.$$

Уравнение оценки в данном случае принимает вид (с учетом $\vartheta_0 = 0$)

$$\dot{\hat{\vartheta}} = Z_s + w D_o^{-1} (Z - \hat{\vartheta}), \quad \hat{\vartheta}_0 = 0, \quad (4)$$

где функция w описывается дисперсионным уравнением (уравнением ошибки фильтрации);

$$\dot{w} = D_s - w^2 D_o^{-1}, \quad w_0 = M[(\hat{\vartheta}_0 - \vartheta_0)^2] = 0. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) допускают аналитическое решение

$$\begin{aligned} w(t) &= \sqrt{D_s D_o} \frac{\exp(2\sqrt{D_s D_o^{-1}} t) - 1}{\exp(2\sqrt{D_s D_o^{-1}} t) + 1}, \\ \hat{\vartheta} &= \exp \left[-D_o^{-1} \int_0^t w(x) dx \right] \int_0^t \left[\exp(D_o^{-1} \int_0^x w(y) dy) \cdot (w(x) D_o^{-1} Z + Z_s) \right] dx = \\ &= \operatorname{sech} \left(\sqrt{\frac{D_s}{D_o}} t \right) \int_0^t \operatorname{ch} \left(\sqrt{D_s D_o^{-1}} x \right) \left(\sqrt{\frac{D_s}{D_o}} \frac{\exp \left(2 \sqrt{\frac{D_s}{D_o}} x \right) - 1}{\exp \left(2 \sqrt{\frac{D_s}{D_o}} x \right) + 1} Z(x) + Z_s(x) \right) dx. \end{aligned} \quad (6)$$

Выражение (4) является оптимальным для решения задачи позиционирования локомотива для выбранного состава измерителей, реализуемого непосредственно в информационно-вычислительном комплексе локомотива.

Высокоточное позиционирование локомотива в условиях неопределенности

В силу специфики ряда объектов железнодорожной инфраструктуры при подъезде к ним, во-первых, становится непредсказуемым характер помех, действующих на упомянутые выше измерители параметров движения локомотива, а во-вторых, оказывается невозможным использование лидаров системы технического зрения (так называемая «мертвая зона»).

В этом случае с момента времени, когда измерения СНП становятся невалидными, для дальнейшего высокоточного определения расстояния локомотива до реперного элемента (или другого опорного объекта инфраструктуры) используются одомер и три акселерометра, расположенные на локомотиве в инерциальном измерительном модуле (ИИМ) (при этом следует отметить, что одомер и ИИМ могут работать также в процессе всего движения совместно с СНП для повышения точности позиционирования).

В этом случае бортовой вычислитель локомотива обеспечивает высокоточную оценку рассмотренных выше параметров движения локомотива ($|V|$ и $\vartheta = \int_0^t |V| ds$) следующим образом.

Полагая отрезок пути перед объектом железнодорожной инфраструктуры прямолинейным, а также учитывая, что на данном участке торможения модуль скорости совпадает с продольной осью локомотива, выходной сигнал Z одометра, пропорциональный длине пройденного пути, можно представить аналогично (1) следующим образом (но с учетом уже неопределенного характера его помехи):

$$Z = \int_0^t |V| ds + W_o, \quad (7)$$

где W_o – помеха одометрического измерения с неизвестной функцией распределения вероятностей.

Для возможности последующего формирования оценки $\hat{\vartheta}$ в бортовом вычислителе далее используем показания трех ортогональных акселерометров a_x, a_y, a_z инерциального измерительного модуля.

Поскольку вектор ускорения в бортовой системе координат (СК) \dot{W} , измеряемый акселерометрами ИИМ, равен:

$$\dot{W} = A(\dot{V} + G),$$

где $[\dot{V}]$ – вектор ускорения, обусловленного движением локомотива, в топоцентрической СК;

$G = [0 \ 0 \ g]^T$ – вектор гравитационного ускорения в топоцентрической СК;

A – матрица ориентации (направляющих косинусов) бортовой СК относительно топоцентрической СК, то, учитывая, что на участке торможения ориентация бортовой СК (трехгранника акселерометров) относительно топоцентрической СК практически неизменна ($A = \text{const}$), вектор скорости локомотива в бортовой СК может быть представлен как

$$W = A(V + Gt),$$

где V – вектор скорости, обусловленной движением локомотива в топоцентрической СК.

Соответственно, модуль скорости в бортовой СК равен

$$|W| = \sqrt{W^T W},$$

$$W^T W = (V^T + G^T t) A^T A (V + Gt) = V^T V + G^T Vt + V^T Gt + G^T Gt^2,$$

где $A^T A = E$;

E – единичная матрица.

В силу того, что на участке торможения модуль скорости совпадает с продольной осью локомотива и ориентация бортовой СК (трехгранника акселерометров) относительно

топоцентрической СК практически неизменна, то вертикальной составляющей скорости V_z локомотива можно пренебречь. В этом случае

$$G^T V = V^T G = V_z g \approx 0,$$

и модуль скорости собственного движения локомотива в топоцентрической СК равен

$$|V| = \sqrt{V^T V} = \sqrt{W^T W - (gt)^2},$$

где вектор скорости в бортовой СК W может быть определен по измерениям трех акселерометров ИИБ следующим образом:

$$W = \left[W_{0x} + \int_0^t a_x ds; \quad W_{0y} + \int_0^t a_y ds \quad W_{0z} + \int_0^t a_z ds \right]^T,$$

где $a_{x,y,z}$ – показания акселерометров;

$W_{0x,y,z}$ – начальные значения проекций скорости локомотива в бортовой СК.

Таким образом, модуль скорости собственного движения локомотива в топоцентрической СК, определяемый в вычислителе по измерениям трех акселерометров ИИМ, может быть представлен как

$$|V| = \sqrt{(W_{0x} + \int_0^t a_x ds)^2 + (W_{0y} + \int_0^t a_y ds)^2 + (W_{0z} + \int_0^t a_z ds)^2 - (gt)^2}.$$

В силу того, что измерения акселерометров осуществляются с неизбежными ошибками, то сигнал измерения, пропорциональный модулю скорости $|V|$, можно записать следующим образом:

$$Z_s = |V| + W_s, \quad (8)$$

где W_s – помеха измерения с неизвестными вероятностными характеристиками.

Далее в бортовом вычислителе решается прежняя задача – по измерениям (7), (8) оценить с минимальной ошибкой текущее значение приращения пути $\hat{\vartheta}$, определяющее положение локомотива на участке торможения.

Так как для оценки текущего значения приращения пути $\hat{\vartheta}$, определяющего положение локомотива на участке торможения, используются измерения (7), (8), зашумленные помехами с неизвестными вероятностными характеристиками, то для устойчивого решения поставленной задачи используем далее методы робастной фильтрации. Для рассматриваемых измерителей вероятностные распределения помех измерений (7), (8) с высокой степенью общности можно полагать принадлежащими к классу распределений с ограниченными вторыми моментами (средними квадратами) и использовать при оценке переменной $\hat{\vartheta}$ робастный фильтр, рассмотренный в [9].

В этом случае также используем переменную $\vartheta = \int_0^t |V| dt$, измеряемую наблюдателем (1) и описываемую уравнением (3):

$$\dot{\vartheta} = Z_s - W_s.$$

Тогда, учитывая структуру робастного фильтра [9] и класс неизвестных вероятностных распределений помех, уравнения оценки могут быть записаны следующим образом (с учетом $\mathcal{Q}_0 = 0$):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\vartheta}} &= Z_s + \frac{1}{2}[Z - \hat{\vartheta}] = -\frac{1}{2}\hat{\vartheta} + Z_s + \frac{1}{2}Z, \\ \hat{\mathcal{Q}}_0 &= 0, \end{aligned}$$

и в силу их линейности позволяют найти решение в аналитическом виде:

$$\hat{g} = \exp(-0.5t) \left[\int_0^t (Z_s + \frac{1}{2} Z) \exp(0.5t) dt - (Z_{s0} + \frac{1}{2} Z_0) \right], \quad (9)$$

где Z_{s0} , Z_0 – значения сигналов измерения Z_s , Z в начальный момент времени, являющиеся аналитическим робастным решением поставленной задачи позиционирования локомотива.

Пример. Для оценки эффективности предложенного подхода рассмотрим его использование как для случая гауссовских помех бортовых измерителей, так и при неопределенности их вероятностных распределений. В обоих случаях изменение во времени t модуля скорости движения локомотива моделировалось на интервале $[0; 100]$ секунд с шагом 0,01 с по закону:

$$|V| = \exp(-t) \cos(0.05t). \quad (10)$$

В случае гауссовских помех шумов измерений W_s , W_o моделировались случайными центрированными последовательностями с нормальным распределением и дисперсиями $D_s = 10^{-4} \text{ (м/с)}^2$ и $D_o = 10^{-2} \text{ м}^2$ соответственно, характерными для используемых в настоящее время типовых (непрецизионных) бортовых измерителей. В соответствии с изложенным подходом для оценки приращения пути здесь использовался фильтр Калмана (6). График ошибки оценки для данного случая приведен на рис. 2.

Анализ характера изменения во времени ошибки оценки показывает хорошую сходимость процесса оценивания (несмотря на «выбросы» в течение первых 7 с) и достижение требуемой точности – 30 см, в момент остановки локомотива у реперного знака. Это позволяет сделать вывод об эффективности рассмотренного алгоритма при использовании в качестве бортовых измерителей одометра и ИМЛС. При использовании же вместо ИМЛС трехосного акселерометра, а также невозможности определения видов распределений помех бортовых измерителей (т. е. в условиях неопределенности) для оценки приращения пути необходимо использовать, как было показано выше, робастный фильтр (9).

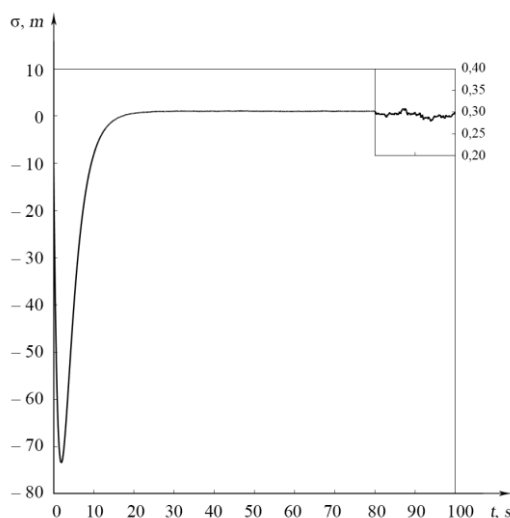


Рис. 2. График изменения ошибки оценки позиционирования локомотива в штатном режиме

С целью проверки его эффективности, а также сравнительного анализа по точности с фильтром Калмана было проведено оценивание координаты приращения пути обоими фильтрами при моделировании шумов бортовых измерителей аддитивными смесями следующих случайных последовательностей:

- для одометра $W_o + W_{p1}$;
- для акселерометров и ИМЛС $W_s + W_{p2}$,

где W_s , W_o – случайные центрированные последовательности с нормальным распределением и дисперсиями $D_s = 10^{-4} \text{ (м/с)}^2$ и $D_o = 10^{-2} \text{ м}^2$ соответственно;

W_{p1} – случайная последовательность с равномерным распределением на интервале $(-0.1; 0.1)$ м;

W_{p2} – случайная последовательность с равномерным распределением на интервале $(-0.01; 0.01)$ м/с.

График ошибки оценки фильтром Калмана для рассмотренного случая приведен на рис. 3.

Ошибка оценки претерпевает здесь значительный начальный «выброс» – до 270 м, причем на достаточно длительном интервале времени – до 45 с. При этом по сравнению со случаем гауссовских

возмущений ухудшается точность позиционирования в момент остановки – до 1 м. В то же время график ошибки оценки робастным фильтром (рис. 4) показывает существенно лучшую сходимость процесса оценивания – при значительно меньшем начальном «выбросе» (как по времени – в течение первых 4 с, так и по амплитуде – до 37 м), причем при достижении большей точности в момент остановки локомотива – 56 см.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности преимущественного применения робастного алгоритма фильтрации при использовании вместо ИМЛС трехосного акселерометра, а также при невозможности априорного определения видов распределений помех бортовых измерителей.

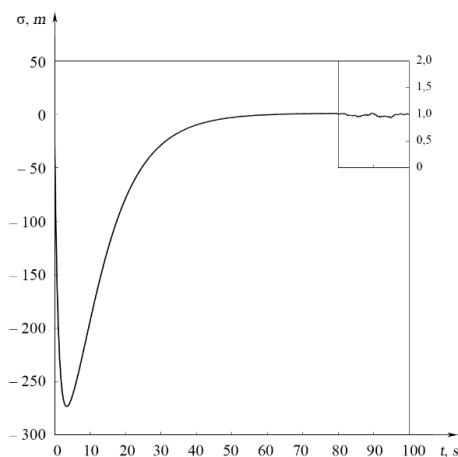


Рис. 3. График изменения ошибки оценки позиционирования локомотива в условиях неопределенности фильтром Калмана

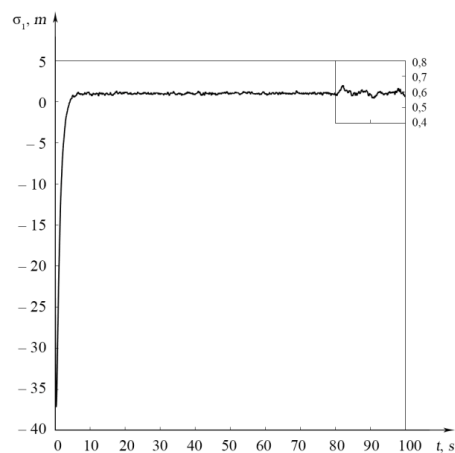


Рис. 4. График изменения ошибки оценки позиционирования локомотива в условиях неопределенности робастным фильтром

Выводы

Преимущественными особенностями предложенного подхода являются, во-первых, устойчивое высокоточное позиционирование локомотива при невалидных измерениях спутниковых навигационных систем и неопределенных вероятностных характеристиках помех измерения автономных сенсоров информационно-вычислительного комплекса локомотива, во-вторых, возможность решения задачи определения текущего положения локомотива в реальном времени, а в-третьих, отсутствие дополнительных аппаратных затрат, т. к. для решения поставленной задачи достаточно штатного информационно-вычислительного комплекса локомотива.

Подобные преимущества предложенного метода позиционирования обеспечивают возможность его использования для эффективного решения задач навигации и управления как в современных, так и перспективных локомотивах.

Список литературы

- 1 Погрешности измерения расстояния до препятствия средствами технического зрения и прогноза пути торможения в беспилотных системах управления движением поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина, А. Л. Охотников // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 6 (97). – С. 6–12. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-6-1.
- 2 Патент № 2668459 С1 Российская Федерация, МПК G05D 1/02, G01C 21/30. Устройство оценки положения и способ оценки положения / И. Ямагути, Х. Уеда. – № 2017146057 ; заявл. 28.05.2015 ; опубл. 01.10.2018, Бюл. № 28. – 43 с.
- 3 О повышении точности GPS-компыаса для мало-размерных объектов / Г. И. Емельянцев, А. П. Степанов, Б. А. Блажнов, И. В. Семенов // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 1 (88). – С. 18–28. – DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.1.018-029.
- 4 Шахин, Э. М. Математический анализ фазовых погрешностей в схеме слежения приемника GPS при помехах разного рода / Э. М. Шахин // Гироскопия и навигация. – 2018. – № 3 (26). – С. 40–53. – DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.3.040-053.
- 5 Митрахович, И. О. Система определения углов ориентации объектов в пространстве на основе метода РТК / И. О. Митрахович // Международный конгресс по информатике : информационные системы и технологии : материалы Международного научного конгресса, Минск, 24–27 октября 2016 г. – Минск : Белорусский государственный университет, 2016. – С. 46–51. – ISBN 978-985-566-369-1.
- 6 Тяпкин, В. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС / В. Н. Тяпкин, Е. Н. Гарин. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2012. – 259 с. – ISBN 978-5-7638-2639-5.
- 7 Патент № 2676518 С1 Российская Федерация, МПК G05B 15/00, G08G 1/00, G08G 9/00. Способ и устройство для управления сетью мобильных роботизированных устройств / Д. В. Яцкин. – № 2018101151 ; заявл. 12.01.2018 ; опубл. 29.12.2018, Бюл. № 1. – 26 с.
- 8 Патент № 2509021 С2 Российская Федерация, МПК В61L 25/02. Устройство и способ для создания сигнала местоположения / А. Пухерт. – № 2011100827/11 ; заявл. 03.06.2009 ; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7. – 19 с.
- 9 Патент № 2755677 С1 Российская Федерация, МПК H03H 19/00, G06F 17/18. Робастный стохастический фильтр / С. В. Соколов, А. А. Манин. –

References

- 1 Errors in Measuring the Distance to an Obstacle by Technical Vision Means and in Forecasting Braking Distance in Driverless Train Control Systems / L. A. Baranov, P. F. Bestemyanov, E. P. Balakina, A. L. Okhotnikov // World of Transport and Transportation. – 2021. – Vol. 19, No. 6 (97). – P. 134–140. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-6-1.
- 2 Patent No. 2668459 C1 Russian Federation, IPC G05D 1/02, G01C 21/30. Position assessment device and position assessment method / I. Yamaguchi, H. Ueda. – No. 2017146057 ; application. 05.28.2015 ; publ. 01.10.2018, Bul. No 28. – 43 p.
- 3 On improving the accuracy of a GPS compass for small-sized objects / G. I. Emeliantsev, A. P. Stepanov, B. A. Blazhnov, I. V. Semenov // Gyroscopy and Navigation. – 2015. – No. 1 (88). – P. 18–28. – DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.1.018-029.
- 4 Shaheen, E. M. Mathematical Analysis for the GPS Carrier Tracking Loop Phase Jitter in Presence of Different Types of Interference Signals / E. M. Shaheen // Gyroscopy and Navigation. – 2018. – No. 3 (26). – P. 40–53. – DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.3.040-053.
- 5 Mitrakhovich, I. O. The system for determining the angles of orientation of objects in space based on the RTK method / I. O. Mitrakhovich // International Congress on Informatics : information systems and Technologies : materials of the International Scientific Congress, Minsk, October 24–27, 2016. – Minsk : Belarusian State University, 2016. – P. 46–51. – ISBN 978-985-566-369-1.
- 6 Tyapkin, V. N. Methods for Determining the Navigation Parameters of Mobile Vehicles Using the GLONASS Satellite Radio Navigation System / V. N. Tyapkin, E. N. Garin. – Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2012. – 259 p. – ISBN 978-5-7638-2639-5.
- 7 Patent No. 2676518 C1 Russian Federation, IPC G05B 15/00, G08G 1/00, G08G 9/00. A method and device for managing a network of mobile robotic devices / D. V. Yatskin. – No. 2018101151 ; application 12.01.2018 ; publ. 29.12.2018, Bul. No. 1. – 26 p.
- 8 Patent No. 2509021 C2 Russian Federation, IPC B61L 25/02. Device and method for creating a location signal / A. Pukhert. – No. 2011100827/11 ; application 03.06.2009 ; publ. 10.03.2014, Bul. No. 7. – 19 p.
- 9 Patent No. 2755677 C1 Russian Federation, IPC H03H 19/00, G06F 17/18. Robust stochastic filter /

№ 2021107334 ; заявл. 19.03.2021 ; опубл. S. V. Sokolov, A. A. Manin. – No. 2021107334 ; application. 03.19.2021 ; publ. 09.20.2021, Bul. No. 26. – 11 p.

S. V. Sokolov, A. L. Okhotnikov, A. V. Kostyukov, D. V. Marshakov

HIGH-PRECISION POSITIONING OF AN AUTONOMOUS LOCOMOTIVE IN CONDITIONS OF UNSTABLE SATELLITE MEASUREMENTS

Abstract. The problem that arises when positioning autonomous transport objects when traveling in urban conditions and increased interference is touched upon. Such objects of railway infrastructure create an unpredictable nature of interference, which affects the sensors of an autonomous locomotive. In this case, when approaching a supporting infrastructure facility, it becomes impossible to use both satellite measurements and various sensors of the technical vision system. In this regard, the article proposes to use autonomous meters of linear motion parameters of a locomotive as navigation sensors, and to process noisy measurements - a Kalman filter and a robust filtering method.

Keywords: satellite measurements, navigation parameters, Kalman filter, robust filter, locomotive navigation system, vision system, digital track model.

For citation: High-precision positioning of an autonomous locomotive in conditions of unstable satellite measurements / S. V. Sokolov, A. L. Okhotnikov, A. V. Kostyukov, D. V. Marshakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 25–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_25.

Сведения об авторах

Соколов Сергей Викторович

Северо-Кавказский филиал ордена
Трудового Красного Знамени
ФГБОУ ВО «Московский технический университет
связи и информатики» (СКФ МТУСИ),
кафедра «Информатика и вычислительная
техника»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: s.v.s.888@yandex.ru

Охотников Андрей Леонидович

АО «Научно-исследовательский и
проектно-конструкторский институт
информатизации, автоматизации и связи на
железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»),
заместитель начальника департамента, начальник
отдела стратегического развития,
e-mail: a.ohotnikov@vniias.ru

Костюков Александр Владимирович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы
электротехники»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kav@rgups.ru

Маршаков Даниил Витальевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Автоматика и телемеханика на ЖДТ»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: daniil_marshakov@mail.ru

Information about the authors

Sokolov Sergey Viktorovich

North Caucasus Branch of the Order of the Red
Banner of Labor of the Moscow Technical
University of Communications and Informatics
(NCF MTUCI),
Chair «Computer Science and Computer
Engineering»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: s.v.s.888@yandex.ru

Okhotnikov Andrey Leonidovich

Research and Design Institute for Information
Technology, Signalling and Telecommunications
on Railway Transport (JSC “NIAS”),
Deputy Head of the Department,
Head of the Strategic Development Division,
e-mail: a.ohotnikov@vniias.ru

Kostyukov Alexander Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Foundations of Electrical
Engineering»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kav@rgups.ru

Marshakov Daniil Vitalievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Control and Telemechanics on RWT»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: daniil_marshakov@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 621.822.17 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_34

*Г. А. Бадахов, Е. А. Болгова, М. А. Мукутадзе, Е. Г. Чуб, В. Е. Шведова***РАЗРАБОТКА НОВОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА С НЕСТАНДАРТНЫМ ОПОРНЫМ ПРОФИЛЕМ**

Аннотация. Статья посвящена изучению нового математического метода моделирования течения истинно вязкого смазочного материала в рабочем зазоре модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения.

Для оценки износостойкости указанной конструкции в разработанном новом математическом методе учитываются полимерное покрытие с осевой канавкой, нестандартный опорный профиль и сжимаемость смазочного материала.

Полученные новые математические модели позволяют оценить продолжительность гидродинамического режима смазывания, произвести расчетную оценку влияния полимерного покрытия с осевой канавкой с учетом сжимаемости смазочного материала и нестандартного опорного профиля на основные рабочие характеристики подшипников скольжения: гидродинамическое давление, нагрузочную способность и силу трения.

Ключевые слова: математический метод, моделирование, сжимаемость, модифицированная конструкция, покрытие, оценка влияния.

Для цитирования: Разработка нового математического метода моделирования движения смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника с нестандартным опорным профилем / Г. А. Бадахов, Е. А. Болгова, М. А. Мукутадзе [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 34–41. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_34.

Введение

Полимерные композиционные материалы в виде антифрикционных покрытий в настоящее время широко применяются в тяжелонагруженных низкоскоростных трибосистемах самых разных машин, обеспечивая значительные ресурсы узлов трения. Использование жидких смазочных материалов позволяет расширить скоростной диапазон их применимости, поскольку обеспечит переход от граничного трения самосмазыванием к жидкостному трению в условиях гидродинамики. Тогда во время пусков и выбегов будут работать покрытия, а в стационарный период – смазка.

Сжимаемость смазочного материала зачастую является причиной уменьшения его подачи, ухудшения действия двигателя и возникновения неустойчивого режима движения. В связи с этим возникает необходимость при теоретических и экспериментальных исследованиях [1–3] учета сжимаемости как важной и актуальной проблемы.

Качество трибоузлов закладывается на этапе их разработки и проектирования. Параметры, влияющие на качество узлов трения, меняются исходя из условий работы трибоузлов и свойств материалов, используемых в качестве смазочного связующего [4–7].

Анализ работ [8–15], посвященных одному из самых распространенных видов трибосопряжения подшипников скольжения, подчеркивает важность разработки новых моделей и повышения точности уже имеющихся радиального подшипника скольжения с полимерным антифрикционным покрытием и осевой канавкой на опорной поверхности втулки с некруглым опорным профилем, адаптированным к условиям трения (модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения) в условиях применения вязкого смазочного материала [17] при учете сжимаемости смазочного материала.

Методика проведения исследований

Рассматривается установившееся движение в рабочем зазоре смазочного материала модифицированной конструкции радиального подшипника. Скорость вращения вала принята равной Ω , а нестандартной втулки – нулю.

Для достижения цели используем общеизвестные безразмерные уравнения движения сжимаемой жидкости в приближении «для тонкого слоя» и уравнение неразрывности [17], а также уравнение состояния с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{1}{\Lambda} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial r} + \frac{\partial(v_i \rho)}{\partial \theta} = 0, \quad p = \rho, \quad (1)$$

$$v = 1, \quad u = -\eta \sin \theta \quad \text{при } r = 1 - \eta \cos \theta = h(\theta);$$

$$v = v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta) \quad \text{при } r = \eta_2; \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$v = 0, \quad u = 0 \quad \text{при } r = 0; \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{p^*}, \quad p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2), \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1), \quad Q = \text{const}, \quad (2)$$

$$\text{где } \eta = \frac{e}{\delta}; \quad \eta_1 = \frac{a'}{\delta}; \quad \eta_2 = \frac{\tilde{h}}{\delta}; \quad p = \frac{\Lambda \Omega^2 r_0^2}{2} \rho; \quad \Lambda = \frac{r_0^2 \mu \Omega}{p_g \delta^2}; \quad v^*(\theta) = \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}; \quad u^*(\theta) = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2}.$$

В полярной системе координат (рис. 1) уравнение контура вала, подшипниковой втулки без покрытия с некруговым профилем и подшипниковой втулки с полимерным покрытием преобразуем к виду

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1 - a' \sin \omega \theta, \quad r' = r_1 - \tilde{h}(\theta) - a' \sin \omega \theta. \quad (3)$$

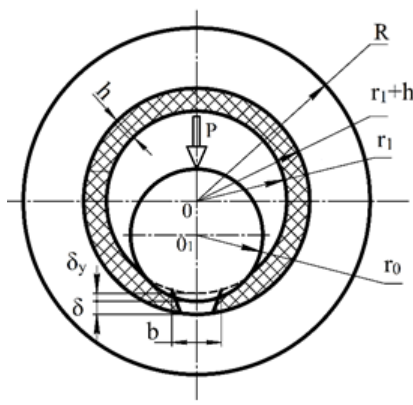


Рис. 1. Расчетная схема трибоконтакта

Переход к безразмерным величинам осуществим следующими соотношениями:

$$r' = r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i, \quad v_r = \Omega \delta u_i, \quad (4)$$

$$p' = p^* p, \quad p^* = \frac{\mu \Omega r_0^2}{\delta^2}, \quad \mu' = \mu, \quad \alpha' = \frac{\alpha}{p^*}.$$

Применим известный метод – метод точного решения [18]:

$$\rho v_i = \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta), \quad \rho u_i = -\frac{\partial \Psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta),$$

$$\Psi_i(r, \theta) = \tilde{\Psi}(\xi_i), \quad U_i(r, \theta) = -p \tilde{u}_i(\xi_i) h'(\theta),$$

$$V_i(r, \theta) = p \tilde{v}_i(\xi_i),$$

$$\xi_2 = \frac{r}{h(\theta)} \quad \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2,$$

$$\xi_{1,3} = \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi, \quad (5)$$

где $h(\theta) = 1 - \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta$.

В результате уравнение (2) примет вид:

$$\begin{aligned}\tilde{\Psi}_i'''(\xi_i) &= a_i, \quad \tilde{v}_i''(\xi_i) = b_i, \\ u_i'(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)} \cdot \frac{1}{p} \frac{dp}{d\theta} - \xi_i v_i'(\xi_i) &= 0, \\ \frac{p}{\Lambda} \frac{dp_i}{d\theta} &= \frac{b_i p}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3}, \quad i = 1, 3, \\ \frac{p}{\Lambda} \frac{dp_2}{d\theta} &= \frac{b_2 p}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)}.\end{aligned}\quad (6)$$

Систему уравнений (6) решаем при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned}\tilde{\Psi}_i'(0) &= 0, \quad \tilde{u}_i'(1) = -\eta \sin \theta, \\ \tilde{v}_i'(1) &= 0, \quad \tilde{u}_i'(0) = 0, \quad \tilde{v}_i'(0) = 1, \\ \int_0^1 \tilde{v}_i(\xi_i) d\xi_i &= 0, \\ p(\theta) &= p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = 1.\end{aligned}\quad (7)$$

Интегрируя (6)–(7), имеем:

$$\begin{aligned}\tilde{\Psi}_i'(\xi_i) &= a_i \frac{\xi_i}{2} (\xi_i - 1), \quad \tilde{v}_i'(\xi_i) = b_i \frac{\xi_i^2}{2} - \left(1 + \frac{b_i}{2}\right) \xi_i + 1, \quad b_i = 6. \\ p_i &= \Lambda \left[\frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{p} \cdot \frac{1}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] + 1, \quad i = 1, 3, \\ p_2 &= \Lambda \left[\frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{p} \cdot \frac{1}{h^3(\theta)} \right] + 1.\end{aligned}\quad (8)$$

Решая уравнения (8) для гидродинамического давления методом последовательных приближений, в результате для первых приближений получим:

$$\begin{aligned}p_{11} &= 1, \quad p_{21} = 1, \quad p_{31} = 1. \\ p_{12} &= 6 \left(-\tilde{\eta} \sin \theta + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) + \frac{1}{p} \frac{\tilde{\eta}_1 \theta}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - 1) \right); \\ p_{22} &= 6 \left[(\theta - \theta_1) \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi}\right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - \cos \omega \theta_1) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \frac{1}{p} \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2}\right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - \cos \omega \theta_1) - \eta (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \right]; \\ p_{32} &= 6\Lambda \left[\left((\theta - \theta_2) \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} - \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi}\right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - \cos \omega \theta_2) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) \right) + \right.\end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{p} \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_2) - \tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right) \Bigg]. \quad (9)$$

Проверочные расчеты полученной теоретической модели проведены с использованием параметров в следующих диапазонах их численных значений $\Lambda = 0,1-0,9$; $r = 20$ мм; $V = 0,3$ м/с; $\sigma = 10-50$ МПа; $\mu_0 = 0,024987-0,0067$ Н·с/м². Результаты численного анализа полученных расчетных моделей приведены в виде графика (рис. 2).

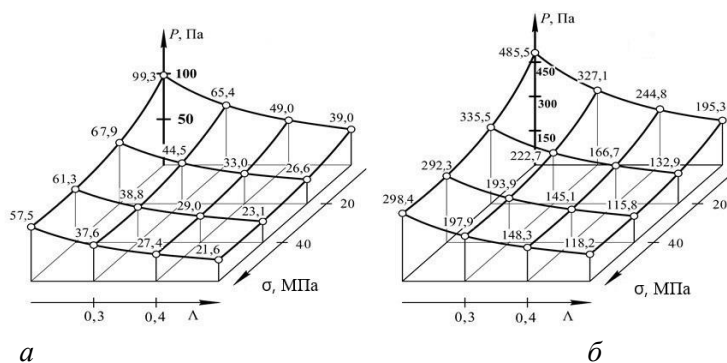


Рис. 2. Влияние сжимаемости и нагрузки $\sigma = 10-50$ МПа на вертикальные составляющие:
а – при $V = 0,3$ м/с; б – при $V = 1$ м/с

Результаты исследования

В результате теоретического исследования уточнена несущая способность радиального подшипника скольжения с адаптированным к условиям трения профилем опорной поверхности при учете сжимаемости на 6–8 %, а коэффициент трения – на 5–7 % в диапазоне исследований режимов (см. таблицу).

Результаты теоретического исследования

№ п/п	σ , МПа	Λ , параметр сжимаемости				
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
		Коэффициент трения				
1	10	0,008190	0,0096130	0,008500	0,0053000	0,00163000
2	20	0,004890	0,0040910	0,005053	0,0033850	0,00099350
3	30	0,090893	0,0020907	0,001606	0,0019705	0,00035700
4	40	0,090595	0,0013906	0,001504	0,0014136	0,00033793
5	50	0,090497	0,0007905	0,001321	0,0004570	0,00031887

Выводы

1 В результате исследований получена новая математическая модель для инженерных расчетов, позволяющих определить величину основных триботехнических параметров (сила трения, нагрузочная способность, гидродинамическое давление).

2 Расчетные модели учитывают применение дополнительного смазывания полимерным покрытием и канавку на поверхности подшипниковой втулки, сжимаемость смазочного материала, а также нестандартный опорный профиль.

3 Применение исследованных радикальных подшипников скольжения значительно увеличивает несущую способность (на 6–8 %), а коэффициент трения снижается на 5–7 %.

Условные обозначения

v_{θ_1}, v_{r_1} – компоненты вектора скорости смазочной среды; r_0 – радиус вала; r_1 – радиус подшипниковой втулки; \tilde{h} – высота канавки; e – эксцентриситет; ε – относительный эксцентриситет; $\eta = \frac{e}{\delta}$ – конструктивный параметр подшипника со стандартным опорным профилем; $\eta_1 = \frac{a'}{\delta}$ – конструктивный параметр подшипника с адаптированным профилем; $\eta_2 = \frac{\tilde{h}}{\delta}$ – конструктивный

параметр, характеризующий канавку; p_g – давление на торцах интервала; θ_1 и θ_2 – соответственно угловые координаты канавки; $u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ – известные функции, обусловленные наличием полимерного покрытия на поверхности подшипниковой втулки; μ' – коэффициент динамической вязкости; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое; ω – параметр, характеризующий адаптированный профиль; $\tilde{h}(\theta)$ – толщина полимерного покрытия; $h(\theta)$ – толщина смазочного слоя; Λ – параметр сжимаемости.

Список литературы

- 1 **Кохановский, В. А.** Фторопластсодержащие композиционные покрытия в смазочных средах / В. А. Кохановский, Э. А. Камерова // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 1. – С. 34–37. – ISSN 1819-2092.
- 2 **Кохановский, В. А.** Трение полимерных покрытий в жидких смазочных средах / В. А. Кохановский, Э. А. Камерова // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 4. – С. 17–20. – ISSN 1819-2092.
- 3 Методика исследования влияния жидких сред на фторопластсодержащие антифрикционные покрытия / Э. А. Камерова, И. Б. Власенко, Н. Г. Снежина, П. А. Оганесян // Уральский научный вестник. – 2014. – № 21 (100). – С. 137–142. – ISSN 1561-6908.
- 4 Применение антифрикционных полимерных композиционных полимерных покрытий в торозной рычажной передаче локомотивов / П. Г. Иваночкин, И. В. Больших, Т. З. Талахадзе, Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (85). – С. 16–22. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_16.
- 5 Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining / P. G. Ivanochkin, D. S. Manturov, K. I. Karpenko [et al.] // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 713–719.
- 6 Study of physical, mechanical and tribological properties of nanocomposites based on oil-filled polymers / P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko, E. S. Novikov, D. S. Manturov // Springer Proceedings in Physics. Advanced Materials – Proceedings of the International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications”, PHENMA 2017. – 2018. – P. 469–478. – DOI 10.1007/978-3-319-78919-4_36.
- 7 Комплексное исследование полимерных композитов с матрицей на основе фенилона C-2 / П. Г. Иваночкин, Т. В. Суворова, С. А. Данильченко [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4 (72). – С. 18–25. – ISSN 0201-727X.
- 8 **Павлычева, Е. А.** Разработка полимерной композиции для получения защитного покры-

References

- 1 **Kohanovsky, V. A.** Fluoroplast-containing composite coatings in lubricating media / V. A. Kohanovsky, E. A. Kamerova // Friction and lubrication in machines and mechanisms. – 2014. – No. 1. – P. 34–37. – ISSN 1819-2092.
- 2 **Kohanovsky, V. A.** Friction of polymer coatings in liquid lubricants / V. A. Kohanovsky, E. A. Kamerova // Friction and lubrication in machines and mechanisms. – 2014. – No. 4. – P. 17–20. – ISSN 1819-2092.
- 3 Methodology for studying the effect of liquid media on fluoroplast-containing antifricition coatings / E. A. Komarova, I. B. Vlasenko, N. G. Snezhina, P. A. Oganesyanyan // Ural Scientific Bulletin. – 2014. – No. 21 (100). – P. 137–142. – ISSN 1561-6908.
- 4 Application of antifricition polymer composite polymer coatings in the brake lever transmission of locomotives / P. G. Ivanochkin, I. V. Bolshykh, T. Z. Talakhadze, E. P. Bolshykh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1 (85). – P. 16–22. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_16.
- 5 Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining / P. G. Ivanochkin, D. S. Manturov, K. I. Karpenko [et al.] // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 713–719.
- 6 Study of physical, mechanical and tribological properties of nanocomposites based on oil-filled polymers / P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko, E. S. Novikov, D. S. Manturov // Springer Proceedings in Physics. Advanced Materials – Proceedings of the International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications”, PHENMA 2017. – 2018. – P. 469–478. – DOI 10.1007/978-3-319-78919-4_36.
- 7 A comprehensive study of polymer composites with a matrix based on phenylene C-2 / P. G. Ivanochkin, T. V. Suvorova, S. A. Danilchenko [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2018. – No. 4 (72). – P. 18–25. – ISSN 0201-727X.
- 8 **Pavlycheva, E. A.** Development of a polymer composition for obtaining a protective coating on metal surfaces / E. A. Pavlycheva // International

тия на металлических поверхностях / Е. А. Павлычева // Международный журнал прикладной и фундаментальных исследований. – 2022. – № 2. – С. 33–36. – DOI 10.17513/mjpf.13355.

9 Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения / С. С. Негматов, Н. С. Абед, Р. Х. Саидахмедов [и др.] // Пластические массы. – 2020. – № 7–8. – С. 32–36. – DOI 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36.

10 Analysis of factors affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V. E. Zinoviev, P. V. Kharlamov, N. V. Zinoviev, R. A. Kornienko // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 900 (1), No. 012009. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012009.

11 Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами / С. В. Кондрашов, К. А. Шашкеев, Г. Н. Петрова, И. В. Мекалина // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 405–419. – DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.

12 **Кузнецов, А. А.** Конструкционные термопласты как основа для самосмазывающихся полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения / А. А. Кузнецов, Г. К. Семенова, Е. А. Свидченко // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 1 (57). – С. 116–126. – ISSN 1994-6716.

13 Experimental and theoretical investigation on the hydrochromic property of Ni(II)-containing coordination polymer with an inclined 2D→3D polycatenation architecture / S.-Z. Wen, S.-D. Zhong, W.-Q. Kan [et al.] // Journal of Molecular Structure. – 2022. – Vol. 1269, No. 133753. – DOI 10.1016/j.molstruc.2022.133753.

14 Interconnected MXene/Graphene network constructed by soft template for multi-performance improvement of polymer composites / L. Jin, W. Cao, P. Wang [et al.] // Nano-Micro Letters. – 2022. – Vol. 14 (1), No. 133. – DOI 10.1007/s40820-022-00877-7.

15 **Robertson, B. P.** Evaporation-controlled dripping-onto-substrate (DoS) extensional rheology of viscoelastic polymer solutions / B. P. Robertson, M. A. Calabrese // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12 (1). – No. 4697. – ISSN 2045-2322 (online).

16 Modeling the mechanical characteristics of tribotechnical composites / T. V. Suvorova, O. A. Belyak, P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko // IOP Conference Series : Materials Science and

Journal of Applied and Fundamental Research. – 2022. – No. 2. – P. 33–36. – DOI 10.17513/mjpf.13355.

9 Research of viscoelastic and adhesive-strength properties and development of effective vibration-absorbing composite polymer materials and coatings for machine-building purposes] / S. S. Negmatov, N. S. Abed, R. H. Saidakhmedov [et al.] // Plastic masses. – 2020. – No. 7–8. – P. 32–36. – DOI 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36.

10 Analysis of factors affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V. E. Zinoviev, P. V. Kharlamov, N. V. Zinoviev, R. A. Kornienko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 900 (1), No. 012009. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012009.

11 Polymer composite materials of structural purpose with functional properties / S. V. Kondrashov, K. A. Shashkeev, G. N. Petrova, I. V. Mekalina // Aviation materials and technologies. – 2017. – No. 5. – P. 405–419. – DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.

12 **Kuznetsov, A. A.** Structural thermoplastics as a basis for self-lubricating polymer composite materials of antifriction purpose / A. A. Kuznetsov, G. K. Semenova, E. A. Svidchenko // Voprosy materialovedeniya. – 2009. – No. 1 (57). – P. 116–126. – ISSN 1994-6716.

13 Experimental and theoretical investigation on the hydrochromic property of Ni(II)-containing coordination polymer with an inclined 2D→3D polycatenation architecture / S.-Z. Wen, S.-D. Zhong, W.-Q. Kan [et al.] // Journal of Molecular Structure. – 2022. – Vol. 1269, No. 133753. – DOI 10.1016/j.molstruc.2022.133753.

14 Interconnected MXene/Graphene network constructed by soft template for multi-performance improvement of polymer composites / L. Jin, W. Cao, P. Wang [et al.] // Nano-Micro Letters. – 2022. – Vol. 14 (1), No. 133. – DOI 10.1007/s40820-022-00877-7.

15 **Robertson, B. P.** Evaporation-controlled dripping-onto-substrate (DoS) extensional rheology of viscoelastic polymer solutions / B. P. Robertson, M. A. Calabrese // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12 (1). – No. 4697. – ISSN 2045-2322 (online).

16 Modeling the mechanical characteristics of tribotechnical composites / T. V. Suvorova, O. A. Belyak, P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko // IOP Conference Series : Materials Science and

Engineering. XV International Scientific-Technical Conference. – 2019. – P. 012018.

17 Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием / В. И. Киришчиева, И. А. Колобов, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (87). – С. 18–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_18.

18 Расчетная модель радиального подшипника с нестандартным опорным профилем / В. Н. Багрова, В. В. Василенко, В. И. Киришчиева, М. А. Мукутадзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2 (82). – С. 17–24. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_17.

Engineering. XV International Scientific-Technical Conference. – 2019. – P. 012018.

17 Improving the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and a polymer coating / V. I. Kirishchieva, I. A. Kolobov, M. A. Mukutadze, V. E. Shvedova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 3 (87). – P. 18–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_18.

18 Calculation model of a radial bearing with a non-standard support profile / V. N. Bagrova, V. V. Vasilenko, V. I. Kirishchieva, M. A. Mukutadze // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 2 (82). – P. 17–24. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_17.

G. A. Badakhov, E. A. Bolgova, M. A. Mukutadze, E. G. Chub, V. E. Shvedova

DEVELOPMENT OF A NEW MATHEMATICAL METHOD FOR SIMULATING THE MOVEMENT OF LUBRICANT IN THE WORKING CLEARANCE OF A RADIAL BEARING WITH A NON-STANDARD SUPPORT PROFILE

Abstract. The paper is devoted to the study of a new mathematical method for simulating the movement of a truly viscous lubricant in the working clearance of a modified design of a radial sliding bearing.

To assess the wear resistance of the specified structure, the developed new mathematical method takes into account a polymer coating with an axial groove, a non-standard support profile and the compressibility of the lubricant.

The new mathematical models obtained allow us to estimate the duration of the hydrodynamic lubrication regime, to make a calculated assessment of the effect of a polymer coating with an axial groove, taking into account the compressibility of the lubricant and a non-standard support profile on the main performance characteristics of sliding bearings: hydrodynamic pressure, load capacity and friction force.

Keywords: mathematical method, modeling, compressibility, modified construction, coating, impact assessment.

For citation: Development of a new mathematical method for simulating the movement of lubricant in the working clearance of a radial bearing with a non-standard support profile / G. A. Badakhov, E. A. Bolgova, M. A. Mukutadze [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 34–41. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_34.

Сведения об авторах

Бадахов Григорий Андреевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Высшая математика»,
аспирант,
e-mail: 77grigo77@mail.ru

Болгова Екатерина Александровна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Высшая математика»,
аспирант,
e-mail: bolgova_katya6@mail.ru

Information about the authors

Badakhov Grigory Andreevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Higher Mathematics»,
Postgraduate Student,
e-mail: 77grigo77@mail.ru

Bolgova Ekaterina Alexandrovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Department of Higher Mathematics,
Postgraduate,
e-mail: bolgova_katya6@mail.ru

Мукутадзе Мурман Александрович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Высшая математика»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: murman1963@yandex.ru

Чуб Елена Григорьевна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Высшая математика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: elenachub111@gmail.com

Шведова Валентина Евгеньевна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Высшая математика»,
аспирант,
e-mail: shvedovavalya@yandex.ru

Mukutadze Murman Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Higher Mathematics»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Department,
e-mail: murman1963@yandex.ru

Chub Elena Grigorievna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Higher Mathematics»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: elenachub111@gmail.com

Shvedova Valentina Evgenievna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Higher Mathematics»,
Postgraduate Student,
e-mail: shvedovavalya@yandex.ru

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.332.3

DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_42

*К. В. Богданова, Е. В. Добрынин***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ПОДОГРЕВА ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования регулируемых источников питания для обеспечения профилактического противогололедного подогрева проводов контактной сети. Обозначены проблемы работы системы профилактического подогрева проводов контактной сети участка, возникающие при движении по нему поездов, связанные с остыванием подвески из-за изменения токов в тяговой сети. Представлен алгоритм управления источниками профилактического подогрева, обеспечивающий поддержание температуры проводов для исключения их обледенения без введения дополнительных ограничений в движение поездов. В алгоритме учтены границы температуры, в пределах которых поддерживается, нагрев проводов, а также переходные процессы, возникающие при переключениях, и ресурс оборудования.

Ключевые слова: электротяговые сети, контактная сеть, профилактический подогрев, система тягового электроснабжения, регулируемые источники питания.

Для цитирования: Богданова, К. В. Математическая модель автоматизированной системы профилактического подогрева проводов контактной сети / К. В. Богданова, Е. В. Добрынин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 42–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_42.

Образование гололедно-изморозевых отложений на проводах контактной сети приводит к нарушению токосъема и влечет за собой остановку движения поездов по участку, где произошло обледенение. Согласно «Инструкции по подготовке к работе и обеспечению надежности работы устройств электроснабжения в зимний период» [1] удаление льда с проводов производится, если его толщина начинает достигать 3 мм. В начальный период образования на контактном проводе слоя льда токосъем еще возможен, но он уже сопровождается искрением, что повышает износ контактного провода и полоза токоприемника. В момент трогания электровоза ток может составлять до 3 кА, и если этот момент будет сопровождаться образованием дуги, то возможен пережог контактного провода.

Чтобы снизить риск механической поломки токоприемника при движении во время начальной стадии обледенения проводов, вводится ограничение на скорость движения по участку. При этом движение поездов должно производиться с минимальным интервалом, чтобы не успел восстановиться слой льда, снятый токоприемником предыдущего локомотива. Когда слой льда достигает значения, при котором токосъем становится невозможным, движение по участку полностью останавливается до тех пор, пока не будет очищена ото льда контактная подвеска.

Существующие способы удаления льда с контактных проводов сопряжены с временным прекращением движения поездов по участку, поэтому более эффективным считается применение средств и способов, которые не допустят обледенения контактной подвески. К таким превентивным мерам относятся профилактический подогрев проводов и нанесение на них покрытий, снижающих адгезию льда. Последний способ, ввиду особенностей эксплуатации контактных проводов, имеет недостаток – нужно периодически обновлять защитный слой. Причем периодичность обработки поверхности зависит не от погодных условий, а от количества проходов токоприемников. Профилактический подогрев, в свою очередь, применяется только в те моменты времени, когда возникают условия вероятного образования гололедно-изморозевых отложений.

Профилактический подогрев проводов контактной сети имеет ряд преимуществ: во время его включения движение на участке не останавливается, кроме того, управление процессами включения, выключения и регулировки тока нагрева можно автоматизировать [2]. В свою очередь применение системы профилактического подогрева на железных дорогах не лишено недостатков: на большинстве тяговых подстанций постоянного тока в качестве источника нагрева используется второй преобразовательный агрегат, включаемый на пониженное напряжение последовательно с основным. Такая схема ограничивает возможность регулировки тока, который может иметь недостаточное значение для исключения обледенения проводов в условиях окружающей среды, либо, напротив, приводить к избыточному нагреву и перерасходу электроэнергии.

Рассмотрим систему профилактического подогрева проводов контактной сети участка, электрифицированного на постоянном токе. В настоящее время имеются разработки и примеры практической реализации источников питания для профилактического подогрева, которые регулируют ток и напряжение выхода (напряжение выхода 0–1600 В, номинальный ток 2000 А, максимальный – до 4000 А) [3]. Применение такого источника позволяет отрегулировать ток выхода на уровень, необходимый для поддержания температуры контактного провода (5–10 °С достаточно, чтобы исключить его обледенение) с учетом длины участка, сопротивления контактной сети и параметров окружающей среды [2, 4].

Однако, как показали исследования, изменения настройки уровня напряжения источника питания для получения тока профилактического подогрева под параметры межподстанционной зоны (МПЗ) и окружающей среды достаточно только в случае отсутствия движения поездов по участку [5]. На схеме рис. 1, а представлен случай для наиболее распространенной петлевой схемы профилактического подогрева (тяговая подстанция – пост секционирования (ТП – ПС)) и распределения тока при заходе на него электроподвижного состава (ЭПС). Ток от источника профилактического подогрева Вп, подключенного между запасной (ЗШ) и основной (+) шинами, в отсутствие ЭПС циркулирует по контуру, образуемому контактными подвесками двух путей и постом секционирования. Присутствие ЭПС на участке вызывает протекание токов его питания от основного преобразователя тяговой подстанции по контактным подвескам первого ($I_{\text{ЭПС I}}$) и второго ($I_{\text{ЭПС II}}$) путей. Наложение токов приводит к тому, что со стороны ТП величина тока уменьшается, а со стороны I пути через ПС – ток увеличивается. Как следствие – пока поезд проходит по участку, провода контактной подвески со стороны ТП успевают остыть, что создает условия для образования на них наледи.

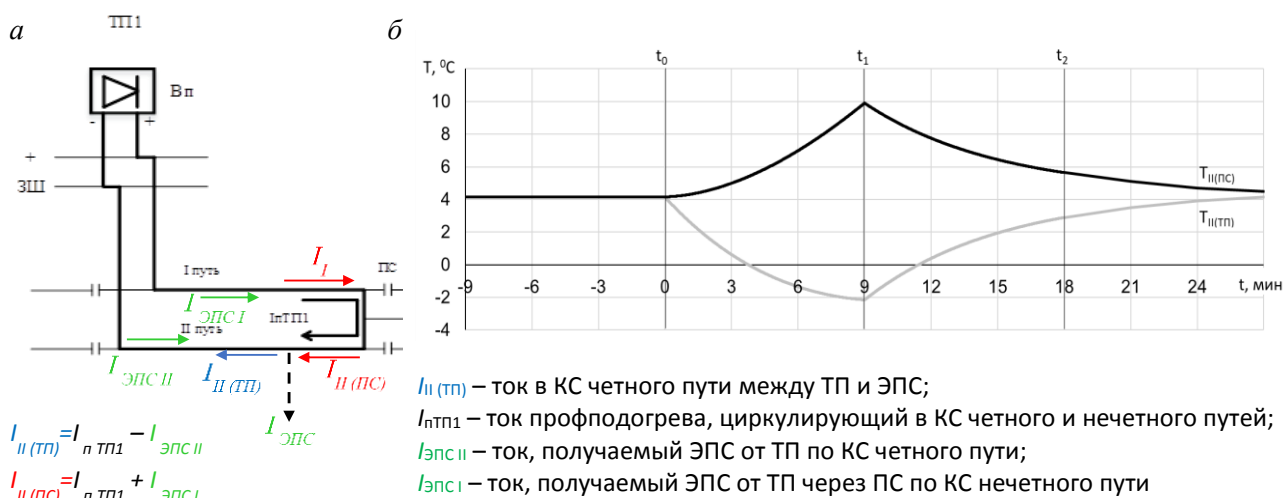


Рис. 1. Петлевая схема профилактического подогрева проводов контактной сети (а) и графики изменения температуры контактного провода четного пути при прохождении по нему поезда (б) со стороны ТП ($T_{II(ТП)}$) и со стороны ПС ($T_{II(ПС)}$):

t_0 – момент захода поезда на МПЗ; t_1 – момент прохода ПС; t_2 – момент выхода с МПЗ

Чтобы обеспечить величину тока I_{II} в контактной сети достаточной для поддержания температуры контактного провода выше 0 °С, необходимо изменить ток, циркулирующий в контуре участка. Для этого требуется разработать систему и алгоритм управления напряжением источника профилактического подогрева [6, 7].

Рассмотрим участок с петлевой схемой профилактического подогрева ТП-ПС, где по четному и нечетному путям проходят по одному ЭПС. На рис. 2 представлены схемы протекания токов в тяговой сети: слева от ТП по питающим линиям к ЭПС и ПС.

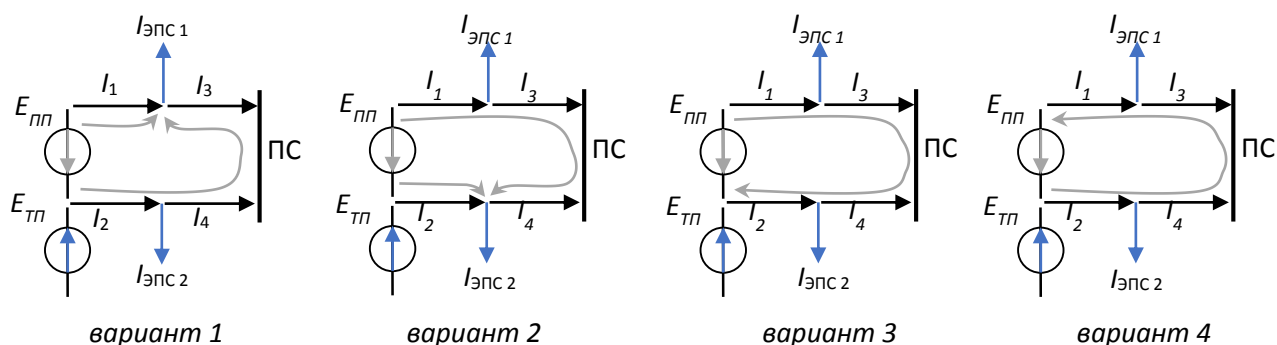


Рис. 2. Варианты протекания тока в тяговой сети

Для обеспечения профилактического нагрева контактных проводов, предотвращающего образование на них гололедно-изморозевых отложений, токи I_1 – I_4 , должны иметь значения по модулю не ниже $I_{ПП}$. Методика обеспечения нагрева, т. е. выполнение указанного условия заключается в выборе одного из четырех вариантов и расчете напряжения источника питания $E_{ПП}$ системы профилактического подогрева, обеспечивающего выполнение этого варианта:

$$E_{ПП} = -I_1 \cdot R_1 - I_3 \cdot R_3 + I_4 \cdot R_4 + I_2 \cdot R_2,$$

где R_1 – R_4 – сопротивления участков тяговой сети, где протекают соответствующие токи I_1 – I_4 .

Уравнения, описывающие протекания токов на рассматриваемом участке, представлены в таблице. Выбор варианта производится по ряду условий:

- 1 – ни один из токов не должен превышать значение, допустимое для контактной подвески;
- 2 – напряжение на токоприемниках ЭПС не должно опускаться ниже 2700 В:

$$U_{ЭПС 1} = E_{ТП} - E_{ПП} - I_1 \cdot R_1 \geq 2700,$$

$$U_{ЭПС 2} = E_{ТП} - I_2 \cdot R_2 \geq 2700;$$

3 – напряжение в тяговой сети не должно превышать 4000 В. Такое превышение может наблюдаться в вариантах 2 и 3, где для реализации указанных направлений протекания тока нужно будет поменять полярность источника профилактического подогрева;

4 – потери в тяговой сети должны быть минимальны $\sum_{k=1}^4 I_k^2 \cdot R_k \rightarrow \min$. Условие применяется, если при соблюдении предыдущих требований подходит больше одного варианта.

Уравнения протекания токов в тяговой сети

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
$I_3 = -I_{ПП}$	$I_4 = -I_{ПП}$	$I_2 = -I_{ПП}$	$I_1 = -I_{ПП}$
$I_4 = -I_3$	$I_3 = -I_4$	$I_4 = I_2 - I_{ЭПС 2}$	$I_3 = I_1 - I_{ЭПС 1}$
$I_2 = I_4 + I_{ЭПС 2}$	$I_1 = I_3 + I_{ЭПС 1}$	$I_3 = -I_4$	$I_4 = -I_3$
$I_1 = I_{ЭПС 1} + I_3$	$I_2 = I_{ЭПС 2} + I_4$	$I_1 = I_{ЭПС 1} + I_3$	$I_2 = I_{ЭПС 2} + I_4$

Варианты 1 и 2 возможны в том случае, если ток ЭПС (1 или 2 соответственно) больше двойного тока профилактического подогрева. В остальных случаях обеспечение нужного уровня тока в контактной сети возможно за счет вариантов 3 или 4. Но при этом высока вероятность того, что не будут выполнены условия по максимальному току и уровням напряжения.

Для расширения диапазона работы схемы профилактического подогрева предлагается устанавливать два дополнительных источника питания, подключенных в питающие линии. Тогда относительно потенциала основного преобразовательного агрегата $E_{ТП}$ возможно регулировать напряжение от максимума 4000 В на одном фидере до минимума $2700 + I_2 \cdot R_2$ (для варианта 3 это значение может быть ниже 2700 В). Расширение диапазона работы источника дает возможность не вводить дополнительных ограничений на массу поездов, пропускаемых по участку во время профилактического подогрева, как это происходит при традиционных схемах, поскольку источник работает еще и как вольтодобавочное устройство.

В том случае, если ни при одном из вариантов не могут быть выполнены обозначенные условия, в алгоритме управления применяются последовательные уступки:

1 – по одному из целевого нагрева исключаются участки контактной сети, нагрев которых превышает верхнюю границу диапазона температур, в котором обеспечивается профилактический подогрев;

2 – по одному из целевого нагрева исключаются участки контактной сети, нагрев которых имеет наибольшую температуру.

Учитывая теплоемкость контактного провода, можно утверждать, что его охлаждение происходит относительно медленно. В условиях, когда на проводах возможно образование гололеда, остывание провода, например, с 5°C до нуля будет происходить в течение 2–7 минут. То есть профилактический подогрев участков контактной сети можно производить поочередно. При этом время между переключениями вариантов будет составлять от десятков секунд до минут, что позволит сохранять ресурс оборудования.

В случае поочередного прогрева участков проводов изменяются требования к величинам тока профилактического подогрева. А именно: ток профилактического подогрева должен обеспечивать уже не поддержание температуры, а нагрев с температуры включения до верхней границы контролируемого диапазона. Ток в этом случае рассчитывается по условию, чтобы скорость нагрева была не ниже скорости охлаждения. Это условие выполняется, если мощность нагрева будет более чем в 2 раза выше мощности охлаждения.

Переключение между вариантами сопровождается не только изменением уровня напряжения источников профилактического подогрева, но и сменой их полярности. Чтобы избежать скачков напряжения на токоприемниках электровозов, регулировку следует выполнять плавно и синхронно на двух источниках одновременно. То есть скорость изменения напряжения на источниках не должна приводить к резкому изменению напряжения на токоприемнике ЭПС, что сказалось бы на его ускорении, а значит, и на резком изменении тока нагрузки или привело бы к круговому огню на коллекторах двигателей. Как отмечалось выше, тепловая инертность проводов контактной сети позволяет выбрать скорость регулировки напряжения, обеспечивающую выполнение всех описанных условий.

Также следует отметить, что для исключения частых переключений между вариантами система должна работать на поддержание температуры проводов не на одном заданном уровне, а в диапазоне значений: как только достигается верхний предел температуры, нагрев этого участка отключается, как только достигается нижний предел – включается нагрев этого участка. При этом система должна работать на опережение, то есть в режиме нагрева всегда должны находиться один или два участка, даже если охлаждение их еще не достигло нижней границы, но отключаться также по верхней. Это позволяет избежать одновременного охлаждения всех участков и перехода системы в состояние быстрых переключений. Если верхнюю границу сделать плавающей, то тем самым можно изменить и интервал между переключениями вариантов. На рис. 3 представлен вариант изменения температуры нагрева проводов контактной сети для ситуации, практически идентичный рис. 1, но с управлением источниками профилактического подогрева, где видно, что переключения между прогреваемыми участками выполнялось в противофазе, что обеспечивало поддержание температуры всей подвески при ограниченном количестве переключений (и выполнении условий по допустимому току и напряжению).

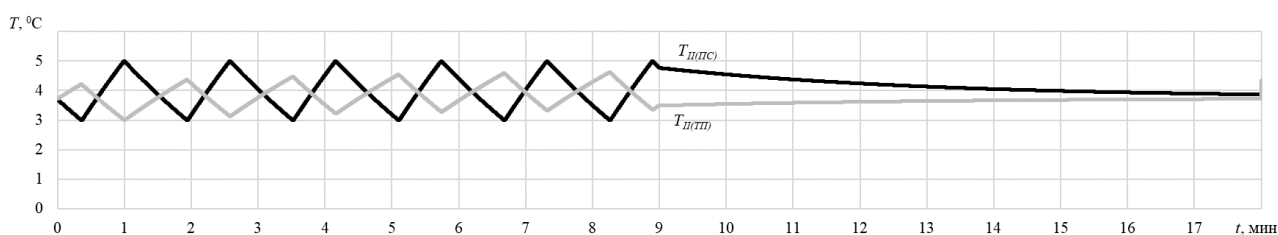


Рис. 3. Графики изменения температуры контактного провода четного пути при прохождении поезда со стороны ТП ($T_{П(ТП)}$) и со стороны ПС ($T_{П(ПС)}$):

0 мин – момент захода поезда на МПЗ; 9 мин – момент прохода ПС; 18 мин – момент выхода с МПЗ

Таким образом, проведенное исследование выявило, что источник питания для профилактического противогололедного подогрева проводов контактной сети может быть отрегулирован на режим поддержания температуры проводов, но при прохождении поезда этой настройки недостаточно. Чтобы исключить охлаждение даже части подвески, необходимо использовать регулируемые источники в каждой питающей линии. Рассмотренный алгоритм управления источниками профилактического подогрева позволяет обеспечить не только поддержание температуры проводов, что не дает им обледенеть, но и пропуск поездов без ввода ограничений. В отсутствие необходимости прогрева подвески эти

же источники питания могут выполнять роль вольтодобавочных устройств, что создает возможность увеличить пропускную способность участка.

Список литературы

1 Инструкция по подготовке к работе и обеспечению надежности работы устройств электрооборудования в зимний период : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 ноября 2019 г. № 2542/р. – Екатеринбург : УралЮрИзд-дат, 2023. – 68 с.

2 **Жарков, Ю. И.** Противогололедные режимы контактной сети / Ю. И. Жарков, Е. П. Фигурнов, Т. Е. Петрова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2 (50). – С. 27–37. – EDN QAGBID.

3 **Мизинцев, А. В.** Инновации в развитии электроэнергетической инфраструктуры железнодорожного транспорта / А. В. Мизинцев // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 6 (37). – С. 50–53. – EDN ONRLEF.

4 **Батрашов, А. Б.** Совершенствование математической модели расчета электротепловых процессов в контактной подвеске постоянного тока / А. Б. Батрашов, А. В. Паранин, К. Г. Шумаков // Транспорт Урала. – 2019. – № 1 (60). – С. 90–96. – DOI 10.20291/1815-9400-2019-1-90-96.

5 Моделирование нагрева контактной подвески при профилактическом подогреве в условиях движения поездов / Е. В. Добрынин, К. В. Богданова, А. А. Комолов, Е. М. Плохов // Электротехника. – 2023. – № 10. – С. 24–28. – DOI 10.53891/00135860_2023_10_24.

6 **Патент № 2800142 С1** Российская Федерация, МПК H02G 7/16. Система профилактического подогрева контактной сети / Е. В. Добрынин, К. В. Богданова. – № 2022129698 ; заявл. 16.11.2022 ; опубл. 19.07.2023, Бюл. № 20. – EDN TVPIZO.

7 **Добрынин, Е. В.** Адаптивная система профилактического подогрева проводов контактной сети / Е. В. Добрынин, К. В. Богданова // Наука и образование транспорту. – 2023. – № 1. – С. 269–271. – EDN RMLGBM.

References

1 Instructions for preparing for work and ensuring the reliability of electrical supply devices in winter: approved by Order of JSC “Russian Railways” dated November 14, 2019 No. 2542/r. – Yekaterinburg : UralUrIzdat, 2023. – 68 p.

2 **Zharkov, Yu. I.** Anti-icing modes of the contact network / Yu. I. Zharkov, E. P. Figurnov, T. E. Petrova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2013. – No. 2 (50). – P. 27–37. – EDN QAGBID.

3 **Mizintsev, A. V.** Innovations in the development of electrical power infrastructure of railway transport / A. V. Mizintsev // Transport of the Russian Federation. – 2011. – No. 6 (37). – P. 50–53. – EDN ONRLEF.

4 **Batrashov, A. B.** Improvement of the mathematical model for calculating electrothermal processes in a direct current contact suspension / A. B. Batrashov, A. V. Paranin, K. G. Shumakov // Transport of the Urals. – 2019. – No. 1 (60). – P. 90–96. – DOI 10.20291/1815-9400-2019-1-90-96.

5 Modeling of contact suspension heating during preventive heating under train traffic conditions / E. V. Dobrynin, K. V. Bogdanova, A. A. Komolov, E. M. Plokhov // Electrical engineering. – 2023. – No. 10. – P. 24–28. – DOI 10.53891/00135860_2023_10_24.

6 Patent No. 2800142 C1 Russian Federation, IPC H02G 7/16. System of preventive heating of the contact network / E. V. Dobrynin, K. V. Bogdanova. – No. 2022129698; appl. 11/16/2022; publ. 07/19/2023, Bull. No. 20. – EDN TVPIZO.

7 **Dobrynin, E. V.** Adaptive system for preventive heating of contact network wires / E. V. Dobrynin, K. V. Bogdanova // Science and education in transport. – 2023. – No. 1. – P. 269–271. – EDN RMLGBM.

K. V. Bogdanova, E. V. Dobrynin

MATHEMATICAL MODEL OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR PREVENTIVE HEATING OF CONTACT NETWORK WIRES

Abstract. The issues of using adjustable power sources to provide preventive anti-icing heating of contact network wires are considered. It is indicated the problems of the system of preventive heating of the wires of the section contact network that arise when trains move along it, associated with the cooling of the suspension due to changes in currents in the traction network. It is presented an algorithm for controlling sources of preventive heating which ensures that the temperature of the wires is maintained to prevent their icing without introducing

additional restrictions on the train movement. The algorithm takes into account the temperature limits which the heating of the wires is maintained, as well as transient processes that occur during switching, and the service life of the equipment.

Keywords: electric traction networks, contact network, preventive heating, traction power supply system, regulated power supplies.

For citation: Bogdanova, K. V. Mathematical model of an automated system for preventive heating of contact network wires / K. V. Bogdanova, E. V. Dobrynin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 2. – P. 42–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_42.

Сведения об авторах

Богданова Ксения Викторовна

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта»,
преподаватель,
e-mail: titorenkok@mail.ru

Добрынин Евгений Викторович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта»,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: eu_geniy@list.ru

Information about the authors

Bogdanova Ksenia Viktorovna

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Power Supply of Railway Transport»,
Lecturer,
e-mail: titorenkok@mail.ru

Dobrynin Evgeniy Viktorovich

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Power Supply of Railway Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Chair,
e-mail: eu_geniy@list.ru

А. С. Вильгельм, М. М. Никифоров

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАРИАНТОВ УСИЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ИНТЕРВАЛЬНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Аннотация. В статье предложена структура имитационной модели взаимодействия системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава для выполнения многовариантных расчетов пропускной способности участков железных дорог с учетом планов реализации проекта внедрения технологии интервального регулирования движения поездов. В качестве апробации предлагаемой модели выполнена оценка пиковых мощностей тяговых подстанций при реализации различных графиков движения поездов с применением интервального регулирования на двухпутном электрифицированном участке железной дороги для существующего варианта комплектации системы тягового электроснабжения и вариантов ее усиления. На примере однопутного участка показано, что применение предлагаемой имитационной модели позволит оценивать варианты построения системы тягового электроснабжения для неэлектрифицированных участков при различных перспективных схемах пропуска поездов. Предложенная имитационная модель может использоваться для сравнения технико-экономических показателей различных вариантов усиления системы тягового электроснабжения, моделирования поставарийных ситуаций и оценки пропускной способности системы тягового электроснабжения при восстановлении графика движения поездов, определения минимально возможных межпоездных интервалов.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, график движения поездов, пиковая мощность, тяговые расчеты, электрические расчеты, интервальное регулирование движения поездов.

Для цитирования: Вильгельм, А. С. Применение имитационного моделирования для оценки эффективности вариантов усиления системы тягового электроснабжения при интервальном регулировании движения поездов / А. С. Вильгельм, М. М. Никифоров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 48–56. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_48.

Темпы роста потребностей в грузоперевозках на Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралях [1] диктуют свои условия для развития системы организации тяги поездов [2]. Так, например, постепенно расширяется полигон использования системы интервального регулирования и технологии «виртуальная сцепка» [3–5]. При этом одним из основных лимитирующих параметров по пропускной и провозной способности участков является работа системы тягового электроснабжения (далее – СТЭ).

Общая протяженность участков направления Кузбасс – Дальний Восток, на которых по устройствам электроснабжения не обеспечиваются перспективные размеры движения поездов к 2025 году, составляет более 6000 км. Для решения данной проблемы планируются к внедрению такие мероприятия, как обновление оборудования и устройств хозяйства электроснабжения, модернизация БАМа и Транссиба, увеличение пропускной способности участка Артышта – Междуреченск – Тайшет и др.

Для обоснованного проектирования усиления СТЭ необходима разработка модели многовариантных расчетов Восточного полигона, с учетом планируемых к реализации проектов модернизации Транссиба и БАМа до 2025 года и внедрения технологии интервального регулирования движения поездов.

Для достижения этой цели необходимо решение следующих задач:

– разработка имитационных моделей СТЭ в границах участков Восточного полигона, в том числе для существующих условий и планируемых к реализации проектов модернизации Транссиба и БАМа до 2025 года;

– анализ факторов, лимитирующих пропускную способность по элементам СТЭ в границах рассматриваемого полигона по результатам имитационного моделирования;

– оценка потенциала повышения пропускной способности в границах участков полигона к 2025 году при реализации планов по усилению СТЭ и электрификации БАМа, а также при внедрении технологии интервального регулирования движения поездов;

– определение пиковых мощностей тяговых нагрузок на шинах тяговых подстанций рассматриваемых участков для обеспечения расчетной пропускной способности;

– разработка рекомендаций по первоочередному усилению СТЭ в границах рассматриваемых участков;

– прогноз увеличения отгрузки продукции при различных вариантах усиления СТЭ Восточного полигона железных дорог и внедрения технологии интервального регулирования движения поездов.

Несмотря на существенный потенциал рекуперативного торможения на участках Восточного полигона [6–8], в особенности с учетом увеличения массы поездов и размеров движения [9], тяговые расчеты и оценка режимов работы СТЭ выполнены для варианта без рекуперативного торможения (для случая наибольшей загрузки тяговых подстанций) в соответствии с [10–12].

В качестве расчетного участка для апробации имитационной модели был выбран участок Аячи – Бамовская Забайкальской железной дороги протяженностью 187,2 км, включающий в себя четыре межподстанционные зоны (далее – МПЗ), получающие питание от шести тяговых подстанций (рис. 1). Тяговые расчеты выполнены для электровозов ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги для вождения поездов массой 6300 и 7100 т. В нечетном направлении к расчету приняты порожние поезда массой 3200 т. Описание участка Аячи – Бамовская представлены на рис. 1.

На основе тяговых расчетов были сформированы модели графиков движения поездов с учетом заданных весовых норм и межпоездных интервалов по следующим схемам, в которых «с» обозначает поезда массой 6300 т, «Н» – 7100 т:

- график 1 – пакетный пропуск 72 поездов по схеме «Н-с-с-с» в четном направлении с интервалом 10 мин с 72 поездами массой 3200 т в нечетном направлении (далее ГДП-1);
- график 2 – пакетный пропуск 72 поездов по схеме «Н-Н-Н-Н» в четном направлении с интервалом 10 мин с 72 поездами массой 3200 т в нечетном направлении (далее ГДП-2);
- график 3 – пакетный пропуск 80 поездов по схеме «Н-с-с-с» в четном направлении с интервалом 8 мин с 80 поездами массой 3200 т в нечетном направлении (далее ГДП-3);
- график 4 – пакетный пропуск 80 поездов по схеме «Н-Н-Н-Н» в четном направлении с интервалом 8 мин с 80 поездами массой 3200 т в нечетном направлении (далее ГДП-4).

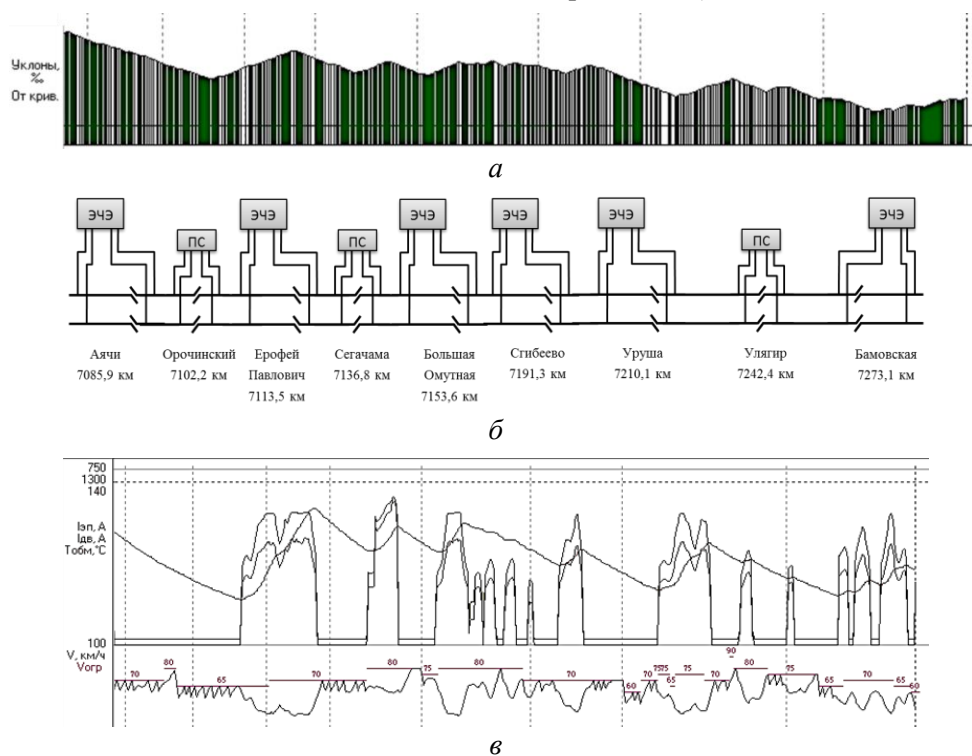


Рис. 1. Описание участка Аячи – Бамовская:

а – спрямленный профиль пути; б – схема расположения объектов системы тягового электроснабжения; в – результаты тяговых расчетов

Первые два расчетных графика (ГДП-1 и ГДП-2) соответствуют базовым размерам движения поездов. ГДП-3 и ГДП-4 соответствуют перспективным размерам движения поездов на 2025 год.

Затем были выполнены электрические расчеты работы СТЭ для представленных вариантов организации (графиков) движения поездов. В общем суточном электрическом расчете режимов работы СТЭ участка были определены расходы активной и реактивной энергии по тяговым подстанциям, потери энергии в трансформаторах и тяговой сети, нагрузки трансформаторов, нагрев проводов, напряжения на токоприемниках электропоездов (минимальные и трехминутные) и выявлены ограничивающие параметры СТЭ. Характеристики рабочего режима участка Аячи – Бамовская на примере организации движения поездов по ГДП-1 представлены в табл. 1.

Для выявления пиковых значений нагрузки тяговых подстанций были выполнены электрические поминутные расчеты мгновенных схем работы участка за сутки (всего 1440 расчетов). Пример результатов такого расчета для мгновенной схемы пикового момента (на 525-й минуте расчета) для случая с четырьмя поездами на подъеме в тяге в МПЗ Ерофей Павлович – Большая Омутная с наиболее сложным профилем пути на расчетном участке в четном направлении приведен на рис. 2.

Таблица 1

Основные характеристики рабочего режима участка Аячи – Бамовская при реализации ГДП-1

Параметр	Значение	Примечание
Расход энергии: – активной, кВт·ч	1 834 960	Потери в тяговой сети 39 763 кВт·ч (2,2 %)
– реактивной, квар·ч	737 457	
Ограничивающий коэффициент нагрузки	0,69	ЭЧЭ Большая Омутная (доп. знач. – 1,5 в течение 10 мин)
Температура трансформатора, °С	66	ЭЧЭ Большая Омутная (доп. знач. – 95 °С)
Минимальное напряжение, кВ	23,57	1-й путь зоны Ерофей Павлович – Большая Омутная, поезд № 5 на 7136,68 км (184 мин)
Ограничение по температуре, °С: – контактная сеть	53	Ф2 ЭЧЭ Большая Омутная (при допустимой температуре 95° в течение 20 мин) ЭЧЭ Большая Омутная (при допустимой температуре 90° в течение 20 мин)
– отсасывающая линия	49	

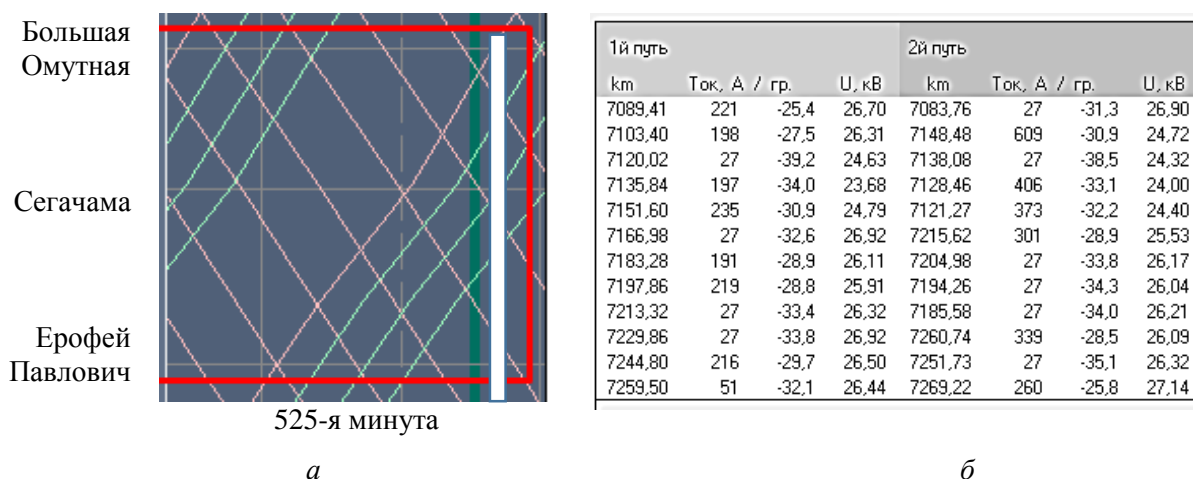


Рис. 2. Фрагмент графика движения поездов (а) и нагрузка мгновенной схемы (б) для 525-й минуты расчета

На основе полученных данных были определены пиковые мощности на тяговых подстанциях рассмотренной МПЗ на 525-й минуте расчета при пропуске пакета из четырех поездов (по схеме «Н-с-с») с интервалом 10 мин, которые составили для подстанции Ерофей Павлович – 17,0 МВт, для подстанции Большая Омутная – 34,3 МВт.

Аналогичные работы по определению пиковых моментов по мгновенным схемам были выполнены для трех других вариантов организации движения поездов. Результаты сведены в табл. 2.

На данных примерах видно, как изменяется пиковая мощность тяговых подстанций при переходе к перспективным размерам движения. Так, суммарная пиковая мощность по двум тяговым подстанциям на рассматриваемых минутах для варианта организации движения поездов по схеме «Н-с-с» при переходе к перспективным размерам движения увеличится на 2,5 %, для варианта организации движения поездов по схеме «Н-Н-Н-Н» – на 2,7 %.

Далее выполняется анализ значений лимитирующих параметров и проверка их изменения при различных вариантах усиления СТЭ с целью обеспечения нормальных условий работы участка.

Таблица 2

Результаты расчетов пиковых мощностей тяговых подстанций Ерофей Павлович и Большая Омутная (МВт)

Вариант расчета	Минута	ТП Ерофей Павлович	ТП Большая Омутная
По ГДП_1 на 72 пары = (18 пакетов × 4 (Н-с-с-с)) 10 мин интервал	525	17,0	34,3
По ГДП_2 на 72 пары = (18 пакетов × 4 (Н-Н-Н-Н)) 10 мин интервал	525	18,3	35,2
По ГДП_3 на 80 пар = (20 пакетов × 4 (Н-с-с-с)) 8 мин интервал	543	17,8	34,9
По ГДП_4 на 80 пар = (20 пакетов × 4 (Н-Н-Н-Н)) 8 мин интервал	543	18,8	36,1

К техническим решениям, направленным на усиление СТЭ, можно отнести следующие направления:

- техническое перевооружение тяговых подстанций с заменой эксплуатируемого силового оборудования на более мощное или установкой дополнительного силового оборудования (понижающие трансформаторы и автотрансформаторы с улучшенными перегрузочными характеристиками);
- снижение электрического сопротивления тяговой сети (увеличение сечения контактной подвески и питающих линий, изменение схем питания с сооружением постов секционирования, пунктов параллельного соединения, шунтирующих линий, увеличение мощности дроссель-трансформаторов);
- применение технических средств повышения напряжения (устройства стабилизации напряжения, в том числе устройства компенсации реактивной мощности);
- строительство дополнительных объектов СТЭ (пункты параллельного соединения, посты секционирования, автотрансформаторные пункты, тяговые подстанции и пункты питания, переход к распределенной системе тягового электроснабжения с активными постами секционирования).

В качестве апробации было выполнено имитационное моделирование для оценки загрузки тяговых подстанций однопутного участка Волочаевка II – Комсомольск-на-Амуре при его электрификации. Для этого была создана модель продольного профиля пути данного участка. Принято, что СТЭ переменного тока 27,5 кВ участка будет включать в себя шесть тяговых подстанций, на пяти из которых установлены по два понижающих трансформатора мощностью 25 МВ·А, а на одной – два понижающих трансформатора мощностью 40 МВ·А. В работе постоянно находится только один трансформатор. Перспективные графики движения поездов составлены из расчета 24 пар грузовых поездов и двух пар пассажирских, планируемых к реализации к 2025 г. Распределение грузовых поездов по количеству и массам приведено в табл. 3.

Таблица 3

Распределение грузовых поездов по количеству и массам

Масса поезда, т	Количество поездов по направлениям	
	Волочаевка II – Комсомольск-на-Амуре	Комсомольск-на-Амуре – Волочаевка II
7100	14	0
6300	4	6
4500	3	3
3000	1	1
1700	2	14

Расчет пиковых мощностей всех тяговых подстанций участка Волочаевка II – Комсомольск-на-Амуре выполнен поминутно за одни сутки. Пример полученных графиков пиковых мощностей для тяговых подстанций Болонь и Подали показан на рис. 3.

Фрагмент наибольшей суммарной мощности по двум тяговым подстанциям в данной МПЗ показан на рис. 4. В промежуток времени с 610-й по 620-ю минуту в МПЗ Болонь – Подали проходят в тяге три поезда массой 7100 т в четном направлении и один поезд массой 6300 т в нечетном направлении.

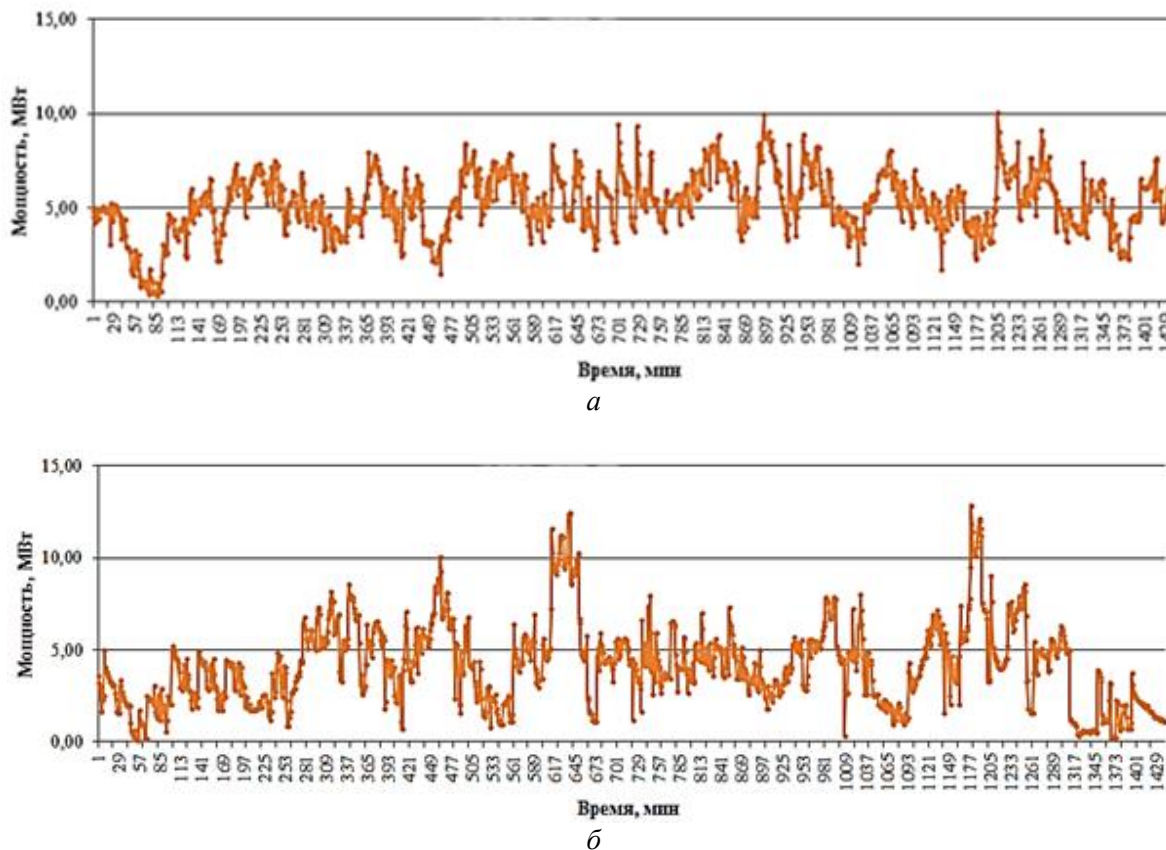


Рис. 3. Поминутные расчетные значения пиковых мощностей на тяговых подстанциях Болонь (а) и Подали (б)

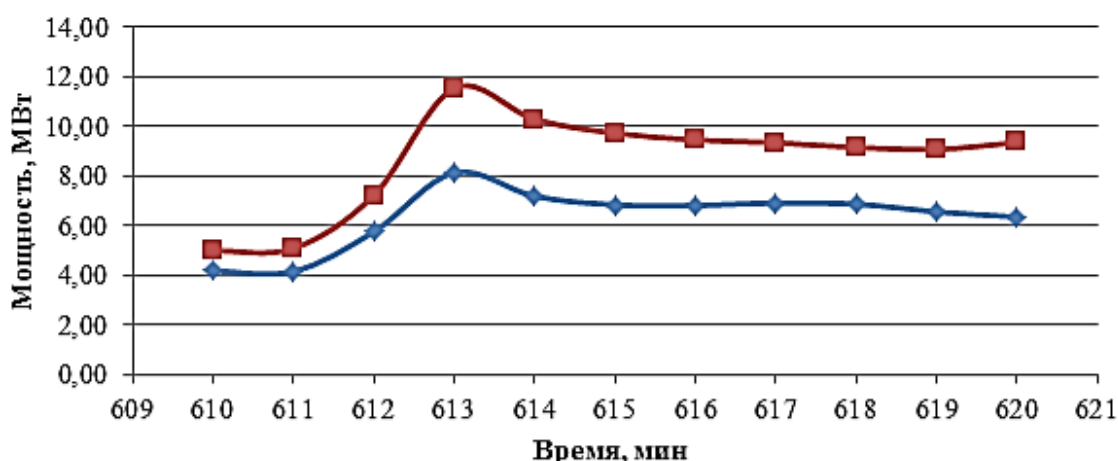


Рис. 4. Результаты расчета пиковых мощностей тяговых подстанций с 610-й по 620-ю минуту:

— на шинах ТП Болонь; — на шинах ТП Подали

Фрагмент схемы СТЭ и результаты определения токов и напряжений подстанций для «пиковой» 613-й минуты в МПЗ Болонь – Подали в момент прохождения в тяге трех поездов массой 7100 т в четном направлении и одного поезда массой 6300 т в нечетном направлении показан на рис. 5.

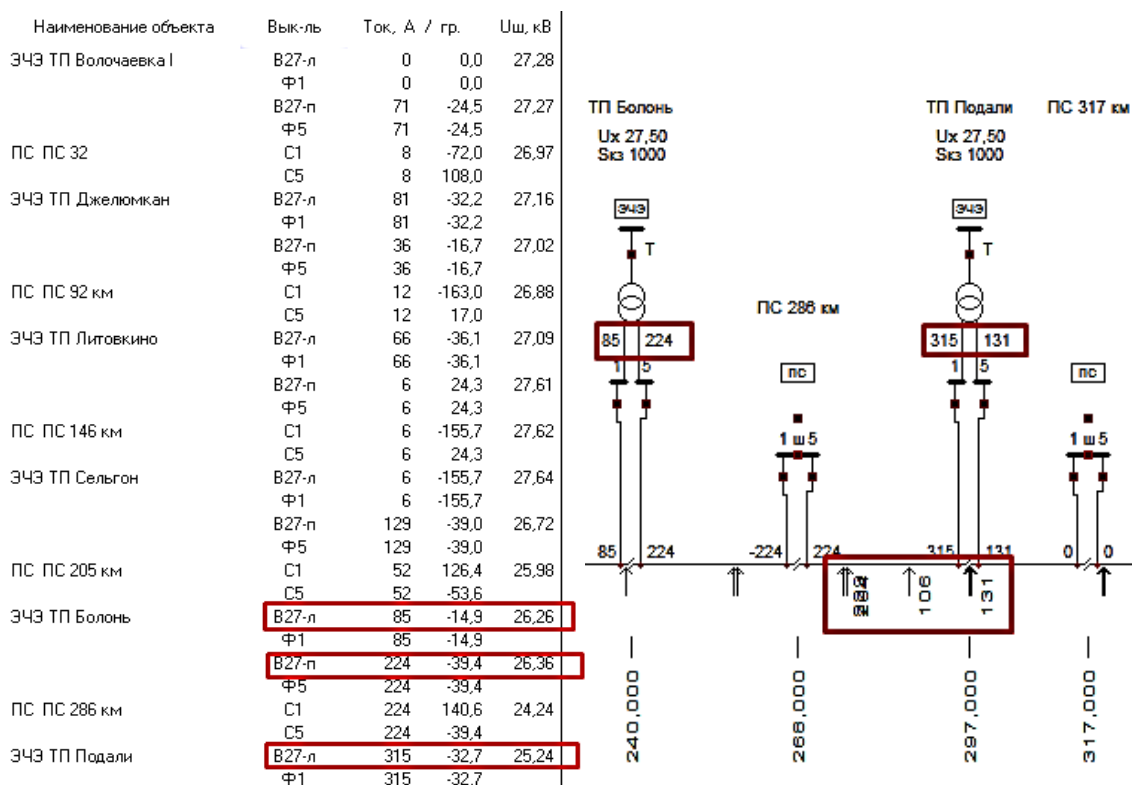


Рис. 5. Результаты электрического расчета для 613-й минуты в МПЗ Болонь – Подали при прохождении трех поездов массой 7100 т в четном направлении и одного поезда массой 6300 т в нечетном направлении

Выводы

По результатам проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы.

1 Предлагаемая имитационная модель совместной работы СТЭ и ЭПС позволяет локализовать энергообъекты, ограничивающие сквозное внедрение технологии интервального регулирования движения поездов на Восточном полигоне.

2 Разработанная имитационная модель позволяет определить влияния различных вариантов графика движения поездов на уровень загрузки трансформаторного оборудования тяговых подстанций и необходимость подключения резервного трансформатора. Так, например, выполненные по представленной модели расчеты показали, что при увеличении количества пар поездов с 72 до 80 (с 18 пакетов до 20 пакетов) для варианта с одним поездом наибольшей массы и тремя поездами средней массы внутри пакета пиковые мощности тяговых подстанций Ерофей Павлович и Большая Омутная возрастают на 4,7 и 1,7 % соответственно, для варианта с четырьмя поездами наибольшей массы в пакете пиковые мощности данных тяговых подстанций возрастают на 2,7 и 2,6 % соответственно. Изменение же состава пакетов с одного до четырех поездов наибольшей массы приводит к увеличению пиковых мощностей рассмотренных подстанций на 7,6 и 2,6 % соответственно при 72 парах поездов, и на 5,6 и 3,4 % соответственно при 80 парах поездов.

3 Представлены результаты апробации предлагаемой имитационной модели с различными режимами работы проектируемой СТЭ при различных размерах движения поездов для неэлектрифицированного однопутного участка железной дороги. Выполненные расчеты показали, что проектная схема электрификации участка Волочаевка II – Комсомольск-на-Амуре позволяет реализовать перспективные графики движения поездов.

4 Предлагаемая имитационная модель может быть использована не только для разработки мероприятий по усилению СТЭ для различных вариантов потребной пропускной способности участков, но также для следующих случаев:

а) сравнение технико-экономических показателей различных вариантов усиления СТЭ для одного и того же участка железной дороги;

б) оценка максимальной пропускной способности СТЭ при восстановлении графика движения поездов в послеаварийных ситуациях и в летний период при предоставлении «окон»;

в) прогнозирование увеличения отгрузки продукции на основании рассмотренных вариантов усиления СТЭ железных дорог.

Список литературы

1 Указ Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 (ред. 19 июля 2018 г., 21 июля 2020 г.) «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» // Base.garant : [сайт]. – URL: <https://base.garant.ru/71937200> (дата обращения: 28.03.2023).

2 **Игин, В. Н.** Восточный полигон диктует условия тяге / В. Н. Игин // Локомотив. – 2021. – № 12 (780). – С. 6–8. – ISSN 0869-8147.

3 **Розенберг, Е. Н.** Интервальное регулирование движения поездов / Е. Н. Розенберг, А. А. Абрамов, В. В. Батраев // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 9. – С. 19–24. – ISSN 0044-4448.

4 **Оленцевич, В. А.** Эффективность внедрения интервального регулирования движения поездов по системе «виртуальная сцепка» на участке / В. А. Оленцевич, Р. Ю. Упырь, А. А. Антипина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 66, № 2. – С. 182–189. – DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).182–189.

5 **Розенберг, Е. Н.** Комплексный подход к решению задачи повышения пропускной способности / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, И. А. Панферов // Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 8. – С. 2–6. – DOI 10.34649/AT.2022.8.8.001.

6 **Кейно, М. Ю.** Потенциал рекуперации электроэнергии на участках Восточного полигона РЖД / М. Ю. Кейно // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2021. – № 2 (27). – С. 3–8. – ISSN 2415-8658.

7 **Черемисин, В. Т.** Эффективность использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного и переменного тока : монография / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2018. – 216 с. – ISBN 978-5-94941-183-4.

8 **Вильгельм, А. С.** Влияние технологии перевозочного процесса на эффективность эксплуатации грузовых электровозов / А. С. Вильгельм, А. А. Комяков, А. Л. Каштанов // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 126–135. – ISSN 2220-4245.

9 **Никифоров, М. М.** Влияние массы составов и размеров движения поездов на эффективность ис-

References

1 Decree of the President of the Russian Federation of May 7, 2018 No. 204 (as amended on July 19, 2018, July 21, 2020) “On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period until 2024” // Base.garant : [website]. – URL: <https://base.garant.ru/71937200> (date of access: 03/28/2023).

2 **Igin, V. N.** Eastern range dictates the conditions for traction / V. N. Igin // Lokomotiv. – 2021. – No. 12 (780). – P. 6–8. – ISSN 0869-8147.

3 **Rozenberg, E. N.** Interval control of train traffic / E. N. Rozenberg, A. A. Batraev, V. V. Abramov // Railway Transport. – 2017. – No. 9. – P. 19–24. – ISSN 0044-4448.

4 **Olentsevich, V. A.** Efficiency of implementation of interval regulation of train traffic according to the "virtual coupling" system on the section / V. A. Olentsevich, R. Yu. Upyr, A. A. Antipina // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2020. – Vol. 66, No. 2. – P. 182–189. – DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).182–189.

5 **Rosenberg, E. N.** An integrated approach to solving the problem of increasing throughput capacity / E. N. Rosenberg, A. V. Ozerov, I. A. Panferov // Automation, communications, computer science. – 2022. – No. 8. – P. 2–6. – DOI 10.34649/AT.2022.8.8.001.

6 **Keino, M. Yu.** Electricity recovery potential in sections of the Eastern training ground of Russian Railways / M. Yu. Keino // Transport of the Asia-Pacific region. – 2021. – No. 2 (27). – P. 3–8. – ISSN 2415-8658.

7 **Cheremisin, V. T.** Efficiency of using recovery energy on direct and alternating current railways : monograph / V. T. Cheremisin, M. M. Nikiforov, A. S. Wilhelm. – Omsk : Omsk State Transport University, 2018. – 216 p. – ISBN 978-5-94941-183-4.

8 **Wilhelm, A. S.** Influence of transportation process technology on the operating efficiency of freight electric locomotives / A. S. Wilhelm, A. A. Komyakov, A. L. Kashtanov // News of the Transsib. – 2022. – No. 3 (51). – P. 126–135. – ISSN 2220-4245.

9 **Nikiforov, M. M.** The influence of the mass of trains and the size of train traffic on the efficiency

пользования энергии рекуперации на участках железных дорог переменного тока / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : материалы IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск, 2018. – С. 129–139. – ISBN 978-5-94941-216-9.

10 **Вильгельм, А. С.** Апробация расчетной модели системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока для оценки потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения / А. С. Вильгельм, В. И. Гутников, М. М. Никифоров // Известия Транссиба. – 2014. – № 1(17). – С. 50–57. – ISSN 2220-4245.

11 **Патент № 2641537 С2 Российская Федерация, МПК В60L 3/12, G01R 21/133, G06F 17/50.** Способ определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения / А. С. Вильгельм, А. А. Комяков, В. Л. Незевак [и др.]. – № 2016119647 ; заявл. 20.05.2016 ; опубл. 18.01.2018 ; Бюл. № 2. – 18 с.

12 **Комяков, А. А.** Разработка алгоритма совместных тяговых и электрических расчетов с учетом характеристик и параметров участков и поезда ситуации / А. А. Комяков, А. С. Вильгельм, А. И. Шкулов // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 106–115. – ISSN 2220-4245.

of using recovery energy on sections of AC railways / M. M. Nikiforov, A. S. Wilhelm // Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction : Materials of the IV All-Russian Scientific and Technical conference with international participation. – Omsk, 2018. – P. 129–139. – ISBN 978-5-94941-216-9.

10 **Wilhelm, A. S.** Approbation of a calculation model of the traction power supply system for DC railways to assess the energy efficiency potential of regenerative braking / A. S. Wilhelm, V. I. Gutnikov, M. M. Nikiforov // Izvestia Transsib. – 2014. – No. 1(17). – P. 50–57. – ISSN 2220-4245.

11 **Patent No. 2641537 C2 Russian Federation, IPC B60L 3/12, G01R 21/133, G06F 17/50.** A method for determining the energy indicators of train movement and traction power supply system / A. S. Wilhelm, A. A. Komyakov, V. L. Nezevak [et al.]. – No. 2016119647 ; application 05/20/2016 ; publ. 01/18/2018 ; Bul. No. 2. – 18 p.

12 **Komyakov, A. A.** Development of an algorithm for joint traction and electrical calculations, taking into account the characteristics and parameters of sections and the train situation / A. A. Komyakov, A. S. Wilhelm, A. I. Shkulov // Izvestia Transsib. – 2021. – No. 3 (47). – P. 106–115. – ISSN 2220-4245.

A. S. Vilgelm, M. M. Nikiforov

THE USE OF SIMULATION MODELING TO EVALUATE EFFICIENCY MAKES IT POSSIBLE TO STRENGTHEN TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS WITH INTERVAL REGULATION OF TRAIN MOVEMENT

Abstract. The paper proposes the structure of a simulation model, a traction power supply system operating in conjunction with electric rolling stock, to perform multivariate calculations of the capacity of railway sections due to plans for the implementation of a project for introducing interval control technology for train traffic. To test the proposed model, an assessment was made of the peak powers of traction substations during the implementation of various train schedules using interval control on a double-track electrified section of the railway for the existing configuration of the traction power supply system and options for its strengthening. Using the example of a single-track section, it is shown that the use of the proposed simulation model will make it possible to evaluate options for constructing a traction power supply system for non-electrified sections with various promising train transit schemes. The proposed simulation model can be used to compare the technical and economic indicators of various options for strengthening the traction power supply system, modeling post-emergency situations and assessing the capacity of the traction power supply system when restoring the train schedule, and determining the minimum possible intervals between trains.

Keywords: traction power supply system, train schedules, peak power, traction calculations, electrical calculations, interval control of train traffic.

For citation: Vilgelm, A. S. The use of simulation modeling to evaluate efficiency makes it possible to strengthen traction power supply systems with interval regulation of train movement / A. S. Vilgelm, M. M. Nikiforov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 48–56. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_48.

Сведения об авторах**Вильгельм Александр Сергеевич**

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Подвижной состав электрических
железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: vilgelm1987@yandex.ru

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС),
кандидат технических наук,
директор научно-исследовательского
института энергосбережения на
железнодорожном транспорте,
e-mail: nikiforovmm@mail.ru

Information about the authors**Vilgelm Alexander Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Electric Railways Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: vilgelm1987@yandex.ru

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU),
Candidate of Engineering Sciences,
Director of the Research Institute for Energy Saving
in Railway Transport,
e-mail: nikiforovmm@mail.ru

А. В. Кацай, В. А. Зубакин

СТОИМОСТНОЙ АНАЛИЗ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭНЕРГИИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Аннотация. В исследовании рассмотрены стоимостные аспекты процессов рекуперации электроэнергии в электротранспорте и её повторного использования на полезную перевозочную работу. Закупочная стоимость рекуперированной энергии равна нулю. Рекуперативное торможение не вызывает дополнительного износа элементов систем тяги вагонов. В силу этого направляемая на повторное полезное использование рекуперативная энергия имеет нулевую себестоимость. С применением бортовых или стационарных накопителей избыточная часть энергии рекуперации может быть перенаправлена на повторную полезную работу. Поскольку КПД любых накопителей не превышает 64–68 %, то потери от полной энергии рекуперации в бортовых накопителях превышают треть от её объёма. Помимо этого, из сети дополнительно потребляется энергия на собственные нужды и перевозку бортовых накопителей. Стационарные накопители не перевозятся, полностью сохраняют полезные сетевые перетоки рекуперации, обеспечивают непосредственное потребление её сетевой нагрузкой в ходе зарядки и выдают запасённую её часть в сеть после хранения. В сравнении с отсутствием накопителей любого типа бортовые устройства приводят к увеличению оплачиваемого энергопотребления ГЭТ, а стационарные – существенно его уменьшают.

Ключевые слова: источники энергии, контактная сеть, полезная и избыточная энергии рекуперативного торможения, стационарный и бортовой накопитель, перенаправление избыточной рекуперации, стоимостная форма, затраты, оплачиваемая энергия, тарифы.

Для цитирования: Кацай, А. В. Стоимостной анализ рекуперативной энергии городского электротранспорта / А. В. Кацай, В. А. Зубакин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 57–72. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_57.

Введение

За выделенный период (например, за день) электротранспортное предприятие осуществляет определённый объём транспортной работы по перевозке пассажиров – $A_{т.р.}$, которая отражается в таких показателях, как количество перевезённых пассажиров, выполненный пробег в тонно-километрах, штатная работа бортового и стационарного оборудования в моточасах, труд персонала в человеко-часах и др. Для обеспечения множества проводимых работ были произведены затраты (в которые входят: работа рабочей силы, расход материалов, износ инструмента и оснастки, а также основных средств, включая стационарное оборудование, здания, контактную сеть, тяговые подстанции, подвижной состав и т.д.). В этот список также входит обеспечение оборудования электрической энергией. Энергия расходуется на работу подвижного состава (ПС) и оборудования стационарной транспортной инфраструктуры, подключённой к системе тягового энергоснабжения постоянного тока (СТЭ), а также на производственные нужды депо и для осуществления административно-управленческой деятельности (собственные нужды предприятия на стороне переменного тока). В настоящем исследовании мы рассматриваем в качестве объекта СТЭ постоянного тока, которая питает энергопотребляющее оборудование ПС и стационарного электрооборудования, подключённого к контактной сети (КС), поскольку именно по стороне постоянного тока расходуется 90 и более процентов общего объёма потребляемой энергии в таком предприятии. Предметом исследования являются качественные и количественные стоимостные характеристики оборота возвращаемой на повторное использование электроэнергии (рекуперированной), в том числе её превращений, при выполнении транспортной работы в СТЭ. В исследовании используются методы энергетического баланса, стоимостного анализа товарной формы и статистического анализа.

Основная часть*Баланс энергии в контактной сети электротранспорта*

Для выполнения транспортной работы указанным оборудованием на стороне постоянного тока затрачивается электрическая энергия в объёме $E_{т.р.}$. То есть выполненная транспортная работа $A_{т.р.}$ включает в себя затраченную на работу оборудования электрическую энергию $E_{т.р.}$, причём последняя включает энергию, потреблённую тяговыми приводами подвижного состава ($E_{тяги}$), а также нетяговым бортовым оборудованием ($E_{нетяги_борт}$) и стационарным сетевым оборудованием ($E_{нетяги_стац}$):

$$A_{т.р.} \leftarrow E_{т.р.} = E_{тяги} + E_{нетяги_борт} + E_{нетяги_стац}, \quad (1)$$

где стрелкой обозначено включение потреблённой электроэнергии в состав выполненной транспортной работы как её необходимый момент.

С целью обеспечения баланса источников и потребителей энергии [1], используемой для выполнения работы $A_{т.р.}$ перечисленного оборудования, объём электроэнергии $E_{т.р.}$ берётся от источников энергии, которые питают СТЭ. В современной электротранспортной системе в число источников энергии СТЭ входят первичные энергоисточники в виде тяговых выпрямительных подстанций, а также вторичные энергоисточники – тяговые приводы вагонов, выдающие в КС рекуперированную энергию (преобразуемую из механической в электрическую) в ходе торможения. Из общего объёма механической энергии линейного движения, преобразуемой в ходе торможения в электроэнергию ($E_{рек}$), часть рекуперированной энергии выдаётся в сеть ($E_{рек_полезн}$) на имеющуюся там одновременно с этим процессом тяговую и нетяговую нагрузку ($E_{тяги}$ и $E_{нетяги}$), а другая часть, обычно называемая избыточной энергией рекуперации ($E_{рек_избыт}$), при отсутствии одновременной достаточной нагрузки направляется на тормозные резисторы своего вагона, где рассеивается теплом в атмосферу ($E_{резист}$). Избыточная рекуперация $E_{рек_избыт}$ не уходит в сеть, т.е. не участвует в выполнении транспортной работы другими присоединёнными в КС энергопотребителями, однако выполняет полезную функцию в силовой электрической цепи вагона и в общем уравнении электробаланса источников и потребителей СТЭ за определённый период эта часть электроэнергии также присутствует:

$$E_{ТП} + E_{рек_полезн} + E_{рек_избыт} = E_{тяги} + E_{нетяги_борт} + E_{нетяги_стац} + E_{резист}, \quad (2)$$

где ($E_{ТП}$) – энергия, выдаваемая в КС постоянного тока от первичных энергоисточников – тяговых понижающих подстанций системы. Потери энергии при работе оборудования ПС, стационарной нагрузки и КС (т.н. технологическое потребление) для простоты изложения учтены в этой формуле в составе нетяговой нагрузки. Более подробно о потерях энергии см., например, в [17].

Левая часть уравнения энергобаланса – источники энергии – имеет только одно составляющее, которое требует оплаты – $E_{ТП}$, за которую денежные средства перечисляются энергоснабжающей организации, поставившей эту часть энергии. В реальности расчёт потребителя с энергопоставщиком осуществляется как за поставленную электроэнергию, так и за поставленную максимальную пиковую мощность. Для упрощения оценки затрат на энергоресурсы многими энергопоставщиками и потребителями производится сведение сложносоставной оплаты за энергоресурсы по энергии и по мощности к т.н. «котловому» тарифу, значение которого получается делением суммы выставленных счетов за энергию и за мощность на объём потреблённой энергии. Далее в исследовании мы будем рассматривать стоимостные показатели энергии рекуперации именно с использованием «котлового» тарифа. За две другие части суммарного объёма выдаваемой другими источниками на выполнение транспортной работы энергии ($E_{рек_полезн}$ и $E_{рек_избыт}$) оплата никому не осуществляется, т.к. эта электроэнергия ранее уже была закуплена и теперь используется во второй раз как возобновляемый отход производства. Точнее, она является возобновлённой электроэнергией, вошедшей в технологическое обращение

в первый раз от первичного энергоисточника, затем превращённая тяговым приводом в форму механического линейного движения вагона и вращения колёс, после чего этими же тяговыми приводами в генераторном режиме при торможении превращённая во второй раз обратно в форму электроэнергии (т. е. рекуперированная). Другими словами, рекуперативная энергия торможения подвижного состава городского электротранспорта является возобновлённой электроэнергией, прошедшей полный цикл превращений из электроэнергии в механическую и из этой последней снова в электрическую в ходе её использования, а тяговый электропривод рекуперативно тормозящего вагона является источником возобновляемой энергии, поскольку работу по превращению её форм выполняют они. Таким образом, предприятия городского электротранспорта фактически производят для собственного потребления возобновляемую электроэнергию, которая, в сравнении со всеми прочими имеющимися технологиями производства возобновляемой энергии, имеет полный (замкнутый) цикл возобновления и, как будет показано далее, является наиболее технологически и экономически эффективной из них.

По данным многих исследований процессов рекуперации в ГЭТ [2–4] общий объём восстановленной из механического движения электроэнергии может равняться до половины от потребляемой на тягу энергии или до четверти от всего объёма энергопотребления $E_{м.р.}$ в СТЭ на выполнение транспортной работы:

$$E_{рек} = E_{рек_полезн} + E_{рек_избыт} \approx 0,5 * E_{тяги} \approx 0,25 * E_{м.р.} \quad (3)$$

Полезная работа избыточной рекуперации

Избыточная рекуперация производится современной тяговой системой с частотными транзисторными системами управления тягой (ТрСУ) вагона в таком же порядке, какой был и на предыдущем технологическом уровне развития подвижного состава ГЭТ, когда он принципиально не имел вовсе возможности выдавать рекуперированную электроэнергию на повторное полезное использование. Новый технический уровень тяговых приводов с применением транзисторно-инверторных преобразователей для управления тяговыми двигателями более эффективно выполняет ту же функцию по обеспечению снижения количества механической энергии движущегося вагона за счёт преобразования её в электрическую, но с перенаправлением части её в КС, где эта энергия потребляется другим сетевым оборудованием на выполнение им в этот период своей части транспортной работы. Это перенаправление возможно только при одновременном с рекуперативным торможением одного вагона присутствии в сети нагрузки, имеющей мощность потребления не ниже, чем мощность рекуперации. При отсутствии в сети такой нагрузочной мощности на клеммах тягового привода повышается напряжение и, по достижении его значения уровня отсечки (уставки) тормозного прерывателя, эта энергия переходит в цепь утилизации её на тормозных резисторах.

При этом способе утилизации рекуперативной энергии в контактную сеть в процессе выполнения полезной транспортной работы на этапе торможения вагона у тяговой системы с ТрСУ появляется новая функциональная составляющая к имеющейся у реостатно-контакторных систем управления тягой (РКСУ) – помимо обеспечения бортовой нагрузки для производимой энергии рекуперации обеспечить канал перенаправления её в КС на сетевую нагрузку. Реализация её не требует никаких иных технологических устройств в дополнение к тем, которые уже имеются у частотного привода для обеспечения избыточной утилизации рекуперативной энергии на тормозных резисторах, поскольку главное звено в этом алгоритме – работа тормозного прерывателя – силового транзистора, который может только либо присоединить нагрузку в виде бортовых тормозных резисторов к цепи перетока рекуперированной энергии у тормозящего вагона, либо не присоединить. Так, тормозной прерыватель не замыкается на эту цепь с тормозным резистором в случае работы тягового электродвигателя на разгон вагона, а замыкается только в случае, как показано выше, когда в КС нет достаточной по мощности нагрузки для приёма энергии рекуперации при торможении вагона. В случае же направления энергии рекуперации в КС, когда там имеется достаточная по мощности нагрузка, тормозной прерыватель также не замыкает тормозной резистор на звено постоянного тока инвертора, как и в случае разгона вагона. Поскольку в период полезного рекуперативного торможения единственный элемент, регулирующий перетоки энергии рекуперации – тормозной прерыватель – не работает (остаётся разомкнутым в цепи с бортовым резистором), то он никак не использует свой ресурс срабатывания, т. е. не изнашивается. Таким образом, рекуперированная энергия не содержит ни переменной стоимостной составляющей ($C_{перем_рек}$), затраченной на закупку этой энергии у стороннего поставщика, ни амортизационной

составляющей затрат ($C_{аморт_рек}$), связанной с износом генерирующего оборудования, которое на электротранспорте является распределённым и состоит из тяговых двигателей множества вагонов:

$$C_{перем_рек} = 0 \text{ и } C_{аморт_рек} = 0 . \quad (4)$$

Соответственно полная себестоимость полезной энергии рекуперации равна нулю.

Полезная энергия рекуперации позволяет оборудованию, – тяговому других вагонов и нетяговому своего и других вагонов, а также и стационарному, выполнять часть транспортной работы, приносящей новую стоимость транспортному предприятию. В системах с РКСУ, где весь подвижной состав не имеет тяговых частотных преобразователей, величина $E_{рек_полезн}$ равна нулю, следовательно, всё энергопотребление на выполнение транспортной работы, кроме обеспечения электрической нагрузки при торможении за счёт бортовых тормозных резисторов, осуществляется от первичных энергоисточников – тяговых подстанций (ТП). То есть весь указанный объём потребляемой на эту работу энергии является оплачиваемым энергопоставщику. А при наличии в СТЭ хотя бы одного вагона с ТрСУ появляется вторичный источник энергии – рекуперированные тяговые приводы, выдающие полезную часть рекуперации на выполняющую транспортную работу нагрузку других вагонов, стационарной инфраструктуры и своей нетяговой бортовой нагрузки. Благодаря этому в соответствии с (2) на аналогичный объём энергии снижается объём энергопотребления от первичного оплачиваемого энергоисточника. На предприятиях, на которых на смену вагонам с РКСУ приходят вагоны с ТрСУ, отмечают снижение потребления энергии от подстанций на 10–20 % и более. В ходе проведения длительных измерений энергопотребления СТЭ небольшой трамвайной системы с двумя десятками трамваев на линии нами было установлено, что в общем объёме энергопотребления в СТЭ на долю пяти ТП приходилось в 2021 г. 85 % энергии, а от рекуперированных вагонов выход полезной энергии в КС составил 15 % [6] или, в абсолютном выражении, 1,674 млн кВт·ч.

Физическим условием возможности замещения полезной рекуперативной энергией той, которая поступает в КС от тяговой подстанции, состоит в том, что напряжение от рекуперированных тяговых приводов выше, чем напряжение, формируемое тяговой подстанцией в точках присоединения нагрузки к КС.

Некоторые исследователи [5] ошибочно полагают, что избыточная энергия рекуперации ($E_{рек_избыт}$), утилизируемая тормозными бортовыми резисторами, не участвует в выполнении полезной транспортной работы. Однако это не так, поскольку потребление энергии тормозными резисторами обеспечивает процесс превращения механической энергии в электрическую с последующей утилизацией этой последней в виде рассеиваемого в атмосфере тепла и, следовательно, уменьшает механическую энергию вагона за счёт снижения скорости движения, что позволяет проводить штатное торможение вагонов перед остановками, обеспечивая нормальный режим движения в условиях отсутствия в КС достаточной потребляющей мощности для приёма по КС полезной части энергии рекуперации. Если не отправлять избыточную часть рекуперации на бортовые резисторы, то реализация электродинамического торможения была бы невозможной (электрической энергии рекуперации некуда деваться и в КС резко бы выросло напряжение, что негативно сказывается на электрооборудовании всех подключённых к ней электропотребляющих устройств) и вагоны с ТрСУ потребовали бы в таком случае применения пневматических тормозов для торможения.

Выдача полезной части рекуперации в КС при наличии там достаточной по мощности для приёма этой энергии нагрузки выполняет в ходе торможения вагона ту же самую функцию, что и бортовые тормозные резисторы – расход превращённой в электричество кинетической энергии линейного движения. То есть $E_{рек_полезн}$ выполняет две функции: снижения кинетической энергии линейного движения вагона путём превращения кинетической энергии в электрическую и электропитания в сети превращённой формой этой энергии другого оборудования для выполнения им полезной транспортной работы. А избыточная часть $E_{рек_избыт}$ выполняет лишь одну из перечисленных функций – только снижения кинетической энергии линейного движения вагона.

Отрицательная стоимость полезной рекуперации

Стоимость электроэнергии, поставляемой энергопоставщиком, определяется тарифорегулирующими государственными органами и включает следующие составляющие: фонды оплаты труда, износ

оборудования электростанций, первичное топливо, износ сетевого хозяйства, услуги системного оператора и других субъектов рынка электроэнергии, инвестиционную составляющую на модернизацию и развитие энергосистемы, прибыль, налоги и т.д.

Снижение механической энергии линейного движения вагона с РКСУ при торможении электродинамическим способом с утилизацией избыточной рекуперации на бортовых тормозных резисторах вызывает известный износ системы тяги, что, наряду с износом в ходе тяги и выбега, вызывает известные амортизационные затраты транспортного предприятия на обновление этой категории основных средств – тягового привода. Появление возможности выдачи рекуперированной энергии в КС при внедрении ТрСУ, как было показано в (3), не вызывает дополнительного износа системы тяги, поскольку единственный новый активный при рекуперации элемент управления тягой (тормозной прерыватель) в период выдачи рекуперативной энергии в КС – не работает. Все остальные подсистемы тяговой системы работают в том же функционале, как они и работали без возможности выдачи энергии в КС, кроме тормозного резистора. Если в системах с РКСУ бортовой тормозной резистор всегда принимал энергию при рекуперативном торможении, то при выдаче рекуперации в сеть он не подключается к цепи и, соответственно, не изнашивается.

Аналогичное воздействие энергия полезной рекуперации оказывает и на элементы контактно-кабельной сети. Так, при питании только от ТП энергия проходит путь до сетевой нагрузки через фидерный кабель и через контактный провод на участке секции от ввода фидерного кабеля до точки питания нагрузки (рис. 1). При питании этой нагрузки полезной частью рекуперации происходит следующее. Если нагрузка находится на секции КС, на которой рекуперативно тормозит вагон, то эта энергия потребляется только внутри данного изолированного участка (внутрифидерные перетоки рекуперации) и в фидерный кабель не попадает, т.е. в этом случае износа фидерного кабеля не происходит. Если же часть нагрузки находится на другом изолированном участке данной ТП, то путь энергии будет следующим: с контактного провода своего участка на свой фидерный кабель, до сборной шины ТП и оттуда по другому фидерному кабелю до контактного провода той секции, где имеется потребляющая нагрузка и далее – до точки присоединения этой нагрузки. Таким образом, в этой конфигурации энергия проходит большее расстояние, чем при питании от ТП. В ходе вышеупомянутых исследований СТЭ в трамвайной системе, доля внутрифидерного потребления рекуперации составила за полный 2021 г. 64,3 % от всего объема полезной рекуперации, тогда как на межфидерные перетоки полезной рекуперации пришлось чуть более трети – 35,7 %. Это соотношение показывает, что объемы перетоков энергии по фидерным кабелям на объеме полезной рекуперации как минимум на треть ниже, чем при питании сетевой нагрузки таким же объемом энергии от тяговой подстанции. Из него следует прямой вывод – полезная сетевая рекуперация резко уменьшает расход ресурса фидерных кабелей и снижает транспортные потери энергии в сети.

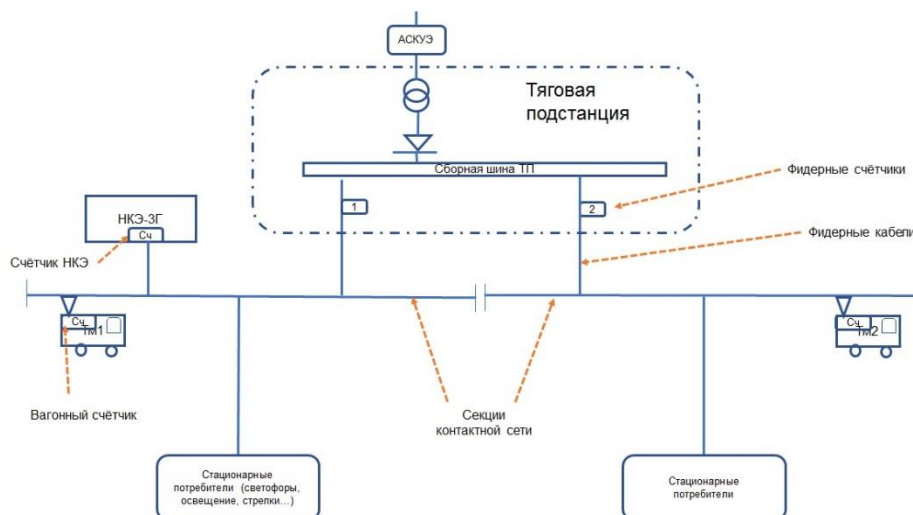


Рис. 1. Схематическое изображение схемы питания изолированных секций контактной сети

Влияние накопителей рекуперативной энергии на снижение расходов на электроснабжение

На сегодняшний день применение накопителей избыточной рекуперации в городском электро-транспорте рассматривается как одна из наиболее результативных возможностей по снижению затрат

на энергию. Имеются только две схемы применения накопителей в СТЭ – установка их или на борту каждого вагона, или стационарно в контактной сети тяговых подстанций по одному накопителю на питаемую сеть. Как известно, количество работающих на линиях единиц подвижного состава превышает в предприятиях ГЭТ количество тяговых подстанций в 7–10 раз. При этом характеристики единичных накопителей для бортового и для стационарного применения, их комплектация и, соответственно, стоимость, практически не различаются. Это означает, что капитальные затраты при использовании бортовых накопителей, в сравнении со стационарными, практически на порядок выше. При этом и в первом случае, и во втором, общий объём энергии рекуперации задаётся только выполняемым подвижным составом объёмом транспортной работы, который остаётся неизменным и от наличия или отсутствия накопителей практически не зависит. Обои типами накопителей вся избыточная энергия рекуперации вовлекается в оборот, однако, с разными итогами этого вовлечения.

Эффективность применения бортовых накопителей энергии

Особенностью использования бортовых накопителей энергии (БНЭ) является изменение силовой электрической цепи вагона, при котором в накопитель направляется как избыточная рекуперация вагонов, так и потенциально полезные сетевые перетоки рекуперации. Вся энергия рекуперации тяговых приводов поступает на вход бортового накопителя. При этом практически все используемые накопители энергии (и бортовые, и стационарные, причём обоих применимых в ГЭТ по ресурсу циклирования технологических типов накопительных элементов – суперконденсаторных и маховичных) имеют одинаковый действительный КПД преобразований энергии – около 0,64 [7, 8]. Такая стадия (действительная) расчёта КПД принимает во внимание только потери энергии рекуперации при силовых преобразованиях на инверторных преобразователях и в накопительных элементах при её приёме и выдаче, а также утечки энергии при хранении. При поступлении на вход бортового накопителя в день, например, 200 кВт·ч энергии рекуперации обратно на клеммы тягового привода вернётся только 128 кВт·ч, остальное теряется при пяти этапах преобразований в ходе зарядки, хранения и выдачи энергии. Помимо потерь в силовом контуре бортовой накопитель дополнительно потребляет из сети энергию от оплачиваемого первичного энергоисточника – тяговых подстанций. Эта энергия расходуется на:

- собственные нужды системы управления и для кондиционирования накопительных элементов и системы управления,
- перевозку самого накопителя массой до 2 т (масса бортового накопителя формируется в зависимости от параметров самого вагона),
- компенсацию минимального уровня заряда суперконденсаторов на участках выбега после того, как рабочий объём запасённой ранее энергии рекуперации уже выдан на тяговый привод в ходе разгона вагона.

Показатель КПД накопителя энергии, в котором учитываются все перечисленные потери рекуперации и дополнительное потребление оплачиваемой энергии на обеспечение его работы, называется «фактическим КПД» и для бортового устройства имеет величину до 59,4 % [8]. Это означает, что работа бортового накопителя позволяет возвращать на полезную транспортную работу чуть более половины от энергии рекуперации вагона. При этом, как мы выше увидели, в системах ГЭТ без всяких накопителей (т.е. без капитальных затрат на их установку и эксплуатационных затрат на их обслуживание) по межпоездным перетокам полезной рекуперации через контактную сеть перенаправляется на сетевую нагрузку более 68 % от всей энергии рекуперации. И лишь менее трети приходится на избыточную рекуперацию, т.е. рассеивается теплом в атмосферу. Другими словами, применение бортовых накопителей энергии не улучшает энергоэффективность транспортной работы в сравнении с вариантом без применения накопителей, а ухудшает, и причиной тому служит неустранимый недостаток его размещения – нахождение на борту транспортного средства, приводящее к перечисленным изменениям силовой цепи и появлению необходимости дополнительных затрат энергии на обеспечение их работы и перевозку.

Кроме того, бортовое размещение накопителей приводит, за счёт необходимости постоянной перевозки их, к дополнительному износу тягового привода, поскольку он вынужден перевозить дополнительную массу к таре вагона, т.е. прилагать увеличенные моменты при тяге. Помимо этого, интенсифицируется у трамваев с такими накопителями износ колёс и механически связанных с ними рельсовых путей, а у троллейбусов аналогично ускоряется износ шин и асфальтового покрытия дорог. То есть увеличиваются амортизационные затраты транспортного предприятия пропорционально увеличению массы тары вагона.

Эффективность применения стационарных накопителей энергии

В отличие от бортовых стационарных накопителей энергии (СНЭ) никак не изменяют внутренние силовые цепи вагонов, а также не приводят к повышению их энергопотребления на тягу и нетяговые нужды. Также стационарный накопитель не изменяет объёмы перетоков полезной рекуперации по КС на наличную сетевую транспортную нагрузку достаточной мощности. Сетевые перетоки более эффективны, чем опосредствование перетоков рекуперации накопителем, – КПД передачи энергии по контактными проводам составляет 93 % [9], в силу чего при сетевых перетоках потери при равном объёме рекуперации в 5 раз ниже, чем при опосредствовании этого объёма накопителем, у которого действительный КПД не превышает 68,4 %. Таким образом, для предприятия электротранспорта наилучшим является такая стратегия задействования избыточной части энергии рекуперации на полезную работу, которая позволяет минимизировать опосредствование этой энергии накопителем. Единственным способом реализации этой стратегии является стационарное применение накопителей, поскольку при применении бортовых накопителей опосредствуется вся энергия рекуперации – и полезная, и избыточная её части, что соответствующим образом увеличивает объём потерь рекуперации. При использовании стационарного накопительного агрегата полезная часть рекуперации им не затрагивается, а избыточная часть опосредствуется накопителем лишь частично, поскольку другая часть избытка потребляется непосредственно сетевой нагрузкой в период зарядки накопителя, не поступая в него (эффект КБК) [6].

Суть этого эффекта состоит в том, что при отсутствии в КС достаточной по мощности полезной транспортной нагрузки стационарный накопитель включается на приём этой энергии, которая направляется от рекуперировавшего вагона по КС в сторону накопителя. В ходе зарядки накопителя этой перенаправленной избыточной энергией рекуперации также питается имеющаяся в сети малая по мощности нагрузка, главным образом – нетяговая бортовая и стационарная. Этот эффект питания сетевой нетяговой нагрузки в ходе зарядки стационарного накопителя получил название «эффект КБК».

Бортовой накопитель не может реализовать этот эффект в силу особенностей электрической силовой цепи такого типа применения. Вся энергия рекуперации в этом случае перетекает по кратчайшей цепи между тяговым приводом и бортовым накопителем и не имеет возможности питать ни чужую нагрузку в КС, ни нетяговую нагрузку своего вагона.

Соотношение долей перенаправленной избыточной рекуперации, которой питается нетяговая нагрузка при зарядке перенаправленной избыточной рекуперацией стационарного накопителя, и поступившей на вход стационарного накопителя, составляет по году примерно 1:1, хотя доли полезной и избыточной рекуперации сильно отличаются по сезонам [10]. Таким образом, потери по действительному КПД в стационарном накопителе распространяются только на ту часть энергии рекуперации, которая поступила на клеммы этого устройства ($E_{заряд}^{СНЭ}$) и которая составляет лишь порядка 18 % от общего объёма энергии рекуперации вагона. То есть выдаваемая накопителем энергия избыточной рекуперации после всех затрат и потерь в накопителе ($E_{выдачи}^{СНЭ}$) составляет $\sim 10\%$ от общего объёма энергии рекуперации подвижного состава. С учётом того, что остальная часть энергии рекуперации поступает на повторное полезное использование как без участия накопителя (полезная рекуперация – 68 % от всей рекуперации), так и непосредственно в ходе зарядки накопителя (энергия, потреблённая сетевой нагрузкой при реализации эффекта КБК ($E_{КБК}$) составляет порядка 18 % от общего объёма рекуперации), итоговый объём возвращаемой в КС на полезную транспортную работу при функционировании стационарного накопителя составляет от полного объёма энергии рекуперации ЭПС более 90 %:

$$E_{рек_полезн} + E_{КБК} + E_{выдачи}^{СНЭ} = \sim 0,911 * E_{рек} \quad (5).$$

Более высокий фактический КПД стационарного накопителя получается в силу того, что:

– ему не требуются затраты энергии на их каждодневную перевозку на борту транспортного средства,

– потребление оплачиваемой энергии от первичных энергоисточников (ТП) на собственные нужды (такие же, как и у бортовых накопителей – управление, кондиционирование и поддержка минимального рабочего уровня заряда) гораздо меньше в силу того, что большая часть энергии на эти нужды поступает из бесплатного источника – от рекуперировавших вагонов – в периоды зарядки накопителя и выдачи ранее запасённой рекуперированной энергии. А оплачиваемая энергия от ТП потребляется только в периоды выбега накопителя – то есть в периоды ожидания события зарядки или выдачи энергии. По году периоды выбега стационарного накопителя не превышают 23 % от времени работы его в

сети, т.е. его коэффициент загрузки оборудования достигает 77 %. Для сравнения, число циклов работы бортового накопителя в сутки равно количеству торможений этого вагона и не превышает за 18 часов работы 400 раз – по количеству торможений своего подвижного состава. Между тем, число циклов заряда-разряда стационарных накопителей за рабочий день может достигать на средненагруженных ТП 4000 раз и более [10, 11], т.е. на порядок больше. Это сравнение показывает, что бортовой накопитель не только перевозится всё время работы вагона как дополнительный балластный груз, но и большую часть времени работы вагона сам не работает, т.е. имеет низкий коэффициент загрузки, не превышающий 10 %. В табл. 1 приведены показатели полезного использования энергии рекуперации в четырёх типах СТЭ: с вагонами РКСУ без полезной рекуперации, с системами ТрСУ с возможностью выдавать часть рекуперации в КС, с бортовыми накопителями, со стационарными накопителями.

Таблица 1

Полезное использование энергии рекуперации с учётом избыточной части рекуперации, потерь и дополнительного потребления из КС, % от полной рекуперации $E_{рек}$

	Полезная рекуперация $E_{рек_полезн}$	Избыточная рекуперация $E_{рек_избыт}$	Выдача ЭЭ накопителем на нагрузку $E_{НЭ_выдачи}$	Эффект КБК $E_{КБК}$	Энергозатраты на перевозку НЭ	Энергозатраты собственных нужд НЭ	Компенсация поддержки минимального заряда	Итого, возврат энергии, % от $E_{рек}$
РКСУ	0	100	0	0	0	0	0	0
ТрСУ	64	36	0	0	0	0	0	64
Бортовые, БНЭ	0	0	68,4	0	2,7	5,4	8,1	52,2
Стационарные, СНЭ	64	0	10	18	0	4,6	4,3	91,1

Влияние накопителей энергии на потребление оплачиваемой электроэнергии от ТП

Установка накопителей энергии на борту подвижного состава вызывает следующие изменения в потреблении энергии от оплачиваемых первичных источников – тяговых подстанций:

- увеличение потребления энергии на тягу ПС из-за увеличения массы тары вагонов, т.к. БНЭ подходящей мощности и энергоёмкости для троллейбусов и трамваев имеет полную массу, включая накопительные элементы, силовой преобразователь, блок управления, систему охлаждения, оснастку, крепёж, дополнительную электропроводку, – порядка 1,5–2 т (в зависимости от массы вагона). Увеличение – это может достигать 7 % от тягового энергопотребления аналогичного вагона без БНЭ;

- снижение энергопотребления на тягу благодаря перенаправлению полезной и избыточной энергии рекуперации на тягу своего привода;

- увеличение тягового энергопотребления из-за низкого действительного КПД БНЭ (68,4 %) в сравнении с фактическим КПД передачи энергии рекуперации по КС (93 %);

- запрет межпоездных перетоков полезной рекуперации бортовыми накопителями лишает другие вагоны получения энергии рекуперации от тормозящих единиц ПС;

- увеличение нетягового энергопотребления самого рекуперирующего вагона в силу того, что энергия рекуперации не выходит за контур цепи «тяговый привод – бортовой накопитель», т.е. не питает бесплатной энергией нетяговую нагрузку своего вагона;

- увеличение нетягового энергопотребления самого рекуперирующего вагона в силу того, что энергия для обеспечения собственных нужд БНЭ (системы управления и охлаждения, компенсация разряда суперконденсаторов) необходимо потребление энергии, а она доступна только из КС от первичного оплачиваемого энергоисточника;

- увеличение нетягового энергопотребления других вагонов в КС в силу того, что энергия рекуперации тормозящего вагона не выходит в КС по межпоездным перетокам рекуперации за контур его участка цепи «тяговый привод – бортовой накопитель»;

- увеличение нетягового энергопотребления стационарной нагрузки в КС в силу того, что энергия рекуперации тормозящего вагона не выходит в КС по межпоездным перетокам рекуперации за контур его участка цепи «тяговый привод – бортовой накопитель».

Сведение полного баланса энергии источников и нагрузки в СТЭ ГЭТ с бортовыми накопителями показывает, что применение БНЭ, в сравнении с системами без накопителей энергии, приводит к увеличению потребления энергии от оплачиваемых первичных энергоисточников на 4,5 % [12]. Т.е.

при таком способе вовлечения в оборот всей энергии рекуперации увеличивается статья расходов предприятия на потребление электроэнергии.

Установка *стационарных* накопителей энергии в КС тяговых подстанций вызывает следующие изменения в потреблении энергии от оплачиваемых первичных источников – тяговых подстанций:

- снижение потребления оплачиваемой энергии от ТП на тягу ПС в силу сохранения межпоездных перетоков рекуперативной энергии по КС и вовлечения в полезный оборот избыточной рекуперации. Перенаправленная при функционировании стационарного НЭ на полезную работу избыточная рекуперация потребляется по двум каналам: при зарядке в силу действия «эффекта КБК» и при выдаче в сеть ранее запасённой им части энергии избыточной рекуперации вагонов. Суммарно использование рекуперативной энергии при применении СНЭ увеличивается до 91,1 %. При этом, поскольку установка стационарных накопителей не изменяет массы тары вагонов, общий объём перевозочной работы подвижного состава не изменяется;

- увеличение нетягового энергопотребления СТЭ за счёт потребления на собственные нужды самого СНЭ (система управления и вентиляции, поддержка минимального рабочего уровня зарядки накопительного элемента). При этом оплачиваемое энергопотребление на собственные нужды СНЭ существенно ниже, чем у БНЭ, поскольку значительная часть этого потребления осуществляется от потоков перенаправленной энергии избыточной рекуперации тормозящих вагонов как в ходе зарядки, так и разрядки стационарных накопителей. Время циркулирования рекуперации через СНЭ, которой также питается и нагрузка собственных нужд его, достигает 77 % от времени его работы, а у БНЭ нагрузка собственных нужд питается только оплачиваемой энергией от ТП;

- объём выполняемой работы нетягового оборудования всех вагонов в КС, а также стационарных сетевых устройств не изменяется. Но на эту работу потребляется меньший объём оплачиваемой энергии от тяговых подстанций, поскольку она частично замещается вовлечённой в оборот благодаря СНЭ избыточной части энергии рекуперации вагонов.

Сведение полного баланса энергии источников и нагрузки в системах ГЭТ со стационарными накопителями показывает, что применение СНЭ приводит к снижению потребления энергии от оплачиваемых первичных энергоисточников на 20 % [12]. То есть при таком способе вовлечения в оборот всей энергии рекуперации значение статьи расходов предприятия на потребление электроэнергии значительно уменьшается. Кроме того, СНЭ не приводят к дополнительному износу ни тягового оборудования ПС, ни нетягового бортового и стационарного транспортного оборудования.

Дополнительные эффекты при использовании накопителей энергии

Для получения на клеммах сетевой полезной нагрузки 1 кВт·ч энергии ($E_{нагр}$) по КС от тяговой подстанции требуется учесть потери энергии, получаемые при транспортировке её по КС и фидерным кабелям, а также при преобразовании трёхфазной высоковольтной энергии напряжением 10 кВ на ТП в энергию постоянного тока номинальным напряжением 600 В. Потери энергии в КС составляют ~7 % от объёма передаваемой энергии [9]. Потери при преобразованиях на ТП составляют до 10 % от выдаваемой в КС выпрямленной энергии. Таким образом, если на клеммы сетевой нагрузки поступает 1 кВтч в виде постоянного тока, то на вход тяговой подстанции должно поступить из трёхфазной сети высокого напряжения, учтённой счётчиком АСКУЭ энергопоставщика ($E_{АСКУЭ}$):

$$E_{АСКУЭ} = \frac{E_{нагр}}{\eta_{КС} * \eta_{ТП}} = \frac{E_{нагр}}{0,93 * 0,9} = 1,195 * E_{нагр}, \quad (6)$$

где $\eta_{КС}$ и $\eta_{ТП}$ – КПД, соответственно, передачи энергии по контактной сети и преобразования энергии на тяговой подстанции, а $E_{нагр}$ – поступившая на клеммы полезной сетевой нагрузки электроэнергия.

Использование бесплатной энергии рекуперации на повторное выполнение транспортной работы замещает оплачиваемое потребление энергии от первичного энергоисточника. Транспортные системы, в которых подвижной состав оснащён системами ТрСУ и *отсутствуют накопители* обоих типов, имеют экономию оплачиваемой энергии от первичного источника только от полезных перетоков энергии рекуперации по КС на синхронную достаточную нагрузку. Поскольку при этом потери энергии на передачу её по КС заложены в данные отпускного счётчика постоянного тока, размещённого на клеммах тягового привода, то, исходя из данных в табл. 1, формула (6) для случая отсутствия накопителей любого типа принимает вид

$$E_{АСКУЭ_экон}^{ТрСУ} = \frac{E_{рек_полезн}}{\eta_{ТП}} = \frac{E_{рек_полезн}}{0,9} = 1,111 * E_{рек_полезн} = 1,111 * (0,64 * E_{рек}) = 0,711 * E_{рек}. \quad (7 а)$$

Для расчёта объёмов экономии оплачиваемой энергии первичного энергоисточника при работе *бортового накопителя* следует учитывать, что выдаваемая БНЭ энергия на тяговый привод своего вагона в КС не выходит, то есть эти потери здесь отсутствуют. Для учёта скомпенсированных БНЭ сетевых и подстанционных потерь необходимо привести значение получаемой на клеммы своего тягового привода энергии выдаваемой накопителем ранее запасённой рекуперации к значению подаваемой в КС на эти цели от трёхфазной высоковольтной сети энергии (к точке учёта АСКУЭ). То есть для определения полного значения замещённой бортовым накопителем оплачиваемой энергии от энергопоставщика ($E_{АСКУЭ-экон}^{БНЭ}$) следует умножить полученное потребителем значение выдаваемой рекуперированной энергии по постоянному току в точке приёма энергии тяговым приводом вагона на полученный в (6) коэффициент потерь, равный 1,195, поскольку при работе БНЭ энергия рекуперации в КС не выходит, а с учётом данных из табл. 1:

$$E_{АСКУЭ-экон}^{БНЭ} = \frac{E_{рек_нагр}^{БНЭ}}{\eta_{КС} * \eta_{ТП}} = 1,195 * E_{рек_нагр}^{БНЭ} = 1,195 * E_{выдачи}^{БНЭ} = 1,195 * (0,522 * E_{рек}) = 0,624 * E_{рек}. \quad (7 б)$$

Из (7 б) видно, что для бортового накопителя отсутствуют как полезные перетоки энергии рекуперации по КС, так и перетоки от «эффекта КБК», а вся рекуперация с тягового привода опосредствуется бортовым накопителем и выдаётся (с учётом всех потерь и дополнительного оплачиваемого потребления) обратно на этот же привод, но работающий уже в режиме тяги.

Потоки полезной рекуперации и перенаправленная *стационарным накопителем* избыточная рекуперация передаются на нагрузку по КС, т.е. потери в КС в неё уже заложены. В силу этого для приведения энергии рекуперации к высоковольтной трёхфазной сети (точке учёта АСКУЭ) в таких конфигурациях СТЭ с СНЭ необходимо учесть только потери при преобразованиях на тяговой подстанции и формула (6) принимает вид, с учётом данных по СНЭ из табл. 1:

$$E_{АСКУЭ-экон}^{СНЭ} = \frac{E_{рек_нагр}^{СНЭ}}{\eta_{ТП}} = \frac{E_{рек_полезн} + E_{КБК} + E_{выдачи}^{СНЭ}}{\eta_{ТП}} = 1,111 * (0,911 * E_{рек}) = 1,011 * E_{рек}. \quad (8)$$

Увеличение применения бесплатной рекуперативной энергии за счёт перенаправления в КС стационарным накопителем избытка на выполнение полезной транспортной работы приводит к снижению потребления оплачиваемой энергии от первичных оплачиваемых энергоисточников на величину перенаправленного избытка при зарядке и выдаче энергии накопителя с учётом КПД ТП.

Таким образом, работа бортовых накопителей энергии экономит оплачиваемую энергию от ТП меньше, чем система энергоснабжения транспортной работы на предприятиях ГЭТ без накопителей энергии в силу существенно больших потерь при преобразованиях, перевозке и увеличения потребления оплачиваемой энергии на собственные нужды и компенсацию утечек в таком накопителе. Применение стационарных накопителей энергии обеспечивает увеличение использования энергии рекуперации в сравнении с бортовыми накопителями более чем в полтора раза и превышает использование рекуперации в системах без накопителей на 42 %.

Стоимость задействования энергии рекуперации на период до 2029 г.

На среднесрочную перспективу уровень тарифов на электроэнергию будет стабильно расти, причём достаточно высокими темпами. Так, в компании «Лукойл» составили долгосрочный прогноз тарифов на электроэнергию на период с 2024 по 2029 гг., который опирается на прогнозы цен на газ и уголь, планы ввода в эксплуатацию новых энергогенерирующих мощностей и на прогнозы социально-экономического развития Российской Федерации и сценарные условия функционирования экономики [13]. Графики на рис. 2 показывают практически однозначную корреляцию динамики цен на газ и на электроэнергию на рынке электроэнергии на сутки вперёд (РСВ) в первой ценовой зоне (европейская часть страны). Такая же высокая корреляция имеется в тарифах на электроэнергию на РСВ с ценами на уголь в объединённой энергосистеме Сибири.

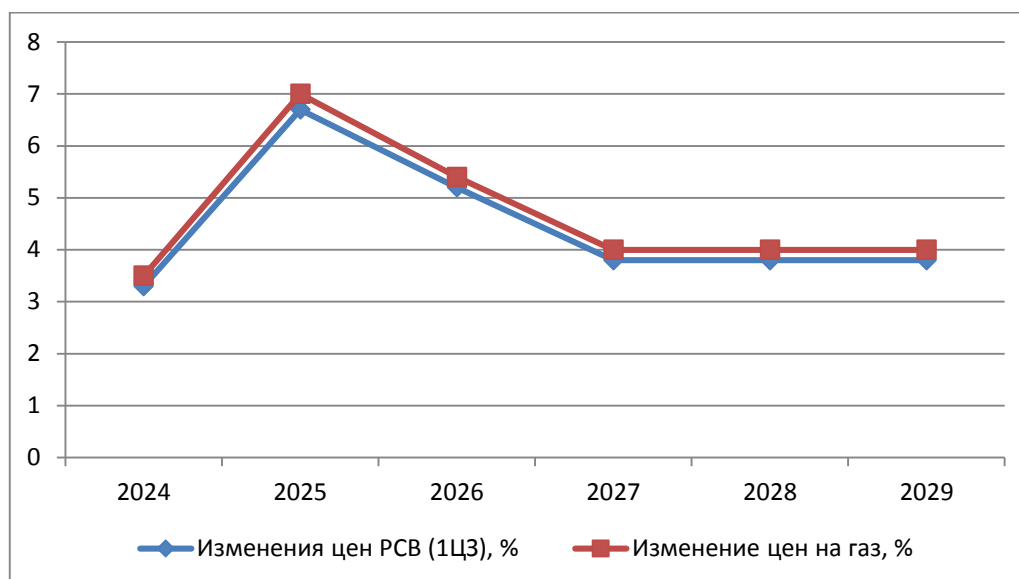


Рис. 2. Динамика изменения цен РСВ и цен на топливо в 2024–2029 гг. (первая ценовая зона)

Рассмотрим, как будут изменяться в этот период затраты предприятия электротранспорта в Северо-Западном федеральном округе, которое упоминалось выше (4 маршрута, 5 тяговых подстанций, 20 единиц ЭПС на линии). Транспортная работа предприятия является устойчивой, как и пассажиропоток, и изменений пробега вагонов не ожидается. Соответственно, устойчивым (в пределах годовых колебаний погодных условий) будет энергопотребление на тягу и нетяговые нужды подвижного состава и стационарной инфраструктуры, в том числе от первичного оплачиваемого энергоисточника (тяговой подстанции) и от полезных перетоков бесплатной энергии рекуперации от вторичных энергоисточников (рекуперированных вагонов). На 2022 г. полное годовое потребление системы, приведённое к точке учёта электроэнергии по высоковольтной трёхфазной стороне ($E_{ACKVЭ}$) составляет 12,32 млн кВт·ч, из которых на оплачиваемую энергию от энергопоставщика приходится 10,74 млн кВт·ч, а на полезные перетоки рекуперативной энергии приходится 1,58 млн кВт·ч. При этом приведённый полный потенциал экономии энергии за счёт оставшейся повторно неиспользованной избыточной энергии рекуперации составляет порядка 1,59 млн кВт·ч.

Как видно из предыдущего изложения, максимально снизить оплачиваемое потребление из сети можно только путём вовлечения на повторную работу этой избыточной части энергии рекуперации, что возможно только за счёт применения буферных накопителей энергии – стационарных или бортовых. При этом использование бортовых накопителей снизит до нуля полезные перетоки рекуперации по контактной сети, а весь суммарный объём рекуперации будет опосредствован работой этих устройств. В этой работе будет потеряно 36 % всей рекуперированной вагоном энергии и, кроме того, будет дополнительно потреблено от оплачиваемого первичного энергоисточника порядка 0,3329 от потреблённой на тягу составов с бортовыми накопителями электроэнергии. Суммарно годовой объём оплачиваемой энергии в этом случае в сравнении с имеющимся базовым вариантом увеличится на 2,51 млн кВт·ч.

Применение стационарных накопителей сохраняет все полезные перетоки рекуперации, незначительно увеличит потребление энергии сети на свои нетяговые нужды (на 0,006 от потреблённой электроэнергии на тягу составов без накопителей) и позволяет перенаправить на повторное использование (с учётом КПД стационарного накопителя) 1,35 млн кВт·ч избыточной рекуперации (за счёт эффекта КБК и выдачи в КС части накопленной в агрегат избыточной рекуперации), которая заместит аналогичный объём оплачиваемой энергии от тяговой подстанции.

На 2022–2023 гг. среднегодовой котловой тариф на электроэнергию, покупаемой рассматриваемой организацией ГЭТ, составлял порядка 8 руб. за 1 кВт·ч. Его изменение на период 2024–2029 гг. примем на основе прогноза компании «Лукойл» (рис. 2), в котором указаны проценты изменения тарифов год к году. В итоге в системе без любых накопителей энергии за 6 лет суммарный объём затрат на закупку оплачиваемой электроэнергии составит 605,37 млн рублей.

При установке бортовых накопителей энергии, как было указано, ежегодное потребление оплачиваемой электроэнергии вырастет в сравнении с базовым текущим вариантом перетоков только полезной части рекуперации по КС на 2,51 млн кВт·ч, а суммарные затраты на закупку электроэнергии за период с 2024 по 2029 г. составят 746,83 млн рублей.

При работе стационарных накопителей на участках питания тяговых подстанций потребление оплачиваемой электроэнергии снизится, в сравнении с базовым текущим вариантом перетоков только полезной части рекуперации по КС, на 1,35 млн кВт·ч в год, а суммарные затраты на закупку электроэнергии за период с 2024 по 2029 г. составят 529,26 млн рублей. Изменения ежегодной оплаты за электроэнергию от первичных энергоисточников при одинаковой работе по пассажироперевозкам рассматриваемого предприятия ГЭТ при реализации трёх вариантов обращения с рекуперированной энергией представлены в табл. 2.

Таблица 2

Прогноз затрат на оплачиваемую часть энергии в СТЭ ГЭТ при разных вариантах обращения с рекуперацией на период 2024–2029 гг., млн рублей

	2024 г.	2025 г.	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.
Оплата за энергию в СТЭ без накопителей	88,77	94,72	99,65	103,43	107,36	111,44
Оплата за энергию в СТЭ с БНЭ	109,52	116,85	122,93	127,6	132,45	137,48
Оплата за энергию в СТЭ с СНЭ	77,61	82,81	87,12	90,43	93,86	97,43

Приведённые расчёты показывают, что при полной оснащённости электроподвижного состава рассматриваемой трамвайной системы тяговыми приводами доля приведённой полезно использованной рекуперации (межпоездной обмен полезной части рекуперированной энергии) составляет порядка 12,83 % от суммарного приведённого энергопотребления системы. Затраты на закупку оплачиваемой части потребляемой энергии за 6 лет для такой системы, исходя из прогнозных объёмов потребления и котловых тарифов, будут на 145 млн рублей меньше, чем при использовании бортовых накопителей энергии. Использование стационарных накопителей энергии позволит сэкономить в сравнении с вариантом без накопителей – 76,12 млн рублей. В сравнении с вариантом использования бортовых накопителей экономия, приносимая стационарными накопителями, составит 217,57 млн рублей.

Приведённые прогнозы показывают, что единственным способом снижения затрат на энергию в такой системе будет установка стационарных накопителей энергии на участки питания тяговых подстанций. Аналогичный вывод был сделан отечественными исследователями о неприменимости бортовых накопителей на грузовых локомотивах в железнодорожной системе [16].

Перспективы обращения сертификатов на возобновляемую электроэнергию электротранспорта

Возможность использования для осуществления транспортной работы до 25 % энергии из возобновляемых источников позволяет рассматривать как реальную возможность получения городским электротранспортом на этот объём энергии рекуперации сертификатов «зелёной энергии» I-REC (международных сертификатов на возобновляемую энергию International Renewable Energy Certificate). Реализация данных зелёных сертификатов возможна, например, на Европейской энергетической бирже (EEX), бирже Nord Pool и американской PJM Interconnection и позволит покупателям сертификатов возобновляемой в электротранспорте энергии компенсировать воздействие собственного бизнеса на окружающую среду. В России уже положено начало обороту зелёных сертификатов происхождения энергии [14]. Для самого предприятия ГЭТ этот финансовый инструмент позволит привлечь дополнительные средства в развитие эффективности полезного освоения рекуперации, в том числе в модернизацию подвижного состава с целью замены вагонов с РКСУ на аналогичные с ТрСУ, позволяющие выдавать рекуперированную энергию на потребление другой нагрузкой в контактной сети, и в применение передовых технологий накопителей энергии, которые позволяют переводить в полезную рекуперацию и ту часть, которая называется избыточной, т.е. полностью использовать рекуперацию на повторное применение для выполнения транспортной работы.

Одним из препятствий в нынешнем законодательном поле для реализации электротранспортными предприятиями сертификатов «зелёной» электроэнергии I-REC служит барьер необходимости

квалификации генерирующего оборудования предприятия ГЭТ согласно Постановлению Правительства РФ от 3 июня 2008 года, N 426 [15]. Однако имеются варианты выхода из этого положения. Например, генерирующие компании, которые уже имеют квалификацию части своего оборудования как отвечающего этому требованию, могут за известную плату с дисконтом приобретать право замещения аналогичной доли своей энергией, не подпадающей под квалификацию «зелёной», на эту возобновляемую энергию полезной рекуперации предприятия горэлектротранспорта. На этот объём энергии генерирующая компания сможет получить сертификат I-REC и реализовать его заинтересованному покупателю. Учёт возобновляемой электроэнергии рекуперации будет производиться сертифицированными счётчиками, регистрирующими выдачу тяговыми приводами энергии в контактную сеть. Такими счётчиками оборудован весь подвижной состав, а также фидерные кабели на сборной шине тяговых подстанций. Таким образом, могут быть удовлетворены требования указанного постановления. При этом генерирующие объекты в ГЭТ, – тяговые приводы в импульсном режиме генерации, аналогичны, например, генераторам ветряных электростанций по своему импульсному режиму и типу первичного источника энергии – механической, а также генерирующим объектам на основе переработки отходов производства – по происхождению первичного источника энергии не из природной среды, а из техносферы. Данная возможность требует проработки заинтересованных сторон, которыми являются генерирующие организации на основе ВИЭ, предприятия ГЭТ, управляющие организации российского рынка электроэнергии, государственные органы, регулирующие этот рынок, потребители зелёных сертификатов происхождения энергии. Очевидно, что описанная возможность имеет потенциал принесения экономической пользы как предприятиям горэлектротранспорта, так и генерирующим компаниям с квалифицированными «зелёными» энергоисточниками, а также другим субъектам рынка сертификатов. Кроме того, эта экономическая ниша будет реально способствовать снижению давления на рост тарифов на электроэнергию.

Выводы

Перенаправление энергии рекуперации имеет нулевую себестоимость в силу отсутствия закупки этого энергоресурса у сторонних организаций, а также в силу отсутствия дополнительного износа собственного энергооборудования (тяговых приводов) подвижного состава.

Применение рекуперативной энергии торможения подвижного состава на повторное выполнение полезной транспортной работы в городском электротранспорте снижает потребление оплачиваемой энергии первичных энергоисточников, т.е. снижает затраты предприятия на закупку энергоресурсов.

Для полного перенаправления избыточной рекуперативной энергии на выполнение полезной работы по пассажироперевозкам одним из действенных способов является применение накопителей энергии. При этом применение бортовых накопителей в ГЭТ несёт большие потери рекуперации и, одновременно, значительно увеличивает потребление оплачиваемой энергии от ТП и, тем самым, повышает затраты предприятия на энергоресурсы. Кроме того, бортовые накопители приводят к ускорению износа систем тяги, у трамваев – колёс и рельсовых путей, у троллейбусов – шин и асфальтового покрытия дорог. То есть внедрение бортовых накопителей любого типа на нынешнем уровне накопительной техники экономически убыточно для транспортного предприятия и городского дорожного хозяйства.

Использование стационарных накопителей энергии снижает оплачиваемое энергопотребление и экономически выгодно для предприятия ГЭТ.

Для транспортного предприятия с целью полного перенаправления энергии рекуперации на повторную полезную работу требуется бортовых накопителей в количестве, равном числу единиц подвижного состава, а стационарных накопителей – в 6–10 раз меньше – по количеству тяговых подстанций. При этом стоимости стационарных и бортовых накопителей равны. Высокие капитальные затраты на применение бортовых накопителей, являются вторым экономическим аргументом против их применения на городском электротранспорте.

Для получения объёма замещения оплачиваемой энергии ТП на бесплатную энергию рекуперации требуется, с использованием коэффициентов КПД в КС и на ТП, привести значение измеренных на стороне постоянного тока объёмов последней к значению потребления на высоковольтной стороне ТП в точке присоединения АСКУЭ.

Энергия рекуперации в ГЭТ является возобновляемой, а непосредственным источником её является механическая энергия линейного движения подвижного состава. Увеличению экономического эффекта от повторного использования рекуперации на выполнение транспортной работы может способствовать организация оборота сертификатов «зелёной энергии» I-REC на этот тип возобновляемой энергии.

Список литературы

- 1 **Зубакин, В. А.** Анализ рисков дисбаланса структуры генерации и потребления электроэнергии при развитии Единой энергосистемы России / В. А. Зубакин // Российские естественные монополии : системные проблемы и решения: сборник статей. – Вып.1. – Москва : ИПЕМ, 2006. – 120 с.
- 2 **Сулим, А. А.** Расчет электроэнергии рекуперации электрифицированного городского транспорта при установке накопителя на тяговой подстанции / А. А. Сулим // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2014. – Вып. 4. – Ч. 4. – С. 30–41. – ISSN 1029-7448.
- 3 **Bartłomiejczyk, M.** Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery / M. Bartłomiejczyk, M. Połom // Energy Conversion and Management. – 2016. – Vol. 127. – P. 35–42. – DOI 10.1016/j.enconman.2016.08.089.
- 4 Energy recovery effectiveness in trolleybus transport / S. Hamacek, M. Bartłomiejczyk, R. Hrbáč [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2014. – 112. – P. 1–11. – ISSN 0378-7796.
- 5 «Зеленые» технологии : в Россию возвращается рекуперация энергии. – URL: <https://zaorotec.ru/content/zelenye-tekhnologii-v-rossiyu-vozvrashchaetsya-rekuperatsiya-energii/> (дата обращения: 29.09.2023).
- 6 **Кацай, А. В.** Утилизация избыточной рекуперации в контактной сети электротранспорта при зарядке стационарного накопителя / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Электрические системы и комплексы. – 2023. – № 1 (58). – С. 10–20. – ISSN 2311-8318.
- 7 **Чернигов, В. М.** Электрооборудование трамвайного вагона с емкостным накопителем / В. М. Чернигов // Cyberleninka.ru. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-izbytochnoy-rekuperatsii-v-kontaktnoy-seti-elektrotransporta-pri-zaryadke-statsionarnogo-nakopitelya/viewer> (дата обращения: 22.07.2022).
- 8 **Кацай, А. В.** Коэффициенты полезного действия накопителя энергии в контактной сети горэлектротранспорта / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия : Технические науки. – 2022. – Т. 30, № 4 (76). – С. 127–141. – DOI 10.14498/tech.2022.4.9.
- 9 Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего

References

- 1 **Zubakin, V. A.** Risk analysis of the imbalance of the structure of generation and consumption of electricity in the development of the Unified energy system of Russia / V. A. Zubakin // Russian natural monopolies : systemic problems and solutions: Collection of articles. – Issue. 1. – Moscow : IPPEM, 2006. – 120 p.
- 2 **Sulim, A. A.** Calculation of electric power recovery of electrified urban transport when installing a storage device at a traction substation / A. A. Sulim // Izvestiya of higher educational institutions and energy associations of the CIS. Energy. – 2014. – Issue 4. – Part 4. – P. 30–41. – ISSN 1029-7448.
- 3 **Bartłomiejczyk, M.** Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery / M. Bartłomiejczyk, M. Połom // Energy Conversion and Management. – 2016. – Vol. 127. – P. 35–42. – DOI 10.1016/j.enconman.2016.08.089.
- 4 Energy recovery effectiveness in trolleybus transport / S. Hamacek, M. Bartłomiejczyk, R. Hrbáč [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2014. – 112. – P. 1–11. – ISSN 0378-7796.
- 5 "Green" technologies : energy recovery is returning to Russia. – URL: <https://zaorotec.ru/content/zelenye-tekhnologii-v-rossiyu-vozvrashchaetsya-rekuperatsiya-energii/> (date of accessed: 09/29/2023).
- 6 **Katsay, A. V.** Utilization of excess recovery in the contact network of electric transport when charging a stationary storage device / A. V. Katsay, M. V. Shevlyugin // Electrical systems and complexes. – 2023. – No. 1 (58). – P. 10–20. – ISSN 2311-8318.
- 7 **Chernigov, V. M.** Electrical equipment of a tram car with a capacitive storage device / V. M. Chernigov // Cyberleninka.ru. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-izbytochnoy-rekuperatsii-v-kontaktnoy-seti-elektrotransporta-pri-zaryadke-statsionarnogo-nakopitelya/viewer> (date of accessed: 07/22/2022).
- 8 **Katsay, A. V.** Efficiency coefficients of an energy storage device in the contact network of the city electric transport / A. V. Katsay, M. V. Shevlyugin // Bulletin of Samara State Technical University. Series : Technical Sciences. – 2022. – Vol. 30, No. 4 (76). – P. 127–141. – DOI 10.14498/tech.2022.4.9.
- 9 Methodological recommendations for calculating the economically justified cost of transporting passengers and luggage in urban and suburban transport by road and urban ground electric public transport (as amended by the Order of the Ministry

пользования (в ред. распоряжения Минтранса России от 25.12.2013 г. № НА-143-р).

10 **Ярославцев, М. В.** Сезонные колебания потребления электрической энергии троллейбусом / М. В. Ярославцев, Н. И. Щуров // Наука. Технологии. Инновации : материалы всерос. науч. конф. молод. ученых ; Новосибирск, 21–24 ноября 2013 г. – Новосибирск : Издательство Новосиб. гос. техн. ун-та, 2013. – Ч. 6. – С. 187–191. – ISBN 978-5-7782-2344-8.

11 Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях московского метрополитена / Л. А. Баранов, В. А. Гречишников, А. В. Ершов [и др.] // Электротехника. – 2014. – № 8. – С. 18–21. – ISSN 0013-5860.

12 **Кацай, А. В.** Преобразование энергии рекуперации в городском электротранспорте / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 5–28. – DOI 10.15593/2224-9397/2022.3.01.

13 Сценарные условия функционирования экономики Российской Федерации и основные параметры прогноза социально-экономического развития Российской Федерации на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов // Министерство экономического развития Российской Федерации : сайт. – URL: https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/scenarnye_usloviya_funkcionirovaniya_ekonomiki_rossiyskoy_federacii_i_osnovnye_parametry_prognoza_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rossiyskoy_federacii_na_2024_god_i_na_planovyy_period_2025_i_2026_godov.html?ysclid=lnrlz1a968767325 (дата обращения: 15.10.2023).

14 **Столбунов, В.** На российском рынке зеленых сертификатов при участии холдинга Эн+ заключена крупнейшая сделка по стандарту Carbon Zero / В. Столбунов // Независимая газета. – URL: https://www.ng.ru/economics/2023-04-18/100_2304181340.html (дата обращения: 29.09.2023).

15 О квалификации генерирующего объекта, функционирующего на основе использования возобновляемых источников энергии (с изменениями и дополнениями). Постановление Правительства РФ от 3 июня 2008 г. N 426.

16 **Незевак, В. Л.** Сравнение вариантов применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе / В. Л. Незевак // Транспорт :

of Transport of the Russian Federation dated 12/25/2013 No. NA-143-r).

10 **Yaroslavtsev, M. V.** Seasonal fluctuations in electric energy consumption by trolleybus / M. V. Yaroslavtsev, N. I Shchurov // Nauka. Technologies. Innovations : materials of the All-Russian scientific conference. young. Scientists ; Novosibirsk, November 21–24, 2013. – Novosibirsk : Publishing House of Novosibirsk State Technical University, 2013. – Part 6. – P. 187–191. – ISBN 978-5-7782-2344-8.

11 Performance indicators of stationary energy storage at traction substations of the Moscow metro / L. A. Baranov, V. A. Grechishnikov, A. V. Ershov [et al.] // Electrical Engineering. – 2014. – No. 8. – P. 18–21. – ISSN 0013-5860.

12 **Katsay, A. V.** Transformation of energy recovery in urban electric transport / A. V. Katsay, M. V. Shevlyugin // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems. – 2022. – No. 43. – P. 5–28. – DOI 10.15593/2224-9397/2022.3.01.

13 Scenario conditions of the functioning of the economy of the Russian Federation and the main parameters of the forecast of socio-economic development of the Russian Federation for 2024 and for the planning period of 2025 and 2026 // Ministry of Economic Development of the Russian Federation: website. – URL: https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/scenarnye_usloviya_funkcionirovaniya_ekonomiki_rossiyskoy_federacii_i_osnovnye_parametry_prognoza_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rossiyskoy_federacii_na_2024_god_i_na_planovyy_period_2025_i_2026_godov.html?ysclid=lnrlz1a968767325 (date of accessed: 10/15/2023).

14 **Stolbunov, V.** In the Russian market of green certificates, with the participation of En+ holding, the largest transaction under the Carbon Zero standard was concluded / V. Stolbunov // Nezavisimaya Gazeta. – URL: https://www.ng.ru/economics/2023-04-18/100_2304181340.html (date of accessed: 09/29/2023).

15 On the qualification of a generating facility operating on the basis of the use of renewable energy sources (with amendments and additions). Resolution of the Government of the Russian Federation of June 3, 2008 No. 426.

16 **Nezevak, V. L.** Comparison of options for the use of electric power storage devices in a traction power supply system and on an electric rolling

наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 9. – С. 17–23. – DOI 10.36535/023619142020094.

17 **Кацай, А. В.** Экспериментальное определение объемов оплачиваемых потерь электроэнергии в контактной сети городского электро-транспорта с рекуперацией / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 116–130. – ISSN 2220-4245.

stock / V. L. Nezevak // Transport : science, technology, management. Scientific Information Collection. – 2020. – No. 9. – P. 17–23. – DOI 10.36535/023619142020094.

17 **Katsay, A.V.** Experimental determination of the volume of paid electricity losses in the contact network of urban electric transport with recovery / A. V. Katsay, M. V. Shevlyugin // News of the Transsib. – 2024. – No. 1 (57). – P. 116–130. – ISSN 2220-4245.

A. V. Katsay, V. A. Zubakin

COST ANALYSIS OF REGENERATIVE ENERGY OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT

Abstract. The study examines the cost aspects of the processes of energy recovery in electric transport and its reuse for useful transportation work. The purchase cost of recovered energy is zero. Regenerative braking does not cause additional wear on the elements of the car traction systems. Due to this, recuperative energy directed for useful reuse has zero cost. With the use of on-board or stationary storage devices, the excess part of the recovery energy can be redirected to repeated useful work. Since the efficiency of any storage devices does not exceed 64–68 %, the losses from the total energy of recovery in on-board storage devices exceed a third of its volume. In addition, energy is additionally consumed from the network for its own needs and transportation of on-board storage devices. Stationary storage devices are not transported, completely preserve the useful network flows of recuperation, ensure direct consumption of it by the network load during charging and release the stored part of it to the network after storage. Compared to the absence of storage devices of any type, on-board devices lead to an increase in the billable energy consumption of the GET, while stationary devices significantly reduce it.

Keywords: energy sources, contact network, useful and excess energy of regenerative braking, stationary and on-board storage, redirection of excess recovery, cost form, costs, paid energy, tariffs.

For citation: Katsai, A. V. Cost analysis of regenerative energy of urban electric transport / A. V. Katsay, V. A. Zubakin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 57–72. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_57.

Сведения об авторах

Кацай Александр Владимирович

ООО «Кинемак»,
генеральный директор,
кандидат философских наук,
e-mail: proton764@@mail.ru

Зубакин Василий Александрович

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина,
кафедра (базовая) возобновляемых источников
энергии (на базе
ООО «Лукойл-Энергоинжиниринг»),
доктор экономических наук, профессор,
e-mail: zubakinva@gmail.com

Information about the authors

Katsay Alexander Vladimirovich

Kinemak LLC,
Candidate of Philosophical Sciences,
e-mail: proton764@@mail.ru

Zubakin Vasily Alexandrovich

Gubkin Russian State University of Oil and
Gas (NRU),
Chair of (basic) Renewable Energy Sources
(based on Lukoil-Energoengineering LLC),
Doctor of Economics Sciences, Professor,
e-mail: zubakinva@gmail.com

А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Е. Крюков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТЯГОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ *

Аннотация. Рассмотрена концепция киберфизических систем (КФС) электроснабжения. Показано, что ядро виртуального сегмента КФС должны образовывать цифровые модели для расчета нормальных и аварийных режимов, нагрева токоведущих частей и тяговых трансформаторов (ТТ), определения показателей качества электроэнергии по отклонениям напряжений, уровням несимметрии и гармонических искажений. Предложена комплексная методика, позволяющая реализовать бесшовные компьютерные технологии, обеспечивающие определение электрических и тепловых режимов ТТ.

На основе цифрового моделирования показано, что методы и алгоритмы моделирования, разработанные в ИрГУПСе, позволяют рассчитывать электрические и тепловые режимы тяговых трансформаторов. На этой основе могут быть реализованы компьютерные технологии информационно-вычислительного сегмента киберфизической системы тягового электроснабжения.

Ключевые слова: железные дороги, киберфизические системы тягового электроснабжения, режимы тяговых трансформаторов, моделирование.

Для цитирования: Крюков, А. В. Моделирование электрических и тепловых режимов тяговых трансформаторов / А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Е. Крюков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 73–81. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_73.

Введение

В состав систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД) входят два сегмента: физический и информационный. Первый включает силовые элементы, за счет которых осуществляется поступление электрической энергии к подвижному составу и стационарным объектам. Второй – образует совокупность измерительных комплексов и сетей, центров обработки данных, оснащенных программным обеспечением, использующим интеллектуальные алгоритмы. В последние годы значимость информационно-вычислительного сегмента непрерывно возрастает, поэтому СЭЖД начинают приобретать свойства киберфизических систем [1–2], рис. 1. В среднесрочной перспективе можно прогнозировать появление СЭЖД киберфизического типа (КФТ), базирующихся на масштабной интеграции вычислительных ресурсов в энергетические процессы. Укрупненная структура такой СЭЖД показана на рис. 1.



Рис. 1. Структура киберфизической СЭЖД

* Работа выполнена по программе государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».

При формировании киберфизических систем для любой предметной области предполагается применение интеллектуальных информационных технологий. Однако в ядре конкретной КФС должны использоваться специализированные методы и цифровые модели, обеспечивающие решение прикладных технических задач. Применительно к СЭЖД КФТ к таким задачам можно отнести:

- определение режимов питающей и тяговой сети (ТС);
- расчеты токов короткого замыкания и уставок релейной защиты;
- вычисление показателей качества электроэнергии (ПКЭ);
- планирование процессов плавки гололеда;
- определение температур нагрева проводов и трансформаторов.

Для их решения можно использовать методы, предложенные в [9, 10]. Они базируются на применении фазных координат, реализованы на единой базе данных и обеспечивают бесшовную интеграцию алгоритмов, направленных на решение конкретных задач.

Тяговые трансформаторы (ТТ) можно отнести к разряду наиболее важных элементов СЭЖД, от эффективного функционирования которых зависит надежность энергообеспечения процессов перевозок. Вопросы моделирования ТТ рассмотрены в [3–8]. В статье [3] показано, что задача увеличения срока службы изоляции ТТ может быть решена при реконструкции тяговых подстанций (ТП). Алгоритм вычисления потерь мощности в стали ТТ представлен в [4]. Актуальные направления диагностики ТТ проанализированы в [5]. Метод расчета риска отказа при дрейфе технического состояния ТТ предложен в [6]. Вопросы компьютерного моделирования процессов нагревания ТТ рассмотрены в [7]. Нагрузочной способности ТТ посвящена статья [8].

Для создания СЭЖД КФТ необходима комплексная методика, позволяющая реализовать компьютерные технологии, обеспечивающие моделирование электрических и тепловых режимов ТТ. Ниже представлены результаты использования методов, описанных в [9, 10], для моделирования тяговых трансформаторов при пропуске поездов повышенной массы.

Результаты моделирования

Для количественной оценки загрузки ТТ проведено определение режимов системы электропитания, включающей три тяговых подстанции (ТП). Расчеты выполнялись с помощью комплекса программ Fazopord версии 5.3.4.5-2024 [9, 10]. Укрупненная схема СЭЖД рассматриваемого участка показана на рис. 2. Моделирование проведено в трех вариантах: при пропуске поездов массой в 6000, 9000 и 12 000 т (рис. 3, 4).

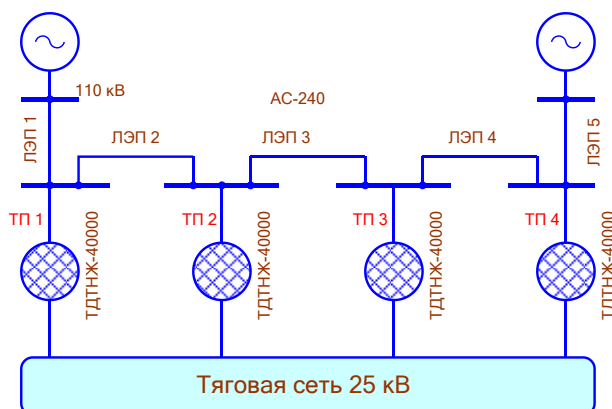


Рис. 2. Укрупненная схема СЭЖД рассматриваемого участка

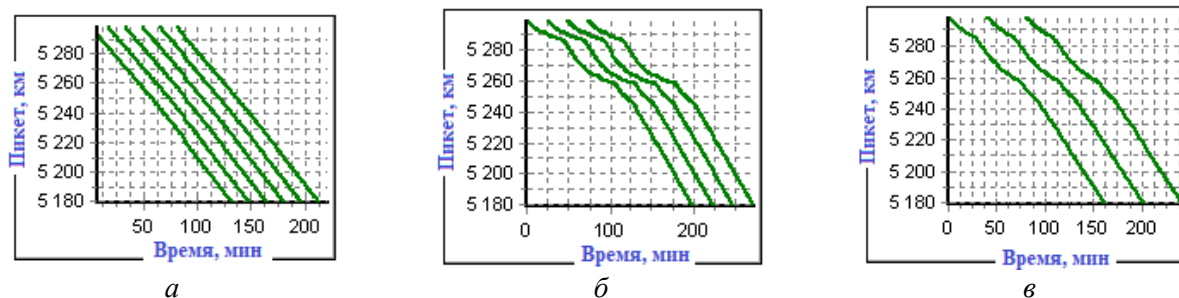


Рис. 3. Графики движения: а – поезда массой 6000 т; б – 9000 т; в – 12 000 т

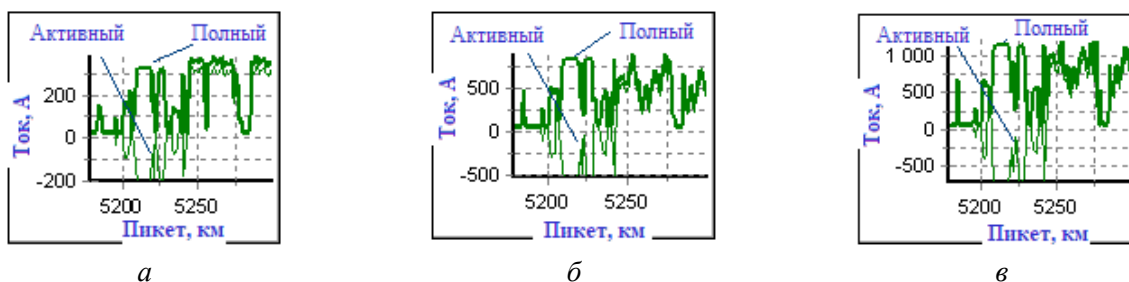


Рис. 4. Зависимости токов поездов от пикетов:

a – поезд массой 6000 т; *б* – 9000 т; *в* – 12 000 т

В состав моделируемой СЭЖД входили следующие элементы: воздушные линии 110 кВ, выполненные проводами АС-240, тяговые трансформаторы ТДТНЖ-40000/110, контактные подвески МФ-100 + ПБСМ-95, рельсы Р 50. Число включенных ТТ на ТП определено на этапе настройки моделей и указано в таблице.

Результаты моделирования представлены на рис. 5–11.

Число включенных трансформаторов на ТП

Масса поезда, т	ТП 1	ТП 2	ТП 3	ТП 4
6000	1	1	1	1
9000	1	1	2	2
12 000	1	1	2	2

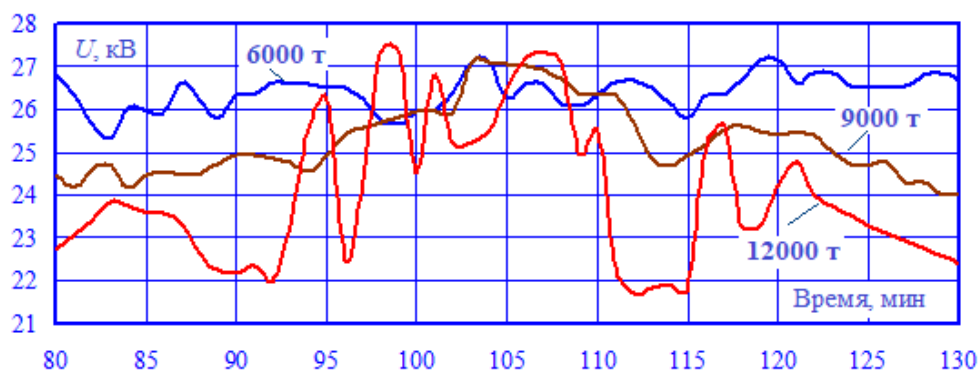


Рис. 5. Напряжения на пантографах электровозов

На рис. 5 показаны зависимости $U = U(t)$ напряжений на токоприемниках электровозов от времени при пропуске поездов массой 6000, 9000 и 12 000 т. Из них видно, что величины U лежат в допустимом диапазоне 21–29 кВ. Наибольшие снижения напряжений наблюдаются при движении трех поездов массой 12 000 т. Графики потерь активной мощности в ТТ $\Delta P = \Delta P(t)$ приведены на рис. 6. Они показывают, что суммарные ΔP в ТТ не превосходят номинального уровня для трансформаторов мощностью 40 000 кВ·А. Наибольшие уровни ΔP имеют место при пропуске поездов массой в 12 000 т.

В ПК Fazonord имеется возможность определения токов отдельных катушек трансформаторов, что позволяет проводить одновременные расчеты температур $\Theta_{\text{ННТ}}$ наиболее нагретой точки (ННТ) и старения изоляции обмоток. В связи с быстрыми вариациями тяговой нагрузки, длительности изменения которой сопоставимы с постоянной времени нагрева обмотки, при вычислениях учитываются тепловые инерции масла и обмоток. В двухобмоточном ТТ обмотки нагреваются примерно одинаково. В трехобмоточном ТТ в наиболее нагруженном режиме находится первичная обмотка, и при определении $\Theta_{\text{ННТ}}$ и износа изоляции следует контролировать ее токи.

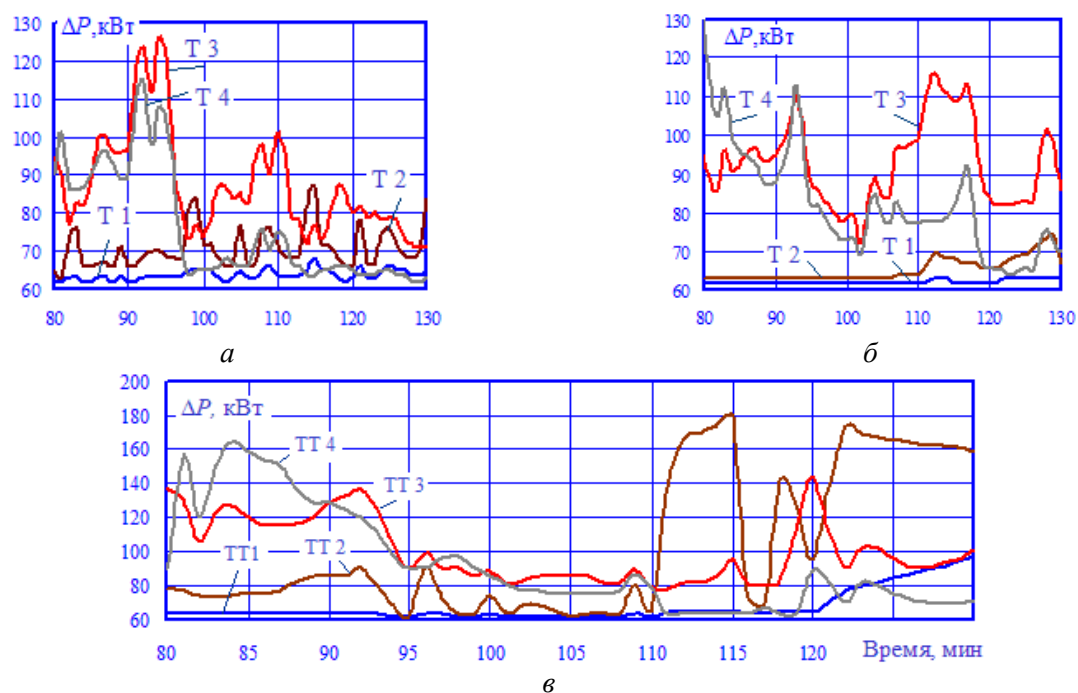


Рис. 6. Потери мощности в тяговых трансформаторах:
a – поезда массой 6000 т; *б* – 9000 т; *в* – 12 000 т

На рис. 7 представлены результаты расчета температур ННТ.

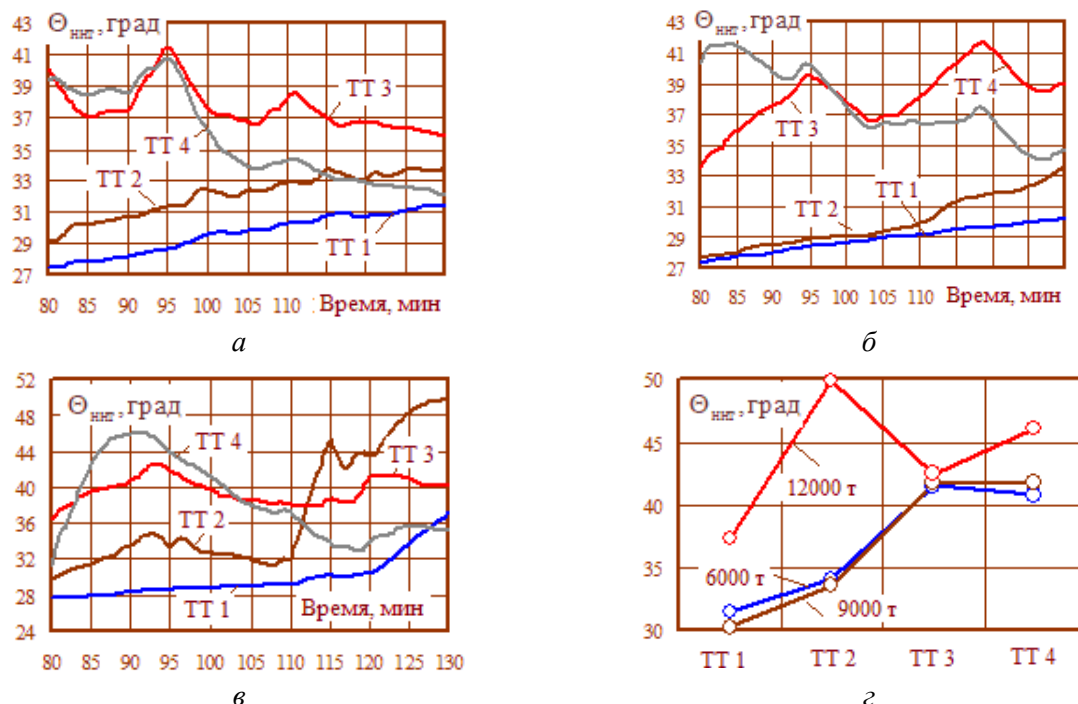


Рис. 7. Температуры наиболее нагретой точки:
a – поезда массой 6000 т; *б* – поезда массой 9000 т; *в* – поезда массой 12 000 т;
г – максимальные значения $\Theta_{\text{ННТ}}$

Зависимости, показанные на рис. 7, построены на основании следующего алгоритма расчета. Максимальная температура ННТ в установившемся режиме определялась так:

$$\Theta_{\text{ННТ}} = \Theta_{\text{охл}} + \vartheta_{\text{м}}(K) + \vartheta_{\text{ННТ,м}}(K^{1,6}),$$

где $K = I/I_{\text{НОМ}}$; I – ток нагрузки; $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток; $\Theta_{\text{охл}}$ – температура охлаждающей среды; $\Theta_{\text{м}}(K)$ – превышение температуры верхних слоев масла; $\Theta_{\text{ННТ.М}}(K^{1,6})$ – разность температур ННТ обмотки и масла.

Абсолютная температура ННТ обмотки в режиме нагрева за интервал времени имитационного моделирования Δt рассчитывается по формулам ГОСТ 14209-85 при учете малости Δt по сравнению с тепловыми постоянными трансформатора.

Для ситуации с несимметричной загрузкой ТТ целесообразно разделить нагревы фазы обмотки и верхних слоев масла:

$$\Theta_{\text{м.уст}} = \Theta_{\text{м.НОМ}} \left[\frac{1 + K_{\text{м}}^2 d}{1 + d} \right]^x; \quad \Theta_{\text{ННТ.М.уст}} = \Theta_{\text{ННТ.М}} K_{\text{макс}}^{1,6},$$

где $K_{\text{м}} = I_{\text{эфф}} / I_{\text{НОМ}}$; $I_{\text{эфф}}$ – эффективный ток; $K_{\text{макс}} = I_{\text{ф.макс}} / I_{\text{НОМ}}$, $I_{\text{ф.макс}}$ – ток наиболее загруженной фазы. Величина $I_{\text{эфф}}$ рассчитывается так:

$$I_{\text{эфф}} = \frac{\sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}}{3}.$$

По рис. 7 могут быть сформулированы следующие выводы:

- наибольшие температуры ННТ имеют место при пропуске поездов массой 12 000 т; при этом потери в ТТ 2 достигают 180 кВт (рис. 6, в);
- зависимости $\Theta_{\text{ННТ}} = \Theta_{\text{ННТ}}(t)$ для отдельных трансформаторов и масс составов существенно различаются; зависимости $\Theta_{\text{ННТ}} = \Theta_{\text{ННТ}}(t)$ для ТТ 1 и 2 при движении поездов массой 6000 и 9000 т имеют монотонно возрастающий характер; аналогичный вид имеет график для ТТ 1 для поездов весом в 12 000 т; остальные зависимости отличаются колебательным характером изменения $\Theta_{\text{ННТ}}$;
- максимальные значения $\Theta_{\text{ННТ}}$ не достигают предельной допустимой величины в 98 °С.

На рис. 8–11 приведены зависимости коэффициентов $K = I/I_{\text{НОМ}}$ по токам фаз обмотки 110 кВ. Данные показатели наиболее адекватно отражают реальную загрузку ТТ в несимметричных режимах.

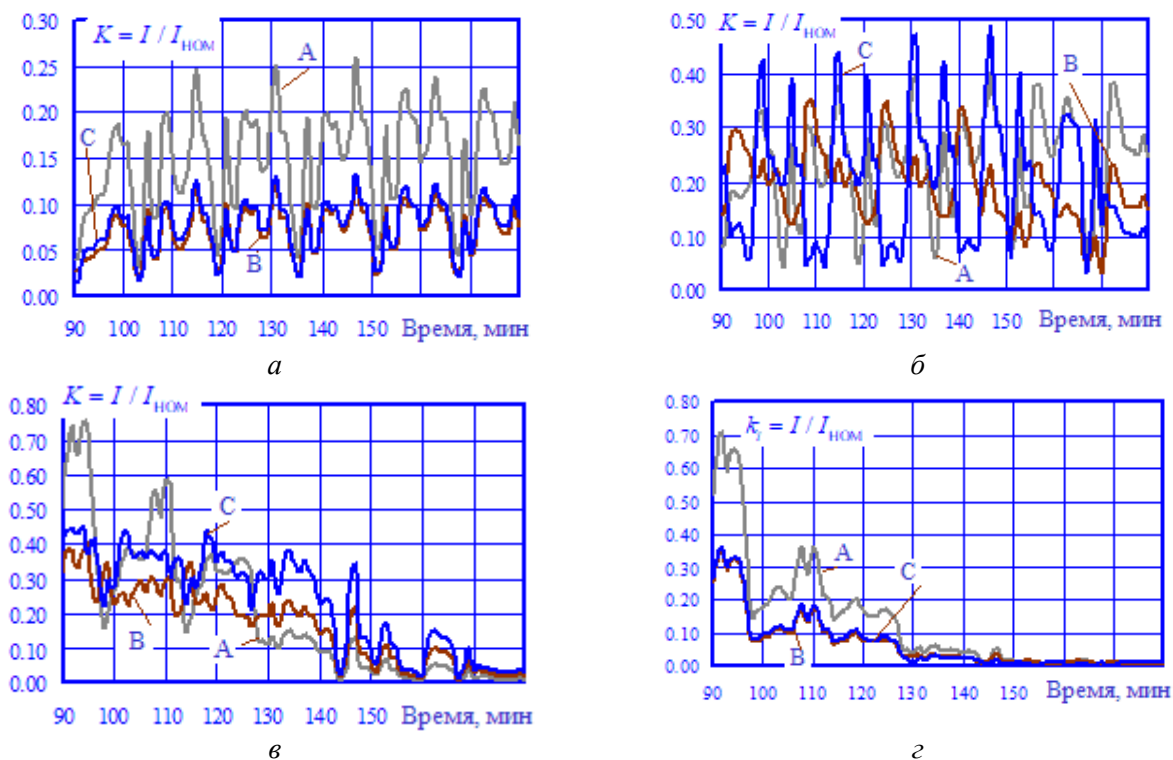


Рис. 8. Коэффициенты загрузки по токам фаз при движении поездов массой 6000 т:
а – ТТ 1; б – ТТ 2; в – ТТ 3; г – ТТ 4

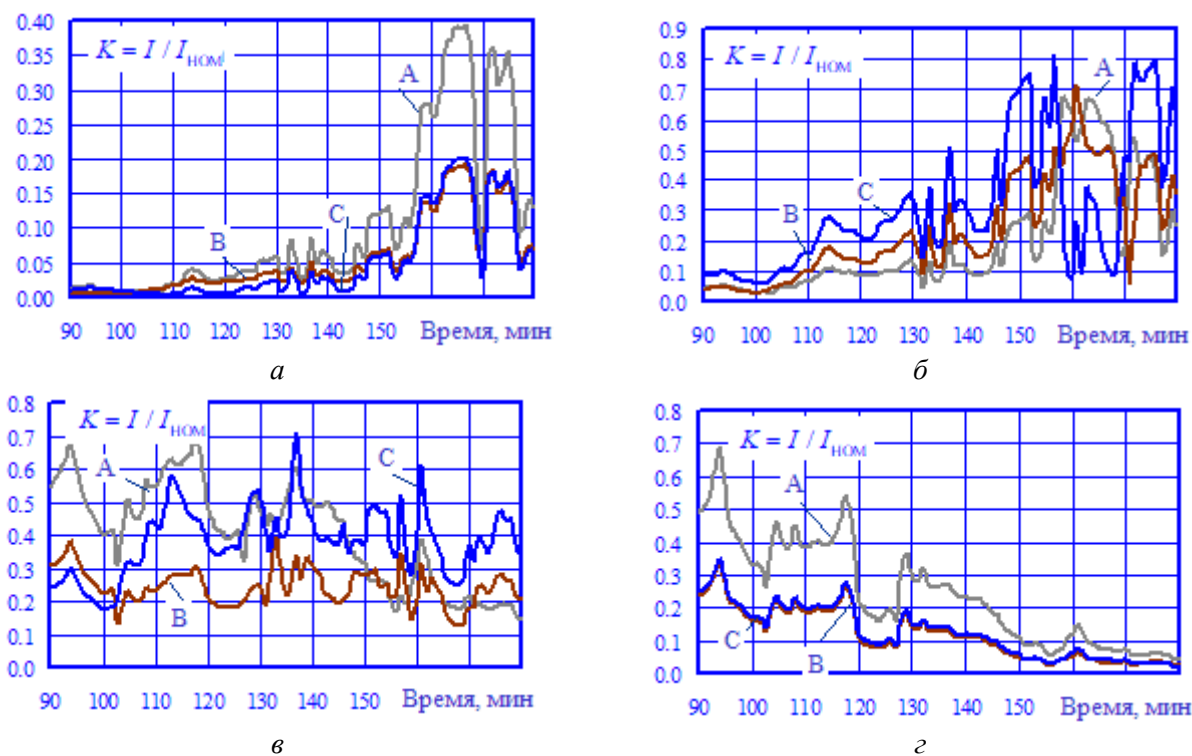


Рис. 9. Коэффициенты загрузки по токам фаз при движении поездов массой 9000 т:
а – ТТ 1; *б* – ТТ 2; *в* – ТТ 3; *г* – ТТ 4

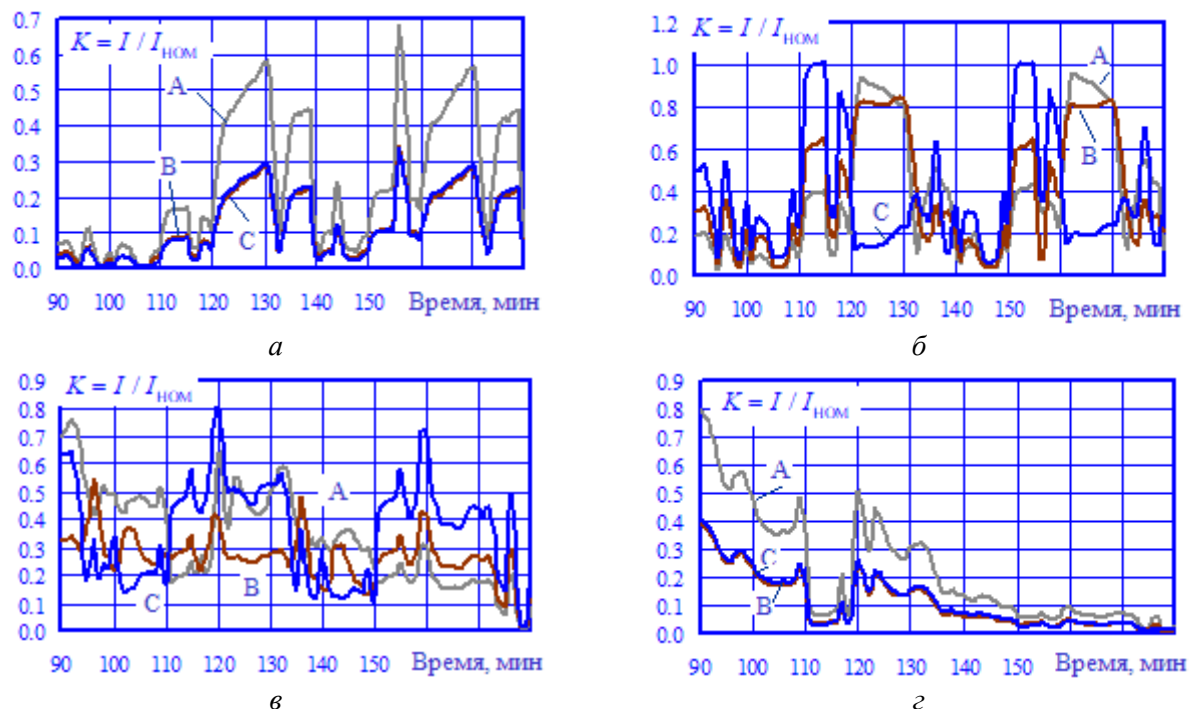


Рис. 10. Коэффициенты загрузки по токам фаз при движении поездов массой 12 000 т:
а – ТТ 1; *б* – ТТ 2; *в* – ТТ 3; *г* – ТТ 4

Представленные результаты показывают, что в рассмотренном примере перегрузки ТТ не наблюдается. Однако величина K для трансформаторов ТТ 2 достигает 100 % при движении составов массой 12 000 т. При пропуске тяжелых поездов в 9000 и 12 000 т и отключении вторых трансформаторов на ТП 3 и 4 наблюдается недопустимая перегрузка ТТ.

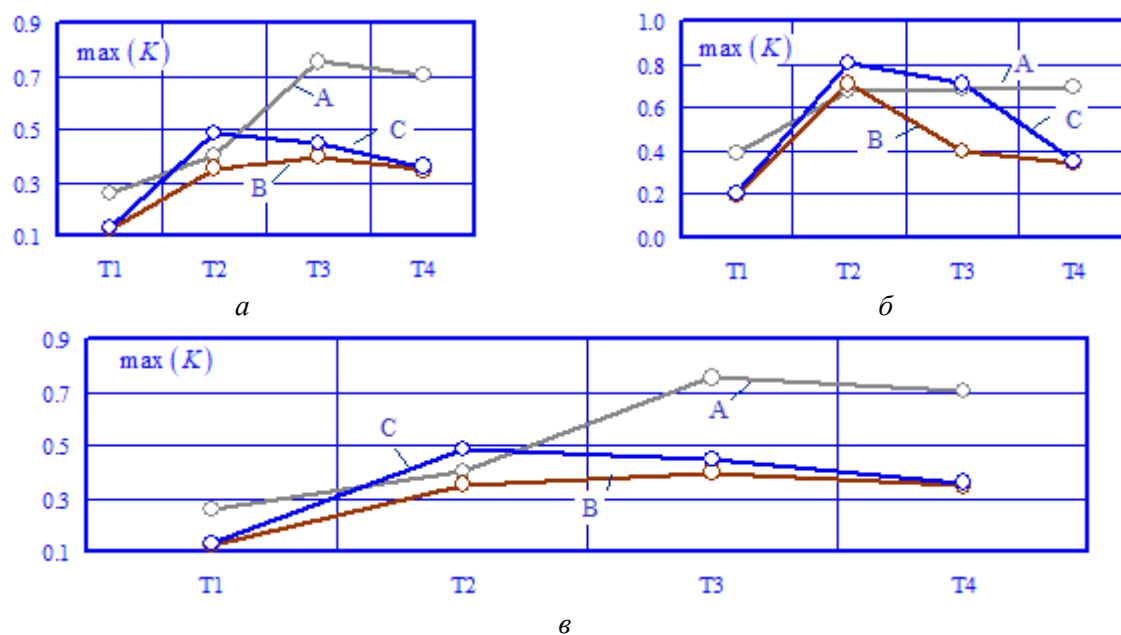


Рис. 11. Максимумы коэффициентов загрузки по токам фаз:
a – поезда массой 6000 т; *б* – поезда массой 9000 т; *в* – поезда массой 12 000 т

Заключение

На основе цифрового моделирования показано, что методы и алгоритмы моделирования СЭЖД, разработанные в ИрГУПСе, позволяют определять электрические и тепловые режимы тяговых трансформаторов. На этой основе могут быть реализованы компьютерные технологии информационной части киберфизических систем тягового электроснабжения.

Список литературы

- 1 Современные технологии. Киберфизические системы : учебное пособие / авторы-составители : Е. И. Громаков, А. А. Сидорова ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 166 с.
- 2 A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems. / Yu. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov, Pio Lombardi, Przemyslaw Komarnicki // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Young Engineers of the Fuel and Energy Complex : Developing the Energy Agenda of the Future” (EAF 2021). Advances in Engineering Research. – 2022. – Vol. 213. – P. 116–125. – DOI 10.2991/aer.k.220308.019.
- 3 **Григорьев, Н. П.** Повышение срока службы изоляции обмоток силовых трансформаторов при реконструкции тяговых подстанций переменного тока 25 кВ / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков, А. П. Парфианович // Электротехника. – № 2. – 2016. – С. 45–48. – EDN VKSLIL.
- 4 **Григорьев, Н. П.** Расчет потерь мощности в стали силовых трансформаторов тяговых подстанций переменного тока / Н. П. Григорьев,

References

- 1 Modern technologies. Cyberphysical systems: textbook / authors & compilers: E. I. Gromakov, A. A. Sidorova ; Tomsk Polytechnic University. – Tomsk : Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2021. – 166 p.
- 2 A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems. / Yu. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov, Pio Lombardi, Przemyslaw Komarnicki // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Young Engineers of the Fuel and Energy Complex : Developing the Energy Agenda of the Future” (EAF 2021). Advances in Engineering Research. – 2022. – Vol. 213. – P. 116–125. – DOI 10.2991/aer.k.220308.019.
- 3 **Grigoriev, N. P.** Increasing the service life of insulation of power transformer windings during the reconstruction of 25 kV AC traction substations / N. P. Grigoriev, A. V. Voprikov, A. P. Parfianovich // Electrical engineering. – No. 2. – 2016. – P. 45–48. – EDN VKSLIL.
- 4 **Grigoriev, N. P.** Calculation of power losses in the steel of power transformers of AC traction substations / N. P. Grigoriev, A. F. Titov, P. N. Trofimovich // Transport infrastructure of the Siberian region. –

А. Ф. Титов, П. Н. Трофимович // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – Иркутск, 2018. – Т. 1. – С. 664–667. – EDN XSHZDF.

5 Диагностика состояния тяговых трансформаторов : актуальные направления / В. С. Бурдин, Н. Д. Родионов, П. С. Пинчуков [и др.] // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2022. – № 18. – С. 3–6. – EDN IGSXGM.

6 **Доманский, В. В.** Информационные технологии и метод расчета риска отказа при дрейфе технического состояния тягового трансформатора / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 264–273. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_264.

7 **Мусурмонов, Р. Б. У.** Компьютерное моделирование тепловых процессов в тяговых трансформаторах / Р. Б. У. Мусурмонов // Молодежь в науке : Новые аргументы. Международный молодежный сборник научных статей. – Липецк, 2018. – С. 33–36. – EDN UVZJWA.

8 **Тряпкин, Е. Ю.** Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов системы тягового электроснабжения переменного тока / Е. Ю. Тряпкин // Молодые ученые – Хабаровскому краю : материалы XIV Краевого конкурса молодых ученых и аспирантов : в 2 т. – Хабаровск, 2012. – С. 179–182. – EDN FFAKWH.

9 **Закарюкин, В. П.** Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск : Издательство Иркутского университета, 2005. – 273 с.

10 **Закарюкин, В. П.** Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат : монография / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Москва : Директ-Медиа, 2023. – 198 с. – ISBN 978-5-4499-3848-0.

Irkutsk, 2018. – Vol. 1. – P. 664–667. – EDN XSHZDF.

5 Diagnostics of the state of traction transformers : current directions / V. S. Burdin, N. D. Rodionov, P. S. Pinchukov [et al.] // Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock. – 2022. – No. 18. – P. 3–6. – EDN IGSXGM.

6 **Domansky, V. V.** Information technologies and a method for calculating the risk of failure during the drift of the technical condition of a traction transformer / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobscheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 264–273. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_264.

7 **Musurmonov, R. B. U.** Computer modeling of thermal processes in traction transformers / R. B. U. Musurmonov // Youth in science : New arguments. International youth collection of scientific articles. – Lipetsk, 2018. – P. 33–36. – EDN UVZJWA.

8 **Tryapkin, E. Yu.** Load capacity of power oil transformers of the alternating current traction power supply system / E. Yu. Tryapkin // Young scientists – to Khabarovsk region : materials of the XIV Regional competition of young scientists and graduate students : in 2 volumes. – Khabarovsk, 2012. – P. 179–182. – EDN FFAKWH.

9 **Zakaryukin, V. P.** Complex asymmetric modes of electrical systems / V. P. Zakaryukin, A. V. Kryukov // Irkutsk : Irkutsk University Publishing House, 2005. – 273 p.

10 **Zakaryukin, V. P.** Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates monograph / V. P. Zakaryukin, A. V. Kryukov // Moscow : Direct-Media, 2023. – 198 p. – ISBN 978-5-4499-3848-0.

A. V. Kryukov, A. V. Cherepanov, A. E. Kryukov

MODELING OF ELECTRICAL AND THERMAL MODES OF TRACTION TRANSFORMERS

Abstract. The paper considers the concept of cyber-physical power supply systems. It is shown that the core of the virtual segment of such a system should form digital models for calculating normal and emergency modes, heating of current-carrying parts and traction transformers, determining power quality indicators based on voltage deviations, levels of asymmetry and harmonic distortion. A comprehensive methodology is proposed that makes it possible to implement seamless computer technologies that provide determination of electrical and thermal conditions of traction transformers. Based on digital modeling, it is shown that the modeling methods and algorithms developed at the Irkutsk State Transport University allow one to calculate the electrical and thermal conditions of traction transformers. On this basis, computer technologies of the information and computing segment of the cyber-physical traction power supply system can be implemented.

Keywords: railways, cyber-physical systems of traction power supply, modes of traction transformers, modeling.

For citation: Kryukov, A. V. Modeling of electrical and thermal modes of traction transformers / A. V. Kryukov, A. V. Cherepanov, A. E. Kryukov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 73–81. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_73.

Сведения об авторах

Крюков Андрей Васильевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроэнергетика транспорта».

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),
кафедра «Электроснабжение и электротехника»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: and_kryukov@mail.ru

Черепанов Александр Валерьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроэнергетика транспорта»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: smart_grid@mail.ru

Крюков Александр Егорович

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),
кафедра «Электрические станции»,
аспирант,
e-mail: appleforevor@mail.ru

Information about the authors

Kryukov Andrey Vasilievich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Electric Power Engineering of Transport».

Irkutsk National Research Technical University (INRTU),
Chair «Electrical Supply and Electrical Engineering»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: and_kryukov@mail.ru

Cherepanov Aleksander Valerievich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Electric Power Engineering of Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: smart_grid@mail.ru

Kryukov Alexander Egorovich

Irkutsk National Research Technical University (INRTU),
Chair «Electric Power Plants»,
Postgraduate,
e-mail: appleforevor@mail.ru

А. Н. Митрофанов, Ю. И. Жарков, С. А. Окладов

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ

Аннотация. Представлена методология построения моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов, позволяющая произвести корректный подбор факторов и идентификацию параметров многофакторной модели для территориальных филиалов ОАО «РЖД». В качестве процессов энергообеспечения рассматривались расход электроэнергии на тягу, удельный расход электроэнергии, небаланс тягового энергообеспечения. В качестве независимых переменных модели исследовались процессы грузовых перевозок и процессов по их обеспечению: погрузка груза, грузооборот, скорость движения поездов, показатели использования электровагонов, вагонов и др. Согласно результатам процедуры валидации установлена возможность производить моделирование динамических реализаций процессов энергообеспечения тяги поездов с погрешностью не более 3,1–3,7 % от фактических значений.

Ключевые слова: цифровые двойники, экспресс-модели процессов, энергообеспечение, тяга поездов, корреляционная связь, кластерный анализ, верификация и валидация, многофакторная модель цифрового двойника.

Для цитирования: Митрофанов, А. Н. Методология построения моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов / А. Н. Митрофанов, Ю. И. Жарков, С. А. Окладов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 82–99. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_82.

Введение

Повышение эффективности работы инфраструктуры железнодорожных перевозок предусмотрено долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» до 2025 года и на перспективу до 2030 года [1], а информационное сопровождение деятельности перевозок грузов и обеспечивающей её инфраструктуры предусмотрено программой «Цифровая железная дорога». Так, в разделе программы «Инновационное и технологическое развитие» [1] описаны основные направления инновационного развития, предусматривающие разработку и внедрение перспективных технических средств и технологий железнодорожной инфраструктуры, в том числе для хозяйств электрификации и электроснабжения дирекции Трансэнерго компании «Российские железные дороги». Методологической основой для разработки обозначенных инновационных технологий должны являться сформированные совокупность и последовательность методов, используемых исследователем при решении проблемы. К характерным методологически важным моментам при этом относятся постановка проблемы, предмета исследования, построение совокупности научно обоснованных методов, направленных на достижение цели исследования, а также проверка полученного результата с точки зрения его истинности, то есть оценки соответствия объекту исследования. При разработке инновационной технологии оценки состояния процессов энергообеспечения тяги поездов в качестве эффективного инструментария целесообразно использовать понятийный аппарат, используемый в ГОСТ Р 57700.37–2021 «Цифровые двойники изделий» и ГОСТ Р 57188–2016 «Численное моделирование физических процессов» [2, 3]. Согласно источнику [2] цифровой двойник изделия «представляет собой систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и с его составными частями». В свою очередь, «цифровая модель цифрового двойника представляет собой систему математических и компьютерных моделей, описывающую структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия, для которой на основании результатов цифровых испытаний выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям».

Опираясь на положения, определенные в источнике [3], методология оценки состояния процессов энергообеспечения тяги поездов (далее – методология) должна базироваться на использовании в исследовании ряда методов, подходов и способов, последовательно выполняющих следующие процедуры:

– формулирование законов, связывающих основные объекты модели при описании объекта исследования;

- исследование математическими методами сформулированных законов взаимосвязей объектов модели задач, к которым приводит математическая модель;
- выбор и адаптация инструментария для реализации модели цифрового двойника исследуемого объекта;
- верификация модели цифрового двойника исследуемого объекта посредством подтверждения корректности решения математических выражений, описывающих исследуемые модели;
- валидация модели цифрового двойника посредством подтверждения адекватности математической модели исследуемому объекту в целом;
- анализ и модернизация модели цифрового двойника при накоплении данных об изучаемом объекте.

Таким образом, в качестве *предмета исследования* методологии может выступать процесс построения цифровых двойников процессов, присущих системе тягового электроснабжения (СТЭ) хозяйства электрификации и электроснабжения на филиалах ОАО «РЖД», включающий выполнение научно обоснованных методов, подходов и способов исследования.

Наличие в структурных подразделениях дирекции Трансэнерго ОАО «РЖД», осуществляющей управление хозяйством электрификации и электроснабжения, инструментария и программного обеспечения для реализации модели цифровых двойников СТЭ, позволит оценить режимы и повысить эффективность работы СТЭ на территориальных филиалах дирекции. При этом можно будет оценить прогнозные режимы работы СТЭ в условиях вариации показателей перевозочного процесса (например, массы, скорости поездов, межпоездного интервала и др.); хозяйств, обеспечивающих перевозки (например, рабочий парк электровозов, вагонов и др.); нагрузочной способности СТЭ (например, за счет вариации типов «усиливающих» элементов СТЭ) и т. д. Конечной целевой функцией использования моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов является оценка ресурса СТЭ для повышения пропускной и провозной способности на участках железных дорог по условиям электроснабжения. Однако базовые положения методологии для построения моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов к настоящему времени не нашли достаточного отражения в научной отраслевой литературе, в связи с чем её разработка является актуальной.

Цель настоящей статьи – обоснование и апробация методов, подходов, способов в составе методологии построения математических моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов на территориальных филиалах ОАО «РЖД».

Методы и средства

Подход к автоматизации и управлению устройствами СТЭ на полигонах энергообеспечения тяги поездов по результатам моделирования во многом основан на научных исследованиях из области математической статистики и теории автоматического управления, например [4–7]. Исследования в области автоматизации и управления устройствами СТЭ проводились в ряде транспортных вузов России, в том числе и на кафедрах «Электроснабжение железнодорожного транспорта» в СамГУПСе и «Автоматизированные системы электроснабжения» в РГУПСе [8–12]. На основании ранее проведенных исследований авторов и приведенных выше обоснований в данной работе предложена методология построения моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов, которая основана на использовании ряда методов, подходов и способов, включенных в 10 основных процедур:

1 Построение обобщенной структуры взаимодействия процесса энергообеспечения тяги поездов, реализуемой филиалом дирекции Трансэнерго на полигоне исследуемого филиала ОАО «РЖД», встроеного в структуру матричных процессов грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов смежных хозяйств и дирекций. В качестве методов построения структуры модели могут использоваться метод и инструментарий для моделирования бизнес-процессов типа ARIS (Architecture of Integrated Information Systems) [13] или отечественная разработка семейства программных средств КОМПАС-3D [14].

2 Теоретическое обоснование подбора потенциально возможных для использования в цифровой модели ключевых показателей эффективности (деятельности) (КПЭ) процессов энергообеспечения тяги поездов, грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов смежных хозяйств и дирекций. Используются методы теории «управления по целям» [15].

3 Формализация закономерностей, связывающих в структуре модели КПЭ процесса энергообеспечения тяги поездов с КПЭ процессов грузовых перевозок, а также с КПЭ процессов, их обеспечивающих. В качестве метода используется анализ последовательности технологических операций исследуемого объекта [16, 17].

4 Мониторинг и формирование цифровых баз данных КПЭ процессов энергообеспечения, грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов смежных хозяйств и дирекций на основании технологических операций исследуемого объекта [18] при использовании метода агрегирования данных [19] и инструментария Big Data [20].

5 Оценка статистических показателей КПЭ процессов энергообеспечения, грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов со стороны смежных хозяйств и дирекций [18, 19].

6 Идентификация параметров взаимосвязи КПЭ, исследуемых для включения в математические модели цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов. Выявление «приоритетных» КПЭ, значительно влияющих на энергообеспечение тяги поездов методами корреляционного [4, 5] и кластерного анализов [21].

7 Построение комплекса однофакторных экспресс-моделей цифровых двойников СТЭ и их верификация по критерию физической и аналитической обоснованности. В качестве методов используются метод планирования эксперимента [22] и разведочный анализ данных (exploratory data analysis, EDA) [23]. Для верификации моделей применимы методы подхода формальной верификации: «проверка моделей» (model checking) и «логический вывод» (logical inference) [24].

8 Построение динамических реализаций КПЭ процессов энергообеспечения тяги поездов и «приоритетных» КПЭ процессов грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов смежных хозяйств и дирекций, а также оценка их адекватности по критерию стационарности. В качестве метода используется «теория случайных процессов» [4].

9 Построение многофакторных моделей цифровых двойников КПЭ процессов энергообеспечения, верификация, устранение мультиколлинеарности «приоритетных» КПЭ процессов грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов смежных хозяйств и дирекций. В качестве способа построения моделей используется множественная регрессия [25], пакеты прикладных программ Statistica [26], Microsoft Excel [27].

10 Валидация построенных моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения посредством их сопоставления с фактическими процессами энергообеспечения тяги поездов на участках ОАО «РЖД». В качестве метода валидации могут применяться статистические методы перекрестной проверки (кросс-валидация) [28, 29].

Результаты и обсуждения

Реализация *процедуры 1* методологии по построению обобщенной структуры взаимодействия процесса энергообеспечения тяги поездов дирекцией Трансэнерго на одном из территориальных филиалов ОАО «РЖД» представлена на рис. 1. Данная структура, построенная согласно рекомендациям [14], представляет собой строку матричного представления перевозочных процессов и процессов его обеспечивающих, предложенных авторами и развитых в работах [16–18].

В схеме рис. 1 управление процессом грузовых перевозок осуществляется Территориальной дирекцией управления движения (ТДУД). Энергообеспечение процесса грузовых перевозок осуществляется Территориальной дирекцией энергообеспечения (ТЭ – Трансэнерго). К хозяйствам и дирекциям, обеспечивающим грузовые перевозки, относятся территориальные дирекции: Территориальная дирекция инфраструктуры (ТДИ), включающая хозяйство пути (П), вагонное хозяйство (В), хозяйство сигнализации и связи (Ш); Территориальная дирекция тяги (ТДТ) и некоторые другие. На схеме рис. 1 восходящими стрелками от процесса грузовых перевозок к блокам обеспечивающих дирекций передается информация о потребностях в ресурсах перевозочного процесса. Нисходящими стрелками от блоков обеспечивающих дирекций к процессу грузовых перевозок указаны ресурсы, которые фактически привносятся в процесс грузовых перевозок. Уровень привносимого ресурса от каждой дирекции целесообразно оценивать, как в абсолютных значениях, так и в «условных» КПЭ хозяйства, отнесенных к КПЭ процессов грузовых перевозок, которые курируются дирекцией ТДУД. При этом каждый показатель из вектора показателей, например, КПЭ ТЭ/ТДУД, будет иметь конкретный физический смысл. Так, очевидно, что для роста показателя ТДУД грузооборота от дирекции ТЭ потребуется увеличение показателя энергообеспечения. Отношение же данных показателей позволит оценить показатель эффективности расхода энергообеспечения. В предложенной структуре предполагается наличие обмена информацией непосредственно между дирекциями, обеспечивающими грузовые перевозки, например, между Трансэнерго и ТДТ – дирекцией тяги.

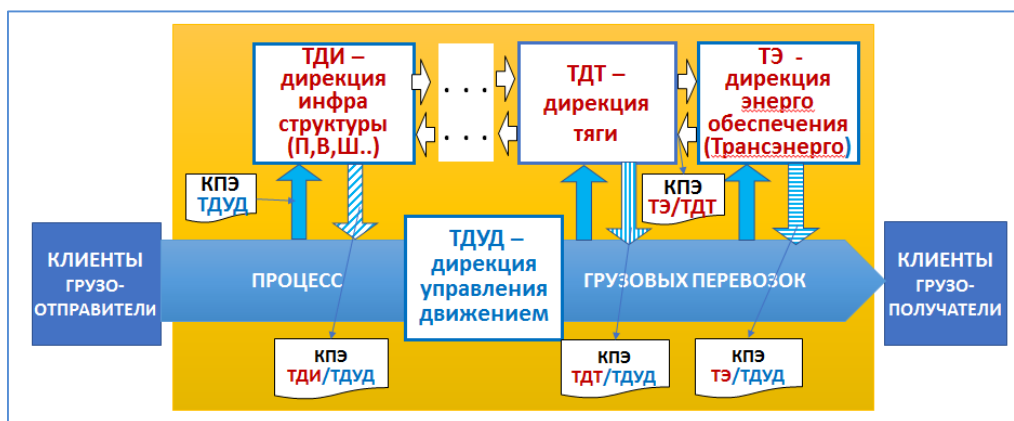


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия основного процесса грузовых перевозок с обеспечивающими процессами территориальных дирекций для учета информационных потоков в цифровых двойниках

Реализация процедуры 2 методологии по подбору КПЭ для включения их в качестве переменных в модель цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов была впервые апробирована авторами в работах [16–18]. В процедуре использовались рекомендации, представленные в [15]. Для получения наиболее информативных показателей процессов энергообеспечения тяги поездов со стороны СТЭ целесообразно использовать показатели, измеряемые на тяговых подстанциях (ТП). К данным показателям относятся в первую очередь:

- 1 Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП, кВтч (*Расход $W_{т\text{тп}}$*).
- 2 Удельный расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП, кВтч / 10 тыс. ткм брутто (*Уд. Расход $W_{т\text{уд}}$*).
- 3 Небаланс электроэнергии, % (*Небаланс $W_{\text{неб}}$*).

При этом показатель *Уд. Расход $W_{т\text{уд}}$* является показателем эффективности использования электроэнергии, расходуемой на тягу поездов, и традиционно вычисляется как отношение абсолютного значения *Расход $W_{т\text{тп}}$* , отнесенное к объему выполняемой тонно-километровой работы брутто (A_t) на исследуемом участке.

Показатель *Небаланс $W_{\text{неб}}$* формируется как разница между показателями расхода тягового электропотребления по показаниям ТП и показателями тягового электропотребления на подвижном составе. На рис. 2 представлены реализации помесячных значений данных фактических процессов в СТЭ совместно с показателем работы A_t за период 46 кварталов (138 месяцев).

На рис. 2 видно наличие схожести характера реализации *Расход $W_{т\text{тп}}$* (тренды 2 и 4) и реализации A_t (тренды 1 и 2), что позволяет использовать при построении моделей цифровых двойников процессов СТЭ методы идентификации, а также статистического и корреляционного анализа [4, 5]. Из анализа характера реализации показателя *Уд. Расход $W_{т\text{уд}}$* виден её периодический и сезонный характер. При этом минимальные, а значит, и наиболее эффективные их значения приходятся на летние месяцы. Причем периоды данного мультипликативного показателя не совпадают с периодами колебаний показателей – *Расход $W_{т\text{тп}}$* и A_t , используемых для его традиционной оценки. Данное обстоятельство говорит о наличии в схеме формирования *Уд. Расход $W_{т\text{уд}}$* и других дополнительных эксплуатационных показателей, требующих идентификации и включения в модели цифровых двойников СТЭ.

К показателям качества КПЭ процессов грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов смежных хозяйств и дирекций в обобщенной структурной схеме (см. рис. 1) следует отнести около 20 эксплуатационных показателей производственно-хозяйственной деятельности филиала ОАО «РЖД». Конкретный перечень КПЭ будет представлен ниже в процедуре 6.

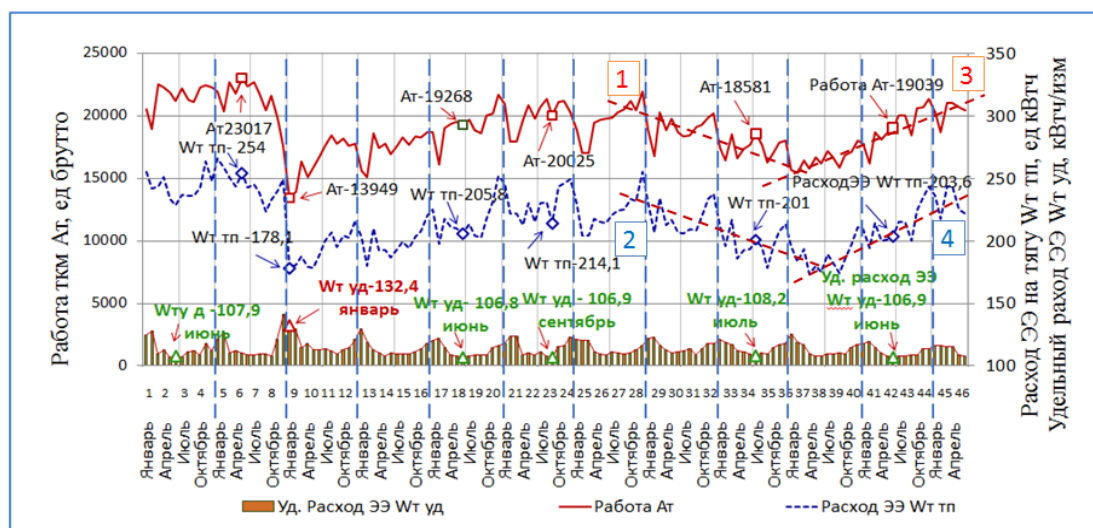


Рис. 2. Реализации фактических значений показателей процессов в СТЭ:
Расход $W_{тп}$, Уд. Расход $W_{туд}$ и тонно-километровой работы A_t брутто

Реализация процедуры 3 методологии по формализации закономерностей, связывающих КПЭ процесса энергообеспечения тяги поездов с КПЭ процессов грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов смежных хозяйств и дирекций на основании [16–18], может быть представлена в виде операторной формы записи:

$$X_{ТЭ}^* = F_{ТЭ}(X_{ТДУД}, X_{ТДИ}, X_{ТДТ}) + \xi_{ТЭ}, \tag{1}$$

где $X_{ТЭ}^*$ – модельная оценка вектора выходного процесса энергообеспечения тяги поездов для блока схемы ТЭ; $X_{ТДУД}$, $X_{ТДИ}$, $X_{ТДТ}$, $X_{ТЭ}$ – векторы наблюдаемых выходных фактических показателей блоков схемы ТДУД, ТДИ, ТДТ, ТЭ; $F_{ТЭ}$ – функционал взаимосвязи между выходными показателями блока ТЭ и выходными показателями блоков ТДУД, ТДИ, ТДТ, ТЭ, полученных методами идентификации [4, 5]; $\xi_{ТЭ}$ – векторы стохастической составляющей цифровой модели из-за неучтенных факторов.

Реализация процедуры 4 методологии основана на мониторинге и формировании цифровых баз данных актуальных КПЭ процессов согласно рекомендациям методов [18, 19] и формата, представленного в табл. 1.

Таблица 1

Вид фрагмента цифровой базы КПЭ процессов грузовых перевозок и энергообеспечения тяги поездов

№ набл (квартал)	№ КПЭ						...	19
	1	2	3	4	5	6		
	<i>Погрузка</i>	<i>Грузооборот Тарифный</i>	<i>Грузооборот Экспл</i>	<i>Работа ткм A_t</i>	<i>Расход ЭЭ $W_{тп}$</i>	<i>Участковая Скорость $V_{уч}$</i>		<i>Производительность вагона</i>
1	5315	12800	11909	20556	255	42		14682,0
2	5884	14380	13601	22269	251	40		13620,0
...								
45	5961	15708	12361	20320	236	45		6400,0
46	5972	16054	13064	21028	243	44		6762,0

Для этого целесообразно организовать мероприятия по подбору, выгрузке и трансформации данных КПЭ из доступных для исследователей железнодорожных систем управления, например, АСОУП, ИОММ, ГИД-Урал, АСУ-Т, АСУ-Э, ТХО-125, ДУ и др. Количество наблюдаемых значений КПЭ (длительность выборки), включаемых в базу данных, определяется поставленной задачей и характером исследуемых процессов. В условиях помесечной сезонности данных для обеспечения высокой точности прогноза выборка должна содержать уже 24–36 помесечных наблюдений КПЭ. В качестве примера в табл. 1 представлен фрагмент цифровой базы для одного из филиалов ОАО «РЖД» для 19 КПЭ энергообеспечения

тяги поездов, грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов смежных хозяйств и дирекций за период 46 кварталов (138 месяцев), составленной в табличном процессоре Excel.

Реализация *процедуры 5* методологии по оценке статистических показателей КПЭ процессов энергообеспечения, грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов со стороны смежных хозяйств и дирекций основана на анализе ранее сформированной базы данных КПЭ вида табл. 1. [18, 19] В рамках процедуры следует провести анализ законов плотности вероятности выборок КПЭ исследуемых процессов. На рис. 3 представлены примеры гистограмм эмпирической плотности вероятности КПЭ процессов энергообеспечения тяги поездов: *Работа тонно-километровая* A_t , *Расход* $W_{тп}$, *Уд. Расход* $W_{туд}$ на одном из направлений тяжеловесного движения за период 24 месяцев. Поскольку представленные на рис. 3, а, б, в эмпирические гистограммы отличаются от плотности вероятности нормального закона (непрерывные кривые) и имеют ассиметричный характер, было предложено использовать показатели: *Мода*, который указывает на наиболее вероятные значения выборки КПЭ; *Коэффициент Ассиметрии* K_a , который оценивает отклонение гистограммы вправо или влево относительно среднего значения; *Коэффициент Эксцесса* $K_э$, который позволяет оценить островершинный или плоский характер плотности вероятности анализируемой выборки показателей.

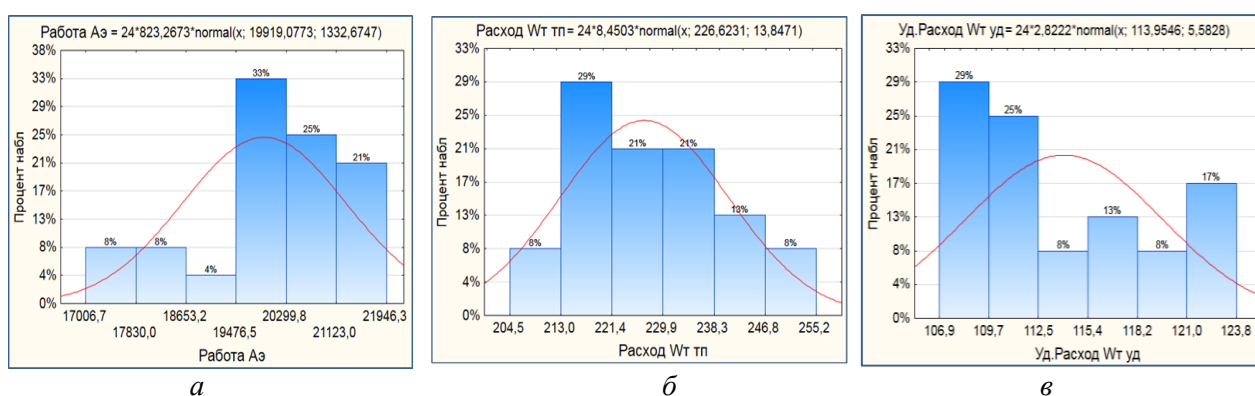


Рис. 3. Пример гистограмм КПЭ процессов:

а – работа тонно-километровая A_m ; б – расход $W_{mтп}$; в – удельный расход $W_{mуд}$

Реализация *процедуры 6* методологии заключается в идентификации взаимосвязи КПЭ исследуемых для включения в математические модели цифровых двойников процессов энергообеспечения методами корреляционного [4, 5] и кластерного анализов [21], а также выявление при этом «приоритетных» КПЭ, значительно влияющих на энергообеспечение тяги поездов [16–18]. Идентификацию взаимосвязей исследуемых КПЭ предлагается выполнять на основании построения парных коэффициентов корреляции (R) между КПЭ процессов энергообеспечения тяги поездов и КПЭ процессов грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов смежных хозяйств и дирекций.

На рис. 4, а представлен пример построения гистограмм коэффициентов корреляции между показателем *Расход* $W_{тп}$ – $R(W_{тп})$, а на рис. 4, б – коэффициентов корреляции между показателем *Уд. Расход* $W_{туд}$ – $R(W_{туд})$ и КПЭ других хозяйств.

Анализ составленной гистограммы (см. рис. 4, а) показывает, что КПЭ процесса энергообеспечения *Расход* $W_{тп}$ на исследуемом полигоне ОАО «РЖД» сильнее всего связан со следующими КПЭ: для *Расход* $W_{эпс}$ значение $R(W_{тп}) = 0,92$; для *Работа* $A_э$ значение $R(W_{тп}) = 0,88$; для *Погрузка* значение $R(W_{тп}) = 0,52$; для *Участковая скорость* $V_{уч}$; *Средний вес поезда*; *Оборот грузового вагона*; *Статическая нагрузка* значение $R(W_{тп}) = -0,31$ и т. д. Исходя из данных гистограммы (см. рис. 4, б) КПЭ *Уд. Расход* $W_{туд}$ на исследуемом полигоне ОАО «РЖД» связан с его составляющими следующим образом: для *Расход* $W_{тп}$ значение $R(W_{туд})$ составляет не более 0,14; для *Работа* $A_э$ значение $R(W_{туд}) = -0,34$. Это означает, что показатель *Уд. Расход* $W_{туд}$ более чем в два раза сильнее зависит от изменения показателя *Работа* $A_э$, чем от изменения показателя *Расход* $W_{тп}$. Далее КПЭ процесса энергообеспечения *Уд. Расход* $W_{туд}$ сильнее всего связан со следующими КПЭ: для *Процент порожнего пробега вагона* значение $R(W_{туд}) = 0,60$; для *Участковая скорость* $V_{уч}$ значение $R(W_{туд}) = 0,33$ и т. д.

Для корректного выбора «приоритетных» КПЭ предложено использовать кластерные методы анализа взаимосвязи переменных. На рис. 4, в результаты обработки КПЭ девятнадцати эксплуатационных процессов на исследуемом филиале ОАО «РЖД» представлены в виде дендрограммы.

В дендрограмме степень близости КПЭ изображается в виде уровней объединения одиночных переменных или их групп (кластеров), отстоящих от нулевой оси абсцисс *Расстояние объединений* на

расстояния, пропорциональные разнице между единицей и коэффициентом корреляции R по Пирсону, то есть величине $(1-R)$ Пирсон). При этом если уровень объединений КПЭ или их кластеров находится по оси *Расстояние объединений* на уровне 0, то это соответствует полной положительной взаимосвязи между КПЭ, то есть $R = 1$. Если уровень объединения КПЭ находится на уровне 1, то это соответствует полному отсутствию взаимосвязи между КПЭ, то есть $R = 0$. Если уровень объединения КПЭ равен 2, то это соответствует полной отрицательной взаимосвязи между КПЭ, то есть $R = -1$.

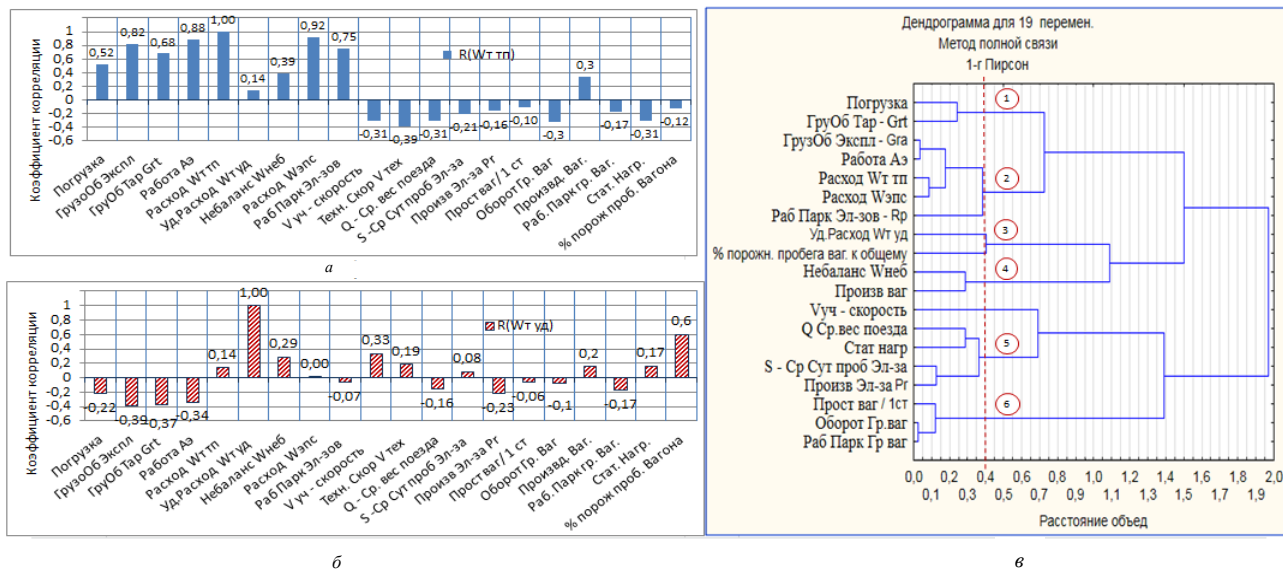


Рис. 4. Результаты идентификации взаимосвязей КПЭ:

а – гистограмма коэффициентов корреляции $R(W_{T\text{ tp}})$;

б – гистограмма коэффициентов корреляции $R(W_{T\text{ уд}})$; *в* – дендрограмма процессов

Таким образом, чем ближе уровень объединения КПЭ или их кластеров к нулевой отметке, тем выше положительная корреляционная связь. Так, на рис. 4, *в* на уровне значимых величин коэффициента корреляции $R > 0,4$ по оси *Расстояние объединений* можно различить шесть кластеров, обозначенных цифрами в окружности:

– кластер 1 включает в себя показатели: *Погрузка*; *ГрузОб Тар-Грт*. Уровень взаимосвязи показателей по оси *Расстояние объединений* составляет 2,5 единиц, что соответствует коэффициенту корреляции $R = 0,75$;

– кластер 2 включает в себя показатели: *Расход $W_{T\text{ tp}}$* ; *Расход $W_{\text{эпс}}$* ; *Работа A_3* ; *ГрузОб Экспл – Гра*; *Раб Парк Эл-зов – R_p* . Уровень взаимосвязи $R = 0,6$;

– кластер 3 включает в себя показатели: *Уд. Расход $W_{m\text{ уд}}$* ; *% Порожного пробега вагона к общему*. Уровень взаимосвязи $R = 0,7$;

– кластер 4 включает в себя показатели: *Небаланс $W_{\text{неб}}$* ; *Производительность вагона*. Уровень взаимосвязи $R = 0,6$;

– кластер 5 включает в себя показатели: *Q – Ср.вес поезда*; *Стат нагр*; *S – Средне суточный пробег Эл-за*; *Произв Эл-за*. Уровень взаимосвязи $R = 0,65$;

– кластер 6 включает в себя показатели: *Простой вагона на 1 станции*; *Оборот Грузового Вагона* и *Рабочий Парк Грузового вагона*. Уровень взаимосвязи $R = 0,87$.

Реализация процедуры 7 методологии предусматривает построение комплекса однофакторных экспресс-моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов в функции «приоритетных» КПЭ процессов грузовых перевозок и обеспечивающих их хозяйств и дирекций. При построении и верификации данного комплекса моделей используются рекомендации, представленные в методах [23, 24]. Комплекс данных экспресс-моделей может иметь вид

$$\left. \begin{aligned} X_{TЭ1}^* &= F_{TЭ}(X_{ТДУД}) + \xi_{TЭ} \\ X_{TЭ2}^* &= F_{TЭ}(X_{ДТИ}) + \xi_{TЭ} \\ &\dots \\ X_{TЭN}^* &= F_{TЭ}(X_{ТДГ}) + \xi_{TЭ} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На основании (2) целесообразно производить построение графиков взаимосвязи КПЭ для последующей их верификации (рис. 5). На рис. 5 представлена матрица графиков гистограмм и корреляционных полей точек взаимосвязи ряда исследуемых КПЭ.

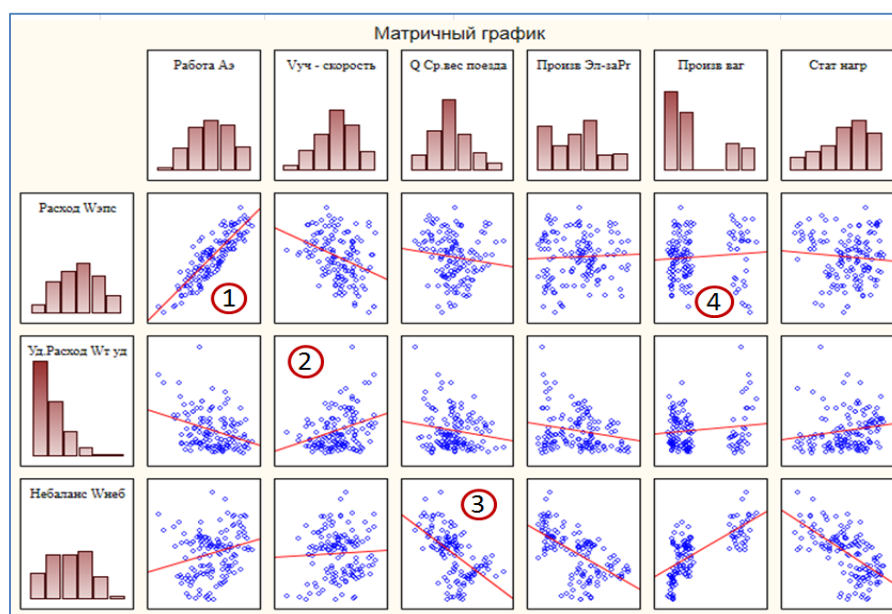
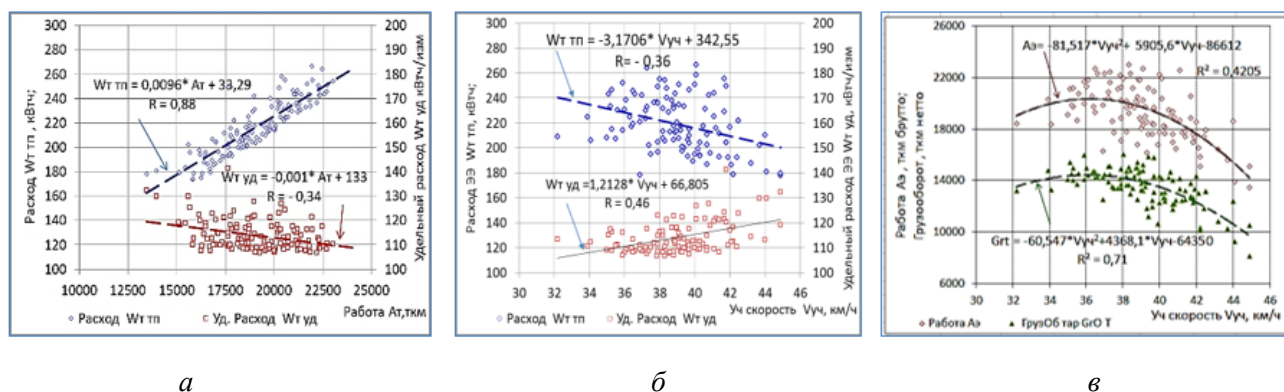


Рис. 5. Пример матричного графика гистограмм и поля точек взаимосвязи КПЭ

На пересечении горизонтальных строк и вертикальных столбцов с видом гистограмм КПЭ представлены корреляционные поля точек их взаимосвязи. Чем меньше степень разброса корреляционного поля точек относительно линий их аппроксимации и чем линия аппроксимации ближе к горизонтальной линии, тем меньше взаимосвязь между исследуемыми КПЭ и тем меньше адекватность построенной экспресс-модели. Так, например, на графике корреляционного поля точек КПЭ *Расход $W_{тп}$* и КПЭ *Работа A_3* (номер 1, рис. 5) отмечена низкая степень их разброса относительно линии аппроксимации, а также высокий наклон последней. Делается вывод об адекватности данной экспресс-модели и о возможности включения КПЭ *Работа A_3* в математическую модель цифрового двойника энергообеспечения тяги поездов. К таким же адекватным экспресс-моделям для КПЭ *Уд. Расход $W_{т уд}$* и КПЭ *Небаланс $W_{неб}$* по обозначенным выше критериям можно отнести графики под номером 2 и 3.

В то же время, например, корреляционное поле между КПЭ *Расход $W_{тп}$* и КПЭ *Производительность вагона* (номер 4, рис. 5) носит «раздвоенный» характер вследствие бимодальной гистограммы и нестационарности реализаций на горизонте исследований. При этом включение подобных КПЭ в модель цифрового двойника не будет отвечать требованиям верификации. Кроме того, верификацию экспресс-моделей необходимо проводить по критерию физической и аналитической обоснованности. В качестве примера проверки адекватности по данному критерию могут служить экспресс-модели, представленные на рис. 6, а, б, в. Так, на рис. 6, а зависимости КПЭ *Расход $W_{тп}$* и КПЭ *Уд. Расход $W_{т уд}$* , построенные в функции КПЭ *Работа A_3* , содержат параметры однофакторных регрессионных уравнений их взаимосвязи и количественную оценку степени адекватности в формате коэффициента корреляции R .

Обе зависимости удовлетворяют требованию верификации по критерию физической и аналитической обоснованности. Данный вывод сделан на основании того, что действительно с ростом выполняемой тонно-километровой работы A_3 на участке объем потребленной электроэнергии, расходуемой на тягу поездов – *Расход $W_{тп}$* , должен также возрастать коэффициент корреляции ($R = 0,88$).



а

б

в

Рис. 6. Пример построения экспресс-моделей КПЭ Расход $W_{т\text{тп}}$, Уд. Расход $W_{т\text{уд}}$ в функции:

а – КПЭ Работа A_3 ; б – Участковая скорость – $V_{уч}$;

в – построение экспресс-моделей КПЭ Работа A_3 и ГрузоОбТар – Grt в функции Участковая скорость – $V_{уч}$

Зависимость КПЭ Уд. Расход $W_{т\text{уд}}$ в функции КПЭ Работа A_3 также адекватна исходя из структуры формирования показателя. С ростом выполняемой тонно-километровой работы A_3 значение показателя будет уменьшаться – коэффициент корреляции ($R = -0,34$). Однако если обратиться к экспресс-модели КПЭ Расход $W_{т\text{тп}}$, построенной в функции КПЭ Участковая скорость $V_{уч}$ (рис. 6, б), то окажется, что её линия тренда обратно пропорциональна участковой скорости $V_{уч}$. – коэффициент корреляции ($R = -0,36$). Данное обстоятельство не согласуется с физикой процесса перемещения грузовых поездов. Очевидно, что потребность в энергии, расходуемой на перемещение поездов, должна с ростом скорости не убывать, а возрастать пропорционально квадрату скорости перемещения.

Разъяснение данного противоречия состоит в следующем: повышение *Участковой скорости* $V_{уч}$ является не первопричиной, а следствием снижения грузопотока поездов на полигоне. На рис. 6, в представлены графики зависимости КПЭ Работа A_3 , и Грузооборот тарифный (ГрузоОбТар – Grt) в функции от КПЭ Участковая скорость $V_{уч}$, ($V_{уч}$ – скорость). Из графиков видно, что максимальная тонно-км работа A_3 на исследуемом полигоне достигалась в объеме 23000 ткм брутто при скорости около 38 км/час. При снижении количества грузовых поездов на участке нелинейно снижаются и КПЭ Работа A_3 и КПЭ ГрузоОбТар – Grt . Как следствие, снижение данных показателей приводит к увеличению межпоездных интервалов, что позволяет грузовым поездам увеличить техническую и участковую скорость. В рассматриваемом примере при снижении КПЭ Работа A_3 от максимально зарегистрированных 20000 до 13000 ед. ткм бр. (то есть на –44 %) участковая скорость $V_{уч}$ возросла до 45 км/час (+18 %). Таким образом, рост участковой скорости $V_{уч}$ с 38 до 45 км/час (рис. 6, б) является следствием уменьшения КПЭ Работа A_3 (рис 6, в), что и приводит к уменьшению КПЭ Расход $W_{т\text{тп}}$ с 225 до 200 ед. кВтч (–11 %), что и отражено на рис. 6, б. Приведенное выше рассуждение показывает, что использование зависимости экспресс-модели КПЭ Расход $W_{т\text{тп}}$ в функции от участковой скорости $V_{уч}$ в отрыве от динамики других КПЭ будет не адекватной для использования в модели цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов.

Реализация *процедуры 8* методологии предусматривает построение динамических реализаций КПЭ процессов энергообеспечения тяги поездов и КПЭ процессов грузовых перевозок хозяйств, обеспечивающих грузовые перевозки [4]. Пример построения подобных реализаций представлен на рис. 2. Однако также целесообразно проводить построение тех реализаций КПЭ процессов, которые посредством анализа их динамики позволят определить степень их стационарности. Для построения реализаций возможно воспользоваться данными табл. 1, а для оценки стационарности – статистическими показателями КПЭ. Так, анализ КПЭ Производительность вагона (см. табл. 2) показывает на более чем 200 %-ное различие значений показателя в интервалах № 1 и 2 (14682, 13620) по отношению к значениям интервалов № 45 и 46 (6400, 6762), что связано с изменением методики расчета показателя. Таким образом, данный показатель не отвечает требованиям стационарности и верификации.

Реализация *процедуры 9* методологии предусматривает:

– агрегирование данных для переменных для многофакторных моделей цифровых двойников из состава ранее исследуемых «приоритетных» КПЭ;

- идентификацию параметров КПЭ, включенных в состав многофакторных моделей цифровых двойников;
- верификацию полученных многофакторных моделей цифровых двойников посредством устранения мультиколлинеарности «приоритетных» КПЭ процессов грузовых перевозок и обеспечивающих их процессов смежных хозяйств и дирекций;
- построение многофакторных моделей цифровых двойников КПЭ процессов энергообеспечения тяги поездов с определением адекватных показателей.

В качестве способа построения моделей используется множественная регрессия [25], пакеты прикладных программ Statistica [26].

Агрегирование данных для переменных для математических многофакторных моделей цифровых двойников, структура которых определена выражением (1), целесообразно производить из состава «приоритетных» КПЭ, ранее исследуемых в экспресс-моделях вида (2). В качестве формы математических многофакторных моделей цифровых двойников предлагается использовать форму линейных многофакторных уравнений регрессии [25]. Опираясь на состав переменных, входящих в выражение (1), выражение, например, для КПЭ *Расход* $W_{т\text{тп}}$, *Уд. Расход* $W_{т\text{уд}}$ и % *Небаланс* $W_{неб}$, можно представить в виде:

$$W_{т\text{тп}}^* \Delta t = a_0 + (a_1 \cdot X_{т\text{дуд}} \Delta t + a_2 \cdot X_{т\text{дт}} \Delta t + \dots + a_m \cdot X_{д\text{ти}} \Delta t) + \xi_{т\text{тп}}, \quad (3)$$

$$W_{т\text{уд}}^* \Delta t = b_0 + (b_1 \cdot X_{т\text{дуд}} \Delta t + b_2 \cdot X_{т\text{дт}} \Delta t + \dots + b_m \cdot X_{д\text{ти}} \Delta t) + \xi_{т\text{уд}}, \quad (4)$$

$$W_{неб}^* \Delta t = c_0 + (c_1 \cdot X_{т\text{дуд}} \Delta t + c_2 \cdot X_{т\text{дт}} \Delta t + \dots + c_m \cdot X_{д\text{ти}} \Delta t) + \xi_{неб}, \quad (5)$$

где $W_{т\text{тп}}^* \Delta t$, $W_{т\text{уд}}^* \Delta t$, $W_{неб}^* \Delta t$ – расчетные дискретные (цифровые) оценки фактических дискретных значений процесса показателей $W_{т\text{тп}} \Delta t$, $W_{т\text{уд}} \Delta t$, $W_{неб} \Delta t$ во временном интервале Δt ; $X_{т\text{дуд}} \Delta t$, $X_{т\text{дт}} \Delta t$, \dots , $X_{д\text{ти}} \Delta t$ – фактические дискретные наблюдаемые значения «приоритетных» КПЭ процессов территориальных дирекций ТДУД, ТДТ, ТДИ во временном интервале Δt ; a_0 , b_0 , c_0 – свободные члены линейных многофакторных уравнений регрессии (3)–(5); a_1 , a_2 , \dots , a_m ; b_1 , b_2 , \dots , b_m ; c_1 , c_2 , \dots , c_m – параметры моделей (коэффициенты линейных многофакторных уравнений регрессии (3)–(5) при КПЭ процессов, поиск которых осуществляется методами идентификации [6, 7];

$\xi_{т\text{тп}}$, $\xi_{т\text{уд}}$, $\xi_{неб}$ – стохастические составляющие цифровых моделей уравнений регрессии (3)–(5) из-за неучтенных факторов.

Для корректного агрегирования переменных в уравнениях вида (3)–(5) должен быть устранен эффект мультиколлинеарности переменных, который основан на подборе и использовании в многофакторном уравнении регрессии переменных с уровнем их взаимной корреляционной связи не более $R = 0,6$. В предлагаемой методологии устранение эффекта мультиколлинеарности переменных производится посредством использования дендрограммы переменных, выполненной методом кластерного анализа (см. рис. 4, в). При этом из дендрограммы выбираются те переменные, которые: принадлежат к разным группам кластеров; наиболее подходят к независимой переменной по физическому смыслу из состава переменных, включенных в кластер. Так, для зависимого КПЭ *Расход* $W_{т\text{тп}}$ при подборе независимых переменных в уравнении вида (3) следует рассматривать кластеры из дендрограммы рис. 4, в, уровень взаимосвязи которых будет $R \leq 0,6$. Так, из кластера 1 может быть выбран только один из сильно коррелированных КПЭ ($R = 0,75$), например, «Погрузка». Из кластера 2 целесообразно выбрать независимый КПЭ *Работа А*, и т. д. Таким образом, в состав переменных предварительного уравнения для выражения (3) были включены 15 КПЭ, характеризующих энергообеспечение тяги поездов и КПЭ из состава кластеров рис. 4, в. Результаты идентификации параметров данного уравнения представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты идентификации параметров пятнадцатифакторного уравнения регрессии
для цифрового двойника КПЭ Расход $W_{т.тн}$**

№	КПЭ	Скорректир. коэффициент регрессии Beta	Коэффициенты регрессионного уравнения $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$	Достигнутый p-level при идентификации (допустимый $p = 0,05$)
0	<i>Свободный член уравнения a_0</i>		<i>-413,387</i>	<i>0,000002</i>
1	Погрузка	-0,018	-0,001	0,758316
2	<i>Грузооборот Тарифный – Grt</i>	<i>0,322</i>	<i>0,005</i>	<i>0,015433</i>
3	Грузооборот Эксплуатационный – Gra	-0,420	-0,007	0,094373
4	<i>Работа тонно-км А Эл-зов</i>	<i>0,903</i>	<i>0,010</i>	<i>0,000001</i>
5	<i>Небаланс Wнеб</i>	<i>0,271</i>	<i>175,593</i>	<i>0,000001</i>
6	Рабочий Парк Эл-зов – Rp	0,228	0,101	0,212433
7	$V_{уч}$ – скорость участковая	0,118	1,000	0,111155
8	Q – Средний вес поезда	-0,102	-0,021	0,120915
9	S – Срeнесуточн пробег Эл-за	0,103	0,041	0,354482
10	Производительность Эл-за – Pr	-0,072	-0,010	0,682518
11	Простой вагона на 1-ой станции	-0,048	-0,439	0,658401
12	Оборот Грузового вагона	0,545	5,762	0,101299
13	<i>Производительность вагона</i>	<i>0,845</i>	<i>0,006</i>	<i>0,000000</i>
14	Рабочий Парк Грузового вагона	0,298	0,000	0,482537
15	<i>Статическая нагрузка на ось</i>	<i>0,267</i>	<i>5,757</i>	<i>0,000106</i>

Идентификация параметров КПЭ в уравнении вида (3) производилась в пакете программ Statistica [26]. В табл. 2 представлены следующие показатели: **Beta** – скорректированный коэффициент регрессии, характеризующий степень влияния КПЭ; коэффициенты регрессионного уравнения (3) для моделирования КПЭ Расход $W_{т.тн}$; **p-level** – достигнутый в результате идентификации уровень значимости и сравниваемый с допустимым уровнем $p = 0,05$.

Точность 15-факторной модели показателя Расход $W_{т.тн}$ характеризуется при этом следующими показателями: множественный коэффициент корреляции (*Multiple R*) = 0,954; множественный коэффициент детерминации (*Multiple R²*) = 0,911; скорректированный коэффициент детерминации (*Adjusted R²*) = 0,899; критерий Фишера $F(15,122) = 82,9$, что намного больше нормативного $F_{табл} = 1,7$ при уровне значимости $p < 0,05$; стандартная ошибка оценки (*Std. Err. of Estimate*) = 7,032; средняя абсолютная ошибка прогноза (*MAPE*) по всей реализации = 2,26 %. Однако, несмотря на полученную высокую точность согласно методике, изложенной для пакета программ Statistica, пригодными для дальнейшего использования могут быть только те КПЭ, у которых достигнутый p-level при идентификации будет меньше принятого при расчетах, т. е. $p < 0,05$. В табл. 2 таких переменных только пять (выделены курсивом и красным цветом).

В рамках этапа методологии была произведена оптимизация составленного 15-факторного регрессионного уравнения (3), которое заключалось в последовательном исключении из уравнения переменных КПЭ с показателем уровня значимости меньше допустимого, т. е. $p\text{-level} \leq 0,05$. Кроме того, оптимизация КПЭ уравнения должна производиться с учетом ранее описанных методов выбора переменных при использовании дендрограммы (см. рис. 4, в) и результатов ранее описанного анализа корректности экспресс-моделей. Подбор параметров с устранением эффекта мультиколлинеарности допустимо производить также в автоматизированном режиме в пакете программ Statistica из состава КПЭ, предварительно включенных в состав многофакторных моделей вида (3).

Параметры одного из возможных вариантов полученного четырехфакторного регрессионного уравнения после процедуры оптимизации представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты параметров четырехфакторного уравнения регрессии
для цифрового двойника КПЭ Расход $W_{т.тп}$**

№	КПЭ	Скорректир. коэффициент регрессии Beta	Коэффициенты регрессионного уравнения (3) $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$	Достигнутый p-level – при идентификации (допустимый $p = 0,05$)
0	<i>Свободный член уравнения a_0</i>		107,371	0,002
1	<i>Работа тонно-км А Эл-зов</i>	0,964	0,010	0,000
2	<i>$V_{уч}$ – скорость участковая</i>	0,280	2,364	0,000
3	<i>Q – Средний вес поезда</i>	-0,243	-0,051	0,000
4	<i>Простой вагона на 1-й станции</i>	0,150	1,366	0,003

Точность модели показателя Расход $W_{т.тп}$ при данной конфигурации регрессионного уравнения несколько хуже, чем у исходной 15-факторной, но такая модель более устойчива к вариации данных.

Характеристики адекватности 4-факторного уравнения регрессии для цифрового двойника КПЭ процесса Расход $W_{т.тп}$: множественный коэффициент корреляции составляет (*Multiple R*) = 0,908; множественный коэффициент детерминации (*Multiple R²*) = 0,824; скорректированный коэффициент детерминации (*Adjusted R²*) = 0,819; критерий Фишера $F(4,133) = 156,13$, что намного больше нормативного $F_{табл} = 2,44$ при уровне значимости $p < 0,05$; стандартная ошибка оценки (*Std. Err. of Estimate*) = 9,438.

Для оценки параметров КПЭ Уд. Расход $W_{т.уд}$ в уравнении вида (4) могут быть использованы другие переменные территориальных дирекций ТДУД, ТДТ, ТДИ, представленные на схеме рис. 1.

Для определения параметров уравнения (4) и последующей верификации зависимостей КПЭ Уд. Расход $W_{т.уд}$ было составлено предварительное уравнение из 12 КПЭ, представленных в дендрограмме на рис. 4, в. Предполагается, что из состава переменных предварительного уравнения должны быть исключены КПЭ, характеризующие энергообеспечение тяги поездов. Результаты идентификации параметров предварительного уравнения для моделирования КПЭ Уд. Расход $W_{т.уд}$ представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты идентификации параметров 12-факторного уравнения регрессии
для цифрового двойника КПЭ Уд. Расход $W_{т.уд}$**

№	КПЭ	Скорректир. коэффициент регрессии Beta	Коэффициенты регрессионного уравнения (4) $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$	Достигнутый p-level – при идентификации (допустимый $p = 0,05$)
0	Свободный член уравнения a_0		-76,4509	0,070459
1	Работа тонно-км А электровозов	-0,359404	-0,0011	0,077635
2	Рабочий Парк электровозов – Рр	0,501556	0,0605	0,106053
3	$V_{уч}$ – скорость участковая	0,124752	0,2881	0,478320
4	Q – Средний вес поезда	-0,072825	-0,0041	0,653385
5	S – Среднесуточн пробег электровоза	0,382222	0,0416	0,096793
6	Производительность электровоза – Рг	-0,160959	-0,0061	0,604625
7	Простой вагона на 1-й станции	0,347630	0,8642	0,111061
8	Статическая нагрузка на ось	0,381123	2,2403	0,004190
9	% порожн. пробега ваг. к общему	0,300355	0,9190	0,009918
10	Рабочий Парк Грузового вагона	-0,611552	-0,0002	0,502525
11	Производительность вагона	0,511288	0,0009	0,146255
12	Оборот Грузового вагона	0,473817	1,3698	0,487317

Точность представленной в табл. 4 модели показателя Уд. Расход $W_{т.уд}$ характеризуется следующими показателями: множественный коэффициент корреляции составляет (*Multiple R*) = 0,756; множе-

ственный коэффициент детерминации ($Multiple R^2$) = 0,572; скорректированный коэффициент детерминации ($Adjusted R^2$) = 0,531; критерий Фишера $F(12,125) = 13,9$, что намного больше нормативного $F_{табл} = 1,8$ при уровне значимости $p < 0,05$; стандартная ошибка оценки ($Std. Err. of Estimate$) = 4,155.

Оптимизация данного 12-факторного регрессионного уравнения производилась методом, предусмотренным для пакета программ Statistica, и с учетом ранее описанных методов выбора переменных при использовании дендрограммы (рис. 4, в). Параметры одного из возможных вариантов полученного четырехфакторного регрессионного уравнения после процедуры оптимизации представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Результаты параметров 4-факторного уравнения регрессии
для цифрового двойника КПЭ Уд. Расход $W_{т\ уд}$**

№	КПЭ	Скорректир. коэффициент регрессии Beta	Коэффициенты регрессионного уравнения $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$	Достигнутый p-level – при идентификации (допустимый $p = 0,05$)
0	<i>Свободный член уравнения a_0</i>		31,73057	0,013708
1	<i>Работа тонно-км А Эл-зов</i>	-0,367802	-0,00109	0,000454
2	<i>Рабочий Парк электровозов – Rp</i>	0,450876	0,05434	0,000013
4	<i>$V_{уч}$ – скорость участковая</i>	0,259226	0,59868	0,000525
3	<i>% порожн. пробега ваг. к общему</i>	0,494295	1,51247	0,000000

Характеристики адекватности 4-факторного уравнения регрессии для цифрового двойника КПЭ Расход $W_{т\ уд}$: множественный коэффициент корреляции составляет ($Multiple R$) = 0,69; множественный коэффициент детерминации ($Multiple R^2$) = 0,48; скорректированный коэффициент детерминации ($Adjusted R^2$) = 0,46; критерий Фишера $F(4,133) = 30,13$, что намного больше нормативного $F_{табл} = 2,44$ при уровне значимости $p < 0,05$; стандартная ошибка оценки ($Std. Err. of Estimate$) = 4,462.

По аналогии с приведенным подходом может быть построена модель цифрового двойника для КПЭ Небаланс электроэнергии, % (Небаланс $W_{неб}$).

Реализация процедуры 10 методологии предусматривает по результатам идентификации проведение валидации построенных моделей цифровых двойников, например, для КПЭ Расход $W_{т\ тп}$ и для КПЭ Уд. Расход $W_{т\ уд}$ (табл. 6 и рис. 7).

Таблица 6

**Результаты фактических, моделируемых значений реализации КПЭ Расход $W_{т\ тп}$
и оценки адекватности моделирования**

Дата	Факт Расход ЭЭ $W_{т\ тп}$	Модель Расход $W_{т\ тп}$ (4 фактора)	Остаток (Факт – Модель) $W_{т\ тп}$	Относит. ошибка модели $W_{т\ тп}$	Факт Удельный Расход ЭЭ $W_{т\ уд}$	Модель Удельный Расход $W_{т\ уд}$ (4 фактора)	Остаток (Факт – Модель) $W_{т\ уд}$	Относит. ошибка модели $W_{т\ уд}$
1	255,4	240,3	15,1	5,9 %	124,3	118,8	5,5	4,4 %
2	242,2	217,8	24,4	10,6 %	127,7	115,3	12,4	9,7 %
...								
45	236,3	231,7	4,6	1,6 %	116,3	114,1	0,4	1,9 %
46	243,3	236,2	7,1	1,2 %	115,7	113,4	1,7	2,0 %
Минимум	173,7	169,5	-14,1	-8,5 %	106,7	104,0	-8,9	-8,4 %
Максимум	266,5	256,4	35,2	12,7 %	141,4	126,9	17,0	12,0 %
МАРЕ-оценка				3,6 %				3,1 %

Валидация согласно рекомендациям метода кросс-валидации [28, 29] предусматривает оценку точности моделирования показателей в сопоставлении с фактическими данными за весь период идентификации – 138 месяцев. О результатах оценки адекватности модельных реализаций КПЭ Расход $W_{т\ тп}$ и КПЭ Уд. Расход $W_{т\ уд}$ можно судить по данным, представленным в табл. 6 и на рис. 7.

Построенные модельные реализации процесса энергообеспечения тяги поездов КПЭ *Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП, кВтч (Расход $W_{т\text{ тп}}$)* были использованы в работе [30] для оценки ресурса нагрузочной способности СТЭ на одном из территориальных участков дирекции Трансэнерго ОАО «РЖД».

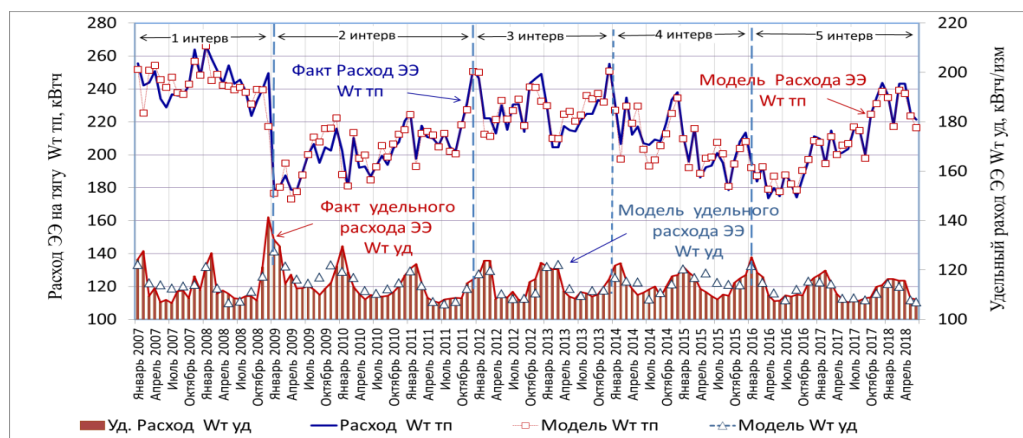


Рис. 7. Реализации фактических и модельных значений КПЭ *Расход $W_{т\text{ тп}}$* и *Уд. Расход $W_{т\text{ уд}}$*

Выводы

1 Использование на железнодорожном транспорте цифровых технологий потребовало разработать методологию построения моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги грузовых поездов для территориальных филиалов компании ОАО «РЖД», включающую свыше пятнадцати различных методов, способов и программных продуктов. Методология построена на основании матричной структуры взаимодействия процесса грузовых перевозок с обеспечивающими его процессами территориальных дирекций, в том числе и с процессом энергообеспечения тяги грузовых поездов.

2 В качестве переменных в математических моделях цифровых двойников процесса энергообеспечения тяги поездов целесообразно использовать «приоритетные» показатели процессов грузовых перевозок и показатели хозяйств, обеспечивающих грузовые перевозки, которые в наибольшей степени оказывают влияние на динамику энергообеспечения тяги поездов.

3 Для корректного построения моделей цифровых двойников энергообеспечения тяги поездов, предназначенной для использования в дирекции Трансэнерго, целесообразно производить процедуру верификации закономерностей как на основании физически обоснованного и аналитического анализа результатов моделирования, проведенного как на базе комплекса однофакторных экспресс-моделей, так и на базе многофакторных моделей цифровых двойников при окончательном их построении.

4 Принятие решений о составе параметров моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов и их идентификация позволяют производить моделирование динамических реализаций данных процессов после валидации моделей. На исследуемых полигонах территориальных филиалов ОАО «РЖД» достигнута высокая точность моделирования процессов энергообеспечения поездов. Погрешность моделирования не превышает уровня 3,1–3,7 %.

Список литературы

- 1 Распоряжение правительства от 19 марта 2019 года № 466-р «Об утверждении долгосрочной Программы развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года» // Digital Russia : [сайт]. – URL: <http://d-russia.ru/utverzhdyon-plan-perehoda-rzhd-na-tsifrovuyu-zheleznuyu-dorogu.html> (дата обращения: 20.05.2023).
- 2 ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 10 с.

References

- 1 Government Decree dated March 19, 2019 No. 466-r “On Approval of the Long-Term Development Program of JSC Russian Railways until 2025” // Digital Russia : [website]. – URL: <http://d-russia.ru/utverzhdyon-plan-perehoda-rzhd-na-tsifro vuyu-zheleznuyu-dorogu.html> (date of access: 05/20/2023).
- 2 GOST 57700.37–2021. Computer Models and Modeling. Digital twins of products. General Provisions. – Moscow : Russian Institute for Standardization, 2021. – 10 p.

3 **ГОСТР 57188–2016.** Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 8 с.

4 **Вентцель, Е. С.** Теория случайных процессов и её инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Москва : Наука, 1991. – 384 с. – ISBN 5-02-014125-9.

5 **Айвазян, С. А.** Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. – Москва : Юнити, 1998. – 1022 с.

6 **Эйкхофф, П.** Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния / П. Эйкхофф, В. А. Лотоцкий, А. С. Мандель ; под редакцией Н. С. Райбмана. – Москва : Мир, 1975. – 686 с.

7 Дисперсионная идентификация / Н. С. Райбман, В. В. Капитоненко, Ф. А. Овсепян, П. М. Варлаки ; под редакцией Н. С. Райбмана. – Москва : Наука. Гл. ред. физико-математической литературы, 1981. – 336 с.

8 **Митрофанов, А. Н.** Моделирование процессов прогнозирования и управления электропотреблением тяги поездов : монография / А. Н. Митрофанов. – Самара : СамГАПС, 2005. – 174 с. – ISBN 5-98941-020-4.

9 **Митрофанов, А. Н.** Прогнозирование показателей энергообеспеченности перевозочного процесса на базе многофакторных моделей / А. Н. Митрофанов, Г. М. Третьяков, С. В. Копейкин // Электротехника. – № 3. – Москва : СамГУПС, 2017. – С. 12–17. – EDN XWVTVN.

10 **Жарков, Ю. И.** Автоматизация диагностирования систем релейной защиты и автоматики электроустановок : монография / Ю. И. Жарков, В. Г. Лысенко, Е. А. Стороженко. – Москва : Маршрут, 2005. – 175 с. – ISBN 5-89035-253-9.

11 Комплексное решение прикладных технологических задач автоматизации тягового электрообеспечения / Ю. И. Жарков, О. В. Кубкина, В. Г. Лысенко, Н. А. Попова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – № 1 (81). – 2021. – С. 130–139. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_130.

12 **Бодров, П. А.** Предиктивный анализ работы технических средств электрифицированных железных дорог в целях повышения их надежности / П. А. Бодров, Ю. И. Жарков, А. Л. Ганашек // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – № 3 (56). – 2021. – С. 4–6. – EDN PEXXUJ.

13 **Шеер, А.-В.** ARIS – моделирование бизнес-процессов / А.-В. Шеер. – Вильямс, 2000. – 175 с. – ISBN 978-5-8459-1449-1.

3 **GOST 57188–2016.** Numerical modeling of physical processes. Terms and Definitions. – Moscow : Standartinform, 2016. – 8 p.

4 **Ventsel, E. S.** Theory of random processes and its engineering applications / E. S. Ventsel, L. A. Ovcharov. – Moscow : Nauka Publ., 1991. – 384 p. – ISBN 5-02-014125-9.

5 **Ayvazyan, S. A.** Applied Statistics and Fundamentals of Econometrics / S. A. Ayvazyan, V. S. Mkhitaryan. – Moscow : Unity Publ., 1998. – 1022 p.

6 **Eickhoff, P.** Fundamentals of Identification of Control Systems. Estimation of parameters and state / P. Eickhoff, V. A. Lototsky, A. S. Mandel ; edited by N. S. Raibman. – Moscow : Mir, 1975. – 686 p.

7 Dispersion identification / N. S. Raibman, V. V. Kapitonenko, F. A. Ovsepyan, P. M. Varlaki ; edited by N. S. Raibman. – Moscow : Science. Ch. ed. Physics and Mathematics Literature, 1981. – 336 p.

8 **Mitrofanov, A. N.** Modeling of processes of forecasting and control of electric power consumption of train traction : monograph / A. N. Mitrofanov. – Samara : SamGAPS, 2005. – 174 p. – ISBN 5-98941-020-4.

9 **Mitrofanov, A. N.** Forecasting indicators of the energy supply of the transportation process on the basis of multifactorial models / A. N. Mitrofanov, G. M. Tretyakov, S. V. Kopeykin // Electrical engineering. – No. 3. – Moscow : SamGUPS, 2017. – P. 12–17. – EDN XWVTVN.

10 **Zharkov, Yu. I.** Automation of diagnosing systems of relay protection and automation of electrical installations: monograph / Yu. I. Zharkov, V. G. Lysenko, E. A. Storozhenko. – Moscow : Route, 2005. – 175 p. – ISBN 5-89035-253-9.

11 Complex solution of applied technological problems of automation of traction power supply / Yu. I. Zharkov, O. V. Kubkina, V. G. Lysenko, N. A. Popova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – No. 1 (81). – 2021. – P. 130–139. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_130.

12 **Bodrov, P. A.** Predictive analysis of the work of technical means of electrified railways in order to improve their reliability / P. A. Bodrov, Yu. I. Zharkov, A. L. Ganashchek // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – No. 3 (56). – 2021. – P. 4–6. – EDN PEXXUJ.

13 **Scheer, A.-W.** ARIS – Business Process Modeling / A.-W. Scheer. – Williams, 2000. – 175 p. – ISBN 978-5-8459-1449-1.

14 **Никонов, В. В.** КОМПАС-3D : создание моделей и 3D-печать / В. В. Никонов. – Санкт-Петербург : Питер, 2020. – 208 с. – ISBN 978-5-4461-1456-6.

15 **Парменер, Д.** Ключевые показатели эффективности : разработка, внедрение и использование успешных KPI / Д. Парменер. – Нью-Джерси, США : John Wiley & Sons, inc., 2007. – 233 с. – ISBN 0-470-09588-1.

16 **Митрофанов, А. Н.** Подход к построению моделей цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов / А. Н. Митрофанов, Ю. И. Жарков, С. А. Окладов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 92–102. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_92.

17 Методологическое обоснование построения цифровых двойников процессов энергообеспечения тяги поездов / А. Н. Митрофанов, С. А. Окладов // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 3 (99). – С. 24–32. – EDN HFMEMR.

18 **Окладов, С. А.** Формирование моделей и баз данных бизнес-процессов энергообеспечения для дирекции Трансэнерго ОАО «РЖД» / С. А. Окладов // Наука и образование транспорту. – 2023. – № 1. – С. 286–290. – EDN CRWITS.

19 **Дейт, К. Дж.** Введение в системы баз данных / К. Дж. Дейт. – 8-е изд. – Москва : Вильямс, 2005. – 1328 с. – ISBN 5-8459-0788-8.

20 **Майер-Шенбергер, В.** Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живём, работаем и мыслим / В. Майер-Шенбергер, К. Кукиер ; пер. с англ. Инны Гайдюк. – Москва : Манн, Иванов, Фербер, 2014. – 240 с. – ISBN 987-5-91657-936-9.

21 **Жамбю, М.** Иерархический кластер-анализ и соответствия / М. Жамбю. – Москва : Финансы и статистика, 1988. – 345 с.

22 **Григорьев, Ю. Д.** Методы оптимального планирования эксперимента: линейные модели : учебное пособие / Ю. Д. Григорьев. – Санкт-Петербург : Лань, 2015. – 320 с.

23 **Брюс, П.** Разведочный анализ данных / П. Брюс, Э. Брюс // Практическая статистика для специалистов Data Science. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2018. – С. 19–58. – 304 с.

24 **Миронов, А. М.** Методы верификации программ / А. М. Миронов. – Москва : ДМК Пресс, 2023. – 332 с.

25 **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия / Н. Дрейпер, Г. Смит. – 3-е изд. – Москва : Диалектика, 2007. – 912 с. – ISBN 0-471-17082-8.

14 **Nikonov, V. V.** COMPASS-3D : Model creation and 3D printing // Saint Petersburg : Piter, 2020. – 208 p. – ISBN 978-5-4461-1456-6.

15 **Parmenter, D.** Key Performance Indicators : Developing, Implementing and Using Winning KPI's. – New Jersey, USA : John Wiley & Sons, inc., 2007. – 233 p. – ISBN 0-470-09588-1.

16 **Mitrofanov, A. N.** Approach to building digital twin models of business processes of energy supply for train traction / A. N. Mitrofanov, Yu. I. Zharkov, S. A. Okladov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 92–102. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_92.

17 Methodological justifications for the construction of digital twins of business processes for energy supply of traction of trains / A. N. Mitrofanov, S. A. Okladov // Bulletin of Transport of the Volga Region. – 2023. – No. 3 (99). – P. 24–32. – EDN HFMEMR.

18 **Okladov, S. A.** Formation of models and databases of business processes of energy supply for the Directorate of Transenergo of JSC “Russian Railways” / S. A. Okladov // Science and Education for Transport. – 2023. – No. 1. – P. 286–290. – EDN CRWITS.

19 **Date, C. J.** Introduction to Database Systems / C. J. Date. – 8th ed. – Moscow : Williams Publ., 2005. – 1328 p. – ISBN 5-8459-0788-8.

20 **Mayer-Schönberger, V.** Big Data. A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think / V. Mayer-Schönberger, K. Cuquier. – Moscow : Mann, Ivanov, Ferber, 2014. – 240 p. – ISBN 987-5-91657-936-9.

21 **Zhambyu, M.** Hierarchical Cluster-Analysis and Correspondences / M. Zhambyu. – Moscow : Finance and Statistics Publ., 1988. – 345 p.

22 **Grigor'ev, Y. D.** Methods of optimal experimental planning: linear models : textbook / Y. D. Grigor'ev. – Saint Petersburg : Lan', 2015. – 320 p.

23 **Bruce, P.** Exploratory Data Analysis / P. Bruce, E. Bruce // Practical Statistics for Data Science Specialists. – Saint Petersburg : BHV-Petersburg Publ., 2018. – P. 19–58. – 304 p.

24 **Mironov, A. M.** Methods of program verification / A. M. Mironov. – Moscow : DMK Press, 2023. – 332 p.

25 **Draper, N.** Applied regression analysis / N. Draper, G. Smith. – 3rd ed. – Moscow : Dialectics Publ., 2007. – 912 p. – ISBN 0-471-17082-8.

26 **Боровиков, В. П.** Statistica : искусство анализа данных на компьютере / В. П. Боровиков. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – 688 с. – ISBN 5-272-00078-1.

27 **Карлберг, К.** Регрессионный анализ в Microsoft Excel / К. Карлберг. – Москва : Вильямс, 2017. – 400 с. – ISBN 978-5-9908462-7-2.

28 **Арло, С.** Обзор процедур перекрестной проверки для выбора модели // С. Арло, А. Селисс // Статист. – 2010. – Вып. 4. – С. 40–79. – DOI 10.1214/09-SS054.

29 Верификация и валидация компьютерных моделей / А. В. Сальников, М. С. Французов, К. А. Виноградов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 9. – С. 100–115. – DOI 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.

30 **Митрофанов, А. Н.** Построение моделей цифровых двойников электротехнической инфраструктуры железных дорог для оценки ресурса её нагрузочной способности / А. Н. Митрофанов, М. А. Гаранин, С. А. Окладов // Электротехника. – 2023. – № 10. – С. 2–7. – DOI 10.53891/00135860_2023_10_2.

26 **Borovikov, V. P.** Statistica : The Art of Data Analysis on a Computer / V. P. Borovikov. – 2nd ed. – Saint Petersburg : Piter, 2003. – 688 p. – ISBN 5-272-00078-1.

27 **Karlberg, K.** Regression Analysis in Microsoft Excel / K. Karlberg. – Moscow : Williams, 2017. – 400 p. – ISBN 978-5-9908462-7-2.

28 **Arlot, S.** A survey of cross-validation procedures for model selection / S. Arlot, A. Celisse // Statistics Surveys. – 2010. – Iss. 4. – DOI 10.1214/09-SS054.

29 Verification and validation of computer models / A. V. Salnikov, M. S. Frantsuzov, K. A. Vinogradov [et al.] // BMSTU Journal of Mechanical Engineering. – 2022. – No. 9. – P. 100–115. – DOI 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.

30 **Mitrofanov, A. N.** Construction of models of digital twins of the elektrotechnical infrastructure of railways for assessing the resource of its loading capacity / A. N. Mitrofanov, M. A. Garanin, S. A. Okladov // Elektrotehnika. – 2023. – No. 10. – P. 2–7. – DOI 10.53891/00135860_2023_10_2.

A. N. Mitrofanov, Yu. I. Zharkov, S. A. Okladov

METHODOLOGY FOR DESIGNING MODELS OF DIGITAL TWINS OF TRAIN TRACTION POWER SUPPLY PROCESSES

Abstract. The paper presents a methodology for designing models of digital twins of train traction energy supply processes, which provides the correct selection of factors and identification of parameters of a multifactor model for the territorial branches of JSC Russian Railways.

The following processes of power supply were considered: electricity consumption for traction, specific electricity consumption, imbalance of traction power supply. As independent variables of the model, the processes of freight transportation and the processes to ensure them were studied: cargo loading, cargo turnover, train speed, indicators of the use of electric locomotives, wagons, etc. According to the results of the validation procedure, it was established that it was possible to simulate the dynamic implementation of the processes of power supply of train traction with an error of no more than 3.1–3.7% of the actual values.

Keywords: digital twins, express models of processes, energy supply, train traction, correlation, cluster analysis, verification of a multivariate model of a digital twin.

For citation: Mitrofanov, A. N. Methodology for designing models of digital twins of train traction power supply processes / A. N. Mitrofanov, Yu. I. Zharkov, S. A. Okladov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 82–99. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_82.

Сведения об авторах

Митрофанов Александр Николаевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: almit77@mail.ru

Information about the authors

Mitrofanov Alexander Nikolayevich

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Power Supply of Railway Transport»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: almit77@mail.ru

Жарков Юрий Иванович

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Автоматизированные системы
электрообеспечения»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: zharkov43@gmail.com

Окладов Сергей Анатольевич

Самарский государственный университет путей
сообщения (СамГУПС),
кафедра «Электрообеспечение железнодорожного
транспорта»,
старший преподаватель,
e-mail: okladov@samgups.ru

Zharkov Yury Ivanovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Automated Power Supply Systems»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: zharkov43@gmail.com

Okladov Sergey Anatolievich

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Power Supply of Railway Transport»,
Senior Lecturer,
e-mail: okladov@samgups.ru

В. В. Сироткин

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ *

Аннотация. Рассмотрены наиболее эффективные способы экономии топливно-энергетических ресурсов, используемых на железнодорожном транспорте. Предложена система дополнительного питания тяговой сети (система ДПТС), которая позволяет объединить наиболее перспективные энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. Благодаря использованию нетрадиционного источника энергии и современного электромеханического преобразователя вентильно-индукторного типа, подключенного к тяговой железнодорожной сети, обеспечивается вторичное использование энергии рекуперации, улучшается качество работы системы тягового электроснабжения путем выравнивания напряжения в тяговой железнодорожной сети, а также снижаются потери энергии благодаря более коротким контурам протекающих токов. С использованием программного комплекса MATLAB/Simulink выполнен расчет одного из вариантов совместной работы предлагаемой системы ДПТС и тяговой железнодорожной сети.

Ключевые слова: энергоэффективность, электрический подвижной состав, система тягового электроснабжения, вентильно-индукторный генератор, инерционный накопитель энергии, рекуперативное торможение, имитационное моделирование.

Для цитирования: Сироткин, В. В. Эффективное использование энергии рекуперации в тяговой сети электроснабжения / В. В. Сироткин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 100–109. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_100.

Введение

Железнодорожный транспорт всегда был и остается крупнейшим потребителем топливно-энергетических ресурсов, на приобретение которых компания ОАО «РЖД» расходует сотни миллиардов рублей в год. Поэтому разработка методов, способов и средств снижения затрат энергии на тягу поездов является актуальной задачей для дальнейшей эффективной деятельности компании.

В Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года обособлена необходимость «сокращения удельного расхода топлива и электроэнергии на тягу поездов...», а также реализация «возможности применения на локомотиве нескольких источников энергии» [1].

В связи с постоянным увеличением цен на электрическую энергию специалисты железнодорожной отрасли, инженеры и ученые научно-исследовательских институтов и конструкторских бюро разрабатывают комплексы мер, которые направлены на снижение и экономию энергетических затрат.

Для экономии электроэнергии в сфере перевозочного процесса применяются различные способы, такие как: использование тягового оборудования, имеющего более высокий номинальный коэффициент полезного действия (КПД); применение системы автоматизированного ведения тягового подвижного состава при выборе энергооптимального режима движения без отклонений от расписания и с соблюдением безопасности пассажиров и перевозимых грузов; применение рекуперативного торможения на электрифицированных участках железнодорожных путей; создание и внедрение тягового подвижного состава нового поколения (например, локомотивов на газомоторном топливе); применение двенадцатипульсовой схемы выпрямления, которая позволяет преобразовывать переменный ток в постоянный на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог; внедрение современных автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии с централизованным управлением; модернизация схем системы электроснабжения тяговых и нетяговых нужд по критериям энергоэффективности; разработка интеллектуальных систем управления тяговым электроприводом локомотивов; разработка и использование новых высококачественных смазочных материалов с различными присадками, эффективно воздействующими на величину потребляемых топливно-энергетических ресурсов.

* Работа выполнена в рамках гранта банка ВТБ (ПАО) на выполнение молодыми учеными научных работ по теме «Повышение эффективности рекуперативного торможения электрического подвижного состава за счет использования инерционных накопителей энергии».

Все перечисленные выше способы имеют достоинства и недостатки, которые подробно изложены в коллективном научном труде ученых и специалистов железнодорожной отрасли [2]. В целом любой из этих способов позволяет снизить энергетические затраты, но требует постоянного технического обслуживания и ремонта для сохранения работоспособного состояния оборудования.

Для поддержания конкурентоспособности и рентабельности услуг железнодорожного транспорта грузового или пассажирского сообщения необходимо применять комплексные технические решения, в которых будут объединены существующие способы и технологии энергосбережения с соблюдением обязательных требований в области охраны окружающей среды и экологии.

В последние годы трендом является применение комплексных технических решений с использованием современных средств электромеханики, в том числе в области железнодорожного транспорта, при этом получены существенные результаты, иногда сопровождаемые синергетическим эффектом, например, технические предложения, изложенные в [3, 4].

В настоящее время устройства электромеханики и преобразовательной техники интенсивно развиваются. Появляется возможность использовать современные достижения в этой области для дальнейшего развития энергосберегающих технологий для железнодорожного транспорта.

Одним из возможных путей эффективного решения поставленных задач по снижению энергозатрат на тягу поездов является использование нетрадиционных, экологически более безопасных источников электрической энергии для электроснабжения электрического подвижного состава (ЭПС), реализованных на базе перспективных электромеханических преобразователей.

Основная часть

Предлагается объединить наиболее перспективные энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте в одной системе ДПТС. Такая система ДПТС (рис. 1) содержит в себе вентильно-индукторную машину (ВИМ), работающую как генератор (ВИГ), вал которого через управляемую электромагнитную муфту (УЭММ) соединен с источником механической энергии. В качестве такого источника может выступать устройство, преобразовывающее энергию ветра (ветроэлектрическая установка (ВЭУ)) или энергию ниспадающего потока малых рек (гидроэлектростанция (ГЭС)).

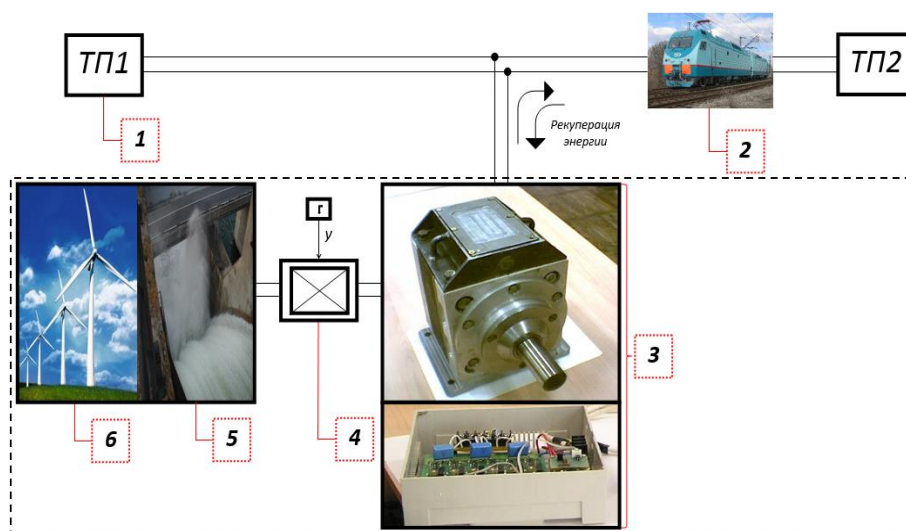


Рис. 1. Структурная схема предлагаемой системы ДПТС:

- 1 – тяговые подстанции (ТП1, ТП2); 2 – электровоз; 3 – вентильно-индукторный генератор и система управления (ВИГ и СУ); 4 – управляемая электромагнитная муфта (УЭММ), у – управляющее воздействие; 5 – гидроэлектростанция (ГЭС); 6 – ветроэлектрическая установка (ВЭУ)

Данная система ДПТС позволяет как генерировать электрическую энергию, так и накапливать ее во вращающемся роторе. В отличие от ранее предлагаемой конструкции [5], содержащей инерционный накопитель энергии на валу электрической машины, предлагается существенно упростить конструкцию путем передачи функции инерционного накопителя энергии ротору ВИМ. Ротор ВИМ пассивный (без обмотки), он позволяет выдерживать без разрушения высокие частоты вращения на уровне, достаточном для поглощения энергии рекуперации поезда, объем которой зависит на спусках от величины уклона, продолжительности спуска и массы поезда, а на равнинных участках – от массы поезда и скоростного

режима при рекуперативном торможении [6, 7]. Применение рекуперативного торможения является эффективным, так как позволяет снизить удельный расход электроэнергии на тягу поездов. В литературе для конкретных участков имеется информация об объеме рекуперированной энергии. Например, в [8] сказано, что «...при снижении скорости электровозом постоянного тока от 120 до 15 км/ч на участке пути с нулевым уклоном полный возврат электроэнергии в тяговую сеть составляет $A_3 = 676,3$ кВт·ч (при пройденном пути $L = 8\ 807$ м и массе поезда $m_n = 7\ 100$ т) и $A_3 = 198,0$ кВт·ч (при пройденном пути $L = 2\ 579$ м и массе поезда $m_n = 1\ 775$ т)». В [9] для участка Гойтх – Навагинская при проходе одного поезда отмечено, что «...запасенная энергия для последующего использования в тяге поездов составила 583 кВт·ч». Обобщенные данные об объемах рекуперированной энергии для различных регионов РФ даны в [10]. Вопросы возможности использования ротора ВИМ при высоких частотах вращения рассмотрены в [11].

В отличие от энергии, потребляемой от тяговой подстанции, закупочная стоимость рекуперированной энергии равна нулю, так как она является собственным вторичным ресурсом ОАО «РЖД». Энергия, накопленная во вращающемся роторе ВИМ, определенное время сохраняется и далее отдается в нужный момент поезду, следующему в режиме тяги. Это существенно повышает энергетическую эффективность тяговой системы электроснабжения.

В реальной эксплуатации ЭПС далеко не всегда поезд, идущий под уклон в режиме рекуперативного торможения, может эффективно использовать энергию рекуперации. Для этого на том же участке должен проходить поезд в тяговом режиме либо ближайшие тяговые подстанции должны быть оборудованы инверторными преобразователями для возврата энергии в единую энергетическую систему. Оба варианта не всегда возможны. К тому же энергия, возвращаемая в единую энергетическую систему с помощью инверторных преобразователей, получается низкого качества из-за использования силовых полупроводниковых ключей. Использование рекуперативного торможения на ЭПС сопровождается рядом проблем, широко освещаемых в литературе [12, 13].

При подключении системы ДПТС к сети тягового электроснабжения появятся регулировочные возможности для улучшения качества питания ЭПС. Такую систему целесообразно располагать между тяговыми подстанциями в полосе отвода тяговой сети. Наиболее эффективно систему ДПТС можно использовать для тяговой сети постоянного тока с номинальным напряжением 3 кВ, поскольку для этого не требуется включать в силовую цепь промежуточные сложные преобразовательные и согласующие устройства.

Россия обладает развитой сетью железных дорог общей протяженностью более 120 тыс. км. Профиль путей и режимы следования подвижного состава могут быть самыми разными. Поэтому алгоритм работы предлагаемой системы ДПТС на различных участках железных дорог не может иметь жесткую архитектуру и быть заранее заданным. В данном случае целесообразно использовать так называемую технологию Smart Grid («умная сеть»), которая интенсивно используется в развитых странах и является перспективной для электрических сетей. При этом система ДПТС гибко подстраивается под работу тяговой электрической сети в зависимости от сложившейся ситуации, позволяет осуществлять самомониторинг и предоставлять полную информацию о произведенной и поглощенной энергии рекуперации в плане эффективности, потерь или экономической выгоды.

Согласно структурной схеме, представленной на рис. 1, предусматривается следующий алгоритм работы системы ДПТС, осуществляемый по сигналам датчика напряжения тяговой сети: при отсутствии ЭПС на участке система ДПТС вырабатывает электроэнергию от ВЭУ 6 и через тяговую сеть и инверторные преобразователи на тяговой подстанции (ТП1 или ТП2) отдает энергию системе внешнего электроснабжения. При появлении электровоза 2 (или электропоезда) работа системы ДПТС позволяет дополнительно поставлять электроэнергию тяговым электродвигателям по короткому контуру, снижая потери энергии на активных сопротивлениях тяговой сети. В случае перехода электровоза 2 в режим рекуперативного торможения, когда отсутствуют другие электровозы, следующие в режиме тяги, срабатывает УЭММ 4, отсоединяет вал ВИГ 3 от ВЭУ 6, ВИГ переходит в двигательный режим и поглощает энергию рекуперации, накапливая ее во вращающемся роторе. При завершении рекуперации и переходе в режим тяги электровоза 2 накопленная во вращающемся роторе энергия возвращается электровозу через тяговую сеть. После того как частота вращения ротора снизится до частоты вращения ВЭУ 6, УЭММ 4 восстанавливает механическое соединение ротора ВИГ 3 и ВЭУ 6. Таким образом система ДПТС работает непрерывно с полезным эффектом [14].

Рекомендации по установленной мощности ВЭУ для работы в составе тяговой сети с учетом профиля пути, интенсивности движения и средней скорости ветра на рассматриваемом участке Белореченская – Комсомольская даны в [15]. Мощность ВЭУ по предварительным расчетам составила 800 кВт.

Количество ВИГ для генерации энергии в тяговую сеть и приема энергии рекуперации может быть разным в зависимости от эксплуатационных условий на конкретном участке. При необходимости увеличить объем запасаемой энергии при рекуперации поезда к ротору присоединяются дополнительные массы, величина которых определяется расчетным путем в зависимости от конкретной ситуации с энергией рекуперации [14].

ВИГ сохраняет высокие технико-экономические параметры при изменении частоты вращения вала в достаточно широком диапазоне. Это является одним из основных преимуществ ВИГ при работе от ВЭУ.

Переход из двигательного режима в генераторный и наоборот осуществляется IGBT-транзисторами по сигналам системы управления путем подключения обмотки к тяговой сети в зависимости от положения зубцов статора по отношению к зубцам ротора. Если зубцы статора и ротора находятся в рассогласованном положении (зубец находится напротив паза), начинается двигательный режим работы, продолжающийся до согласованного положения, когда оси зубцов статора и ротора совпадают. После достижения согласованного положения начинается генераторный режим работы, который продолжается до рассогласованного положения. Переход от одного режима к другому может быть осуществлен за один такт коммутации силовых полупроводниковых ключей, что позволяет оперативно распоряжаться накопленной энергией [16].

Предлагаемая система ДПТС может быть использована не только на участках с уклонами, но и на равнинных участках железной дороги, в этом случае осуществляется торможение с рекуперацией энергии при подходе к кривым участкам или при подходе к зонам ограничения скорости. А поскольку такие ситуации встречаются довольно часто, то, суммируя небольшие порции энергии, можно получить существенный конечный результат, соизмеримый с движением по длительному уклону. При этом нет необходимости накапливать значительное количество энергии в роторе электрической машины и долго хранить энергию, она сразу же возвращается, как только электровоз после очередного генераторного торможения перешел в режим тяги. Это позволит свести к минимуму использование фрикционного тормоза.

Систему ДПТС также целесообразно располагать на железнодорожных станциях. Рассмотрим конкретный случай. Пусть грузовой поезд массой 3 000 т, двигаясь со скоростью 80 км/ч по участку Белореченская – Комсомольская, снижает скорость в режиме рекуперативного торможения до 60 км/ч перед криволинейным участком железной дороги. Изменение кинетической энергии поезда определялось согласно выражению [14]:

$$\Delta E_{\text{к.п.}} = \frac{Q_{\text{бр}}}{2} \left(\left(\frac{V_1}{3,6} \right)^2 - \left(\frac{V_0}{3,6} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где $Q_{\text{бр}}$ – масса брутто поезда, кг;

$V_{0,1}$ – скорость поезда (начальная и конечная), км/ч.

$$\Delta E_{\text{к.п.}} = \frac{Q_{\text{бр}}}{2} \left(\left(\frac{V_1}{3,6} \right)^2 - \left(\frac{V_0}{3,6} \right)^2 \right) = \frac{3 \cdot 10^6}{2} \left(\left(\frac{80}{3,6} \right)^2 - \left(\frac{60}{3,6} \right)^2 \right) = 324\,074 \text{ кДж.}$$

Изменение кинетической энергии составит 324 074 кДж, что эквивалентно энергии 90,0 кВт·ч (1 кВт·ч соответствует 3 600 кДж). Если эта энергия будет отдана в тяговую сеть при рекуперации, то для тяги поезда можно будет использовать лишь часть этой энергии ввиду наличия потерь, которые включают в себя [14]:

1) потери электроэнергии при ее передаче от электровоза накопителям энергии (ВИМ), $\eta_{\text{сеть1}}$, в работе принято 85 %;

2) потери в ВИМ в процессе преобразования электрической энергии в механическую энергию вращения ротора $\eta_{\text{вид}}$, принято 94 %;

3) потери в ВИМ в процессе преобразования механической энергии вращения ротора обратно в электрическую $\eta_{\text{ВИГ}} = \eta_{\text{вид}} = 94$ %;

4) потери электроэнергии при ее передаче обратно от накопителей энергии (ВИМ) электровозу, $\eta_{\text{сеть2}} = \eta_{\text{сеть1}} = 85$ %.

В итоге с учетом КПД тяговой сети $\eta_{\text{сеть1}}$ и КПД преобразования электрической энергии в механическую $\eta_{\text{вид}}$ ротор одного ВИМ должен накопить механическую энергию $E_{\text{к.рот.}}$ в своей инерционной массе в объеме

$$E_{\text{к.рот.}} = \Delta E_{\text{к.п.}} \cdot \eta_{\text{сеть1}} \cdot \eta_{\text{ВИД}}; \quad (2)$$

$$E_{\text{к.рот.}} = 324\,074 \cdot 0,85 \cdot 0,94 = 258\,935 \text{ кДж.}$$

Количество ВИМ $N_{\text{ВИМ}}$ может варьироваться в зависимости от различных обстоятельств (в работе принято $N_{\text{ВИМ}} = 2$). Расчет необходимой для поглощения энергии рекуперации угловой скорости ω ротора каждого механического накопителя энергии был основан на формуле кинетической энергии вращательного движения:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{к.рот.}}}{J \cdot N_{\text{ВИМ}}}}, \quad (3)$$

$$n = \frac{30}{\pi} \cdot \omega, \quad (4)$$

где J – момент инерции привода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; в работе принято $J = 15,7 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Расчет момента инерции ротора J был выполнен в программе FEMM с учетом геометрических размеров активной части ротора, его вала и вращающихся элементов привода. Плотность всех масс ротора и привода была принята $7,8 \text{ т/м}^3$.

Угловая скорость ω ротора и частота вращения ротора n каждого накопителя составляют соответственно:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot 258\,935 \cdot 10^3}{15,7 \cdot 10^3 \cdot 2}} = 128,42 \text{ рад/с;}$$

$$n = \frac{30}{\pi} \cdot 128,42 = 1\,226,32 \text{ об/мин.}$$

Автором также был выполнен расчет на прочность ротора с исходными данными: радиус ротора – 841 мм, длина пакета электротехнической стали – 2 850 мм. Напряжение растяжения $\sigma_{\text{раст.}}$, вызванное силами инерции при вращении, в наиболее уязвимом месте машины – спинке ротора составило 67,6 МПа при предельно допустимом напряжении $[\sigma] = 330 \text{ МПа}$ [17], что свидетельствует о коэффициенте запаса прочности 4,88. Указанные расчетные данные соответствуют ВИМ с соотношением зубцовой зоны статора и ротора 12/14.

Ниже рассмотрен достаточно напряженный вариант совместной работы ВИМ мощностью 1 200 кВт и тяговой железнодорожной сети, при котором электровоз (2ЭС4К «Дончак») движется между тяговыми подстанциями, а ВИМ работает как генератор с полной отдачей в номинальном режиме. Также приняты следующие допущения:

1) профиль пути без уклонов;

2) тяговые двигатели электровоза работают в номинальном режиме на всем межподстанционном расстоянии без каких-либо переключений.

Электровоз типа 2(3)ЭС4К «Дончак» с коллекторным тяговым приводом предназначен для вождения грузовых поездов массой более 6 000 тонн (выпущен на Новочеркасском электровозостроительном заводе).

Расчетная электрическая схема представлена на рис. 2 и включает в себя компоненты двух тяговых подстанций, контактной сети, рельсовых цепей и двух ВИМ для генерации энергии в тяговую сеть и приема энергии рекуперации, расположенных между тяговыми подстанциями. Расчеты были выполнены в программном комплексе (ПК) MATLAB/Simulink, который позволяет с достаточно высокой точностью производить расчеты сложных электротехнических систем.

На рис. 3 представлена схема замещения при проведении расчетов в ПК MATLAB/Simulink.

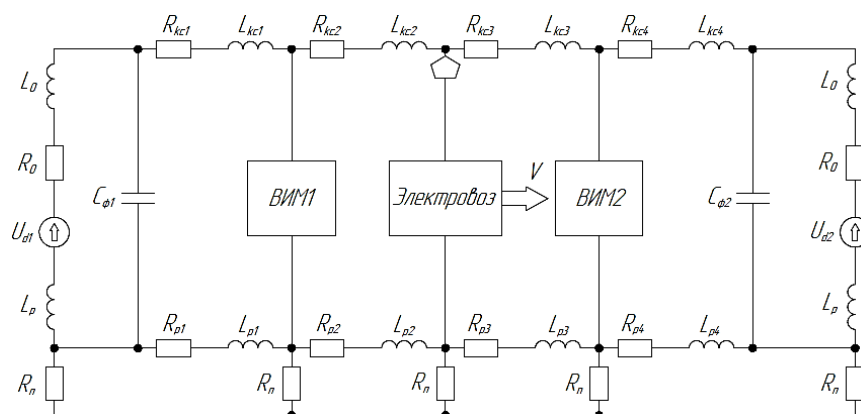


Рис. 2. Электрическая схема замещения:

$R_{kc1}-R_{kc4}$ – активные сопротивления проводов контактной подвески;

$L_{kc1}-L_{kc4}$ – индуктивные сопротивления проводов контактной подвески;

$R_{p1}-R_{p4}$ – активные сопротивления участков рельсовых цепей; $L_{p1}-L_{p4}$ – индуктивные сопротивления участков рельсовых цепей; $U_{д1}-U_{д2}$ – источник напряжения в месте подсоединения тяговой сети;

R_0 – внутреннее активное сопротивление источника;

L_0 – внутреннее реактивное сопротивление источника; L_p – индуктивность реактора; $R_{п}$ – переходное сопротивление «рельс – земля»; $C_{\phi 1}$, $C_{\phi 2}$ – емкость конденсаторов фильтра; ВИМ1,

ВИМ2 – электрические машины для генерации энергии в тяговую сеть и приема энергии рекуперации

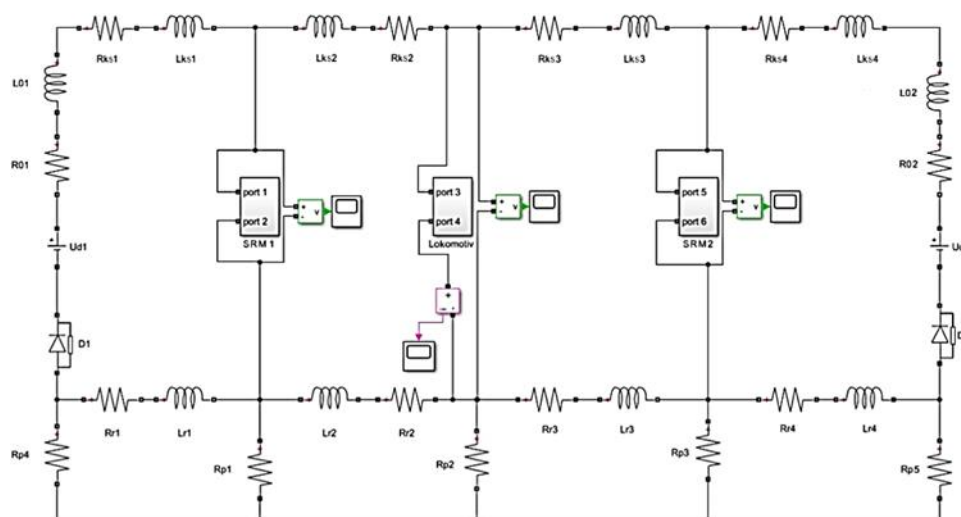


Рис. 3. Расчетная схема в ПК MATLAB/Simulink:

$SRM1$ и $SRM2$ – расчетные подсистемы ВИМ, включающие встроенные блоки библиотеки Simulink;

$Lokomotiv$ – расчетная подсистема имитационного моделирования электрической схемы электроваза 2ЭС4К «Дончак»

Целью расчета являлось определение напряжения на токоприемнике электроваза при прохождении расстояния между тяговыми подстанциями с работающей ВИМ и без нее. Поскольку параметры тяговой сети $R_{kc1}-R_{kc4}$, $L_{kc1}-L_{kc4}$, $R_{p1}-R_{p4}$, $L_{p1}-L_{p4}$ (см. рис. 2) меняются по мере перемещения электроваза, то данные о напряжении определялись итерационным путем. При этом весь межподстанционный участок в 12 км был разбит на ряд более мелких участков и напряжение на пантографе электроваза определялось на границах участков.

Результаты расчетов представлены на рис. 4.

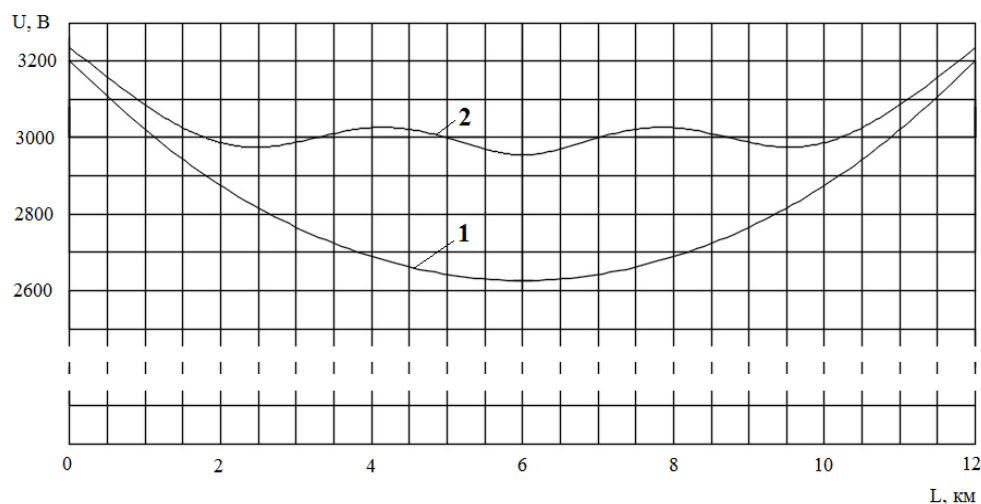


Рис. 4. Изменение напряжения на расчетном участке:

1 – напряжение без работающей ВИМ; 2 – напряжение с двумя работающими ВИМ, расположенными на 4-м и 8-м километре

Как видно из рис. 4, две работающие ВИМ, которые расположены на 4-м и 8-м километре, позволяют существенно скомпенсировать падение напряжения в тяговой сети при прохождении электровозом расчетного участка. Такая ситуация возможна только при благоприятных условиях по величине энергии ветрового потока, позволяющей работать ветрогенераторам с расчетной мощностью. В общем случае положительный эффект можно оценить, только выполнив технико-экономические расчеты с учетом ряда факторов [10]:

- 1) среднегодовой энергии ветрового потока на расчетном участке;
- 2) графика движения и массы поездов;
- 3) профиля пути;
- 4) мощности и количества работающих ВИМ, а также их расположения на участке между тяговыми подстанциями;
- 5) величины капитальных затрат на создание таких систем ДПТС;
- 6) стоимости электроэнергии и ряда других факторов.

Выводы

Предложена система ДПТС, позволяющая эффективно использовать энергию рекуперации. Она содержит в себе электрическую машину вентильно-индукторного типа, работающую как генератор, ротор которого способен не только участвовать в электромеханическом преобразовании энергии, но и накапливать в своей инерционной массе энергию от поезда, следующего в режиме рекуперативного торможения, и отдавать накопленную энергию обратно в нужные моменты.

Система ДПТС дает возможность совместить энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте, которые обычно применяются раздельно. За счет этого контуры токов, питающих тяговые электродвигатели ЭПС, становятся более короткими, уменьшая потери электроэнергии; обеспечивается вторичное использование энергии рекуперации; происходит выравнивание напряжения в тяговой сети, что положительно сказывается на тяговых характеристиках ЭПС; энергия, поступающая от ВИГ, не содержит в себе углеродного следа, т.е. является более экологически чистой.

В случае наличия на тяговых подстанциях инверторных преобразователей вся выработанная генератором электроэнергия может быть передана во внешнюю сеть электроснабжения, даже в том случае, если на участке нет движения поездов.

Предлагаемая к использованию система ДПТС может работать автономно в автоматическом режиме.

Список литературы

1 Стратегия развития холдинга ОАО «РЖД» до 2030 года. – URL: <http://doc.rzd.ru/doc/pub->

References

1 Development strategy of the Russian Railways holding until 2030. – URL: <http://doc.rzd.ru/doc/pub->

lic/ru/kbshzd/rzd?STRUC-TURE_ID=704&layer_id=5104&id=639 (дата обращения: 13.05.2024).

2 Энергосбережение на железнодорожном транспорте : справочно-методическое издание (Серия 2. Энергоэффективность по отраслям) / под редакцией В. А. Гапановича. – Москва : Интехэнерго-Издат : Теплоэнергетик, 2014. – 304 с. – ISBN 978-5-98385-013-2.

3 **Voron, O. A.** Methodology for the development of innovative isothermal rolling stock in the country's transport system : специальность 05.22.07, 05.22.01 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ворон Олег Андреевич. – Ростов-на-Дону, 2021. – 401 с.

4 **Khatlamadzhiyan, A. E.** Применение современных цифровых технологий и технических средств для повышения безопасности и эффективности перевозочного процесса подвижного состава / А. Е. Хатламаджиян, И. А. Яицков, И. А. Степин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (50). – С. 107–110. – ISSN 1818-5509.

5 **Petrushin, A. D.** Повышение энергетической эффективности подвижного состава железных дорог с учетом требований экологии / А. Д. Петрушин, И. В. Волков, С. С. Черняев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (81). – С. 40–46. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_40.

6 **Krishnan, R.** Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, design, and applications / R. Krishnan. – Virginia : The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, 2001. – 416 p. – ISBN 9781315220062.

7 **Petrushin, A. D.** Исследование взаимосвязи электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя и геометрических элементов его магнитной системы / А. Д. Петрушин, А. В. Шевкунова, В. Ю. Смачный // Вестник ЮУрГУ. – (Серия «Энергетика»). – 2020. – Том 20. – № 2. – С. 127–137. – DOI 10.14529/power200212.

8 **Baklanov, A. A.** Энергетическая эффективность рекуперативного торможения грузовых электровозов / А. А. Бакланов, А. П. Шилияков // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 11–22. – ISSN 2220-4245.

9 **Petrushin, D. A.** Повышение эффективности рекуперативного торможения электровозов постоянного тока путем использования в тяговой сети инерционного накопителя энергии со встроенной вентильно-индукторной электрической машиной : специальность 05.22.07 : диссертация на

lic/ru/kbshzd/rzd?STRUC-TURE_ID=704&layer_id=5104&id=639 (date of access: 05/13/2024).

2 Energy saving in railway transport: a reference and methodological publication. Series 2. Energy efficiency by industries / Edited by V. A. Gapanovich. – Moscow : «Intekhenergo-Izdat» : «Teploenergetik», 2014. – 304 p. – ISBN 978-5-98385-013-2.

3 **Voron, O. A.** Methodology for the development of innovative isothermal rolling stock in the country's transport system : diss. Dr. Tech. Sciences : 05.22.07, 05.22.01 / Voron Oleg Andreevich. – Rostov-on-Don, 2021. – 401 p.

4 **Khatlamadzhiyan, A. E.** Using of modern digital technologies and technical means for increasing of safety and efficiency rolling stock transportation process / A. E. Khatlamadzhiyan, I. A. Yaitskov, I. A. Stepin // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 1 (50). – P. 107–110. – ISSN 1818-5509.

5 **Petrushin, A. D.** Improving the energy efficiency of railway rolling stock, taking into account environmental requirements / A. D. Petrushin, I. V. Volkov, S. S. Chernyaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (81). – P. 40–46. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_40.

6 **Krishnan, R.** Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, design, and applications / R. Krishnan. – Virginia : The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, 2001. – 416 p. – ISBN 9781315220062.

7 **Petrushin, A. D.** Electromagnetic torque of switched-reluctance motors and its correlation with the magnetic system geometry / A. D. Petrushin, A. V. Shevkunova, V. Yu. Smachny / Bulletin of the South Ural State University. Ser. : Power Engineering. – 2020. – Vol. 20. – No. 2. – P. 127–137. – DOI 10.14529/power200212.

8 **Baklanov, A. A.** Energy efficiency of regenerative braking of freight electric locomotives / A. A. Baklanov, A. P. Shilyakov // Izvestia Transsib. – 2021. – No. 4 (48). – P. 11–22. – ISSN 2220-4245.

9 **Petrushin, D. A.** Increasing the efficiency of regenerative braking of DC electric locomotives by using an inertial energy storage device with a built-in switched-reluctance electric machine in the traction network : diss. Cand. Tech. Sciences : 05.22.07 / Petrushin Dmitry Alexandrovich. – Rostov-on-Don, 2013. – 129 p.

соискание ученой степени кандидата технических наук / Петрушин Дмитрий Александрович. – Ростов-на-Дону, 2013. – 129 с.

10 **Черняев, С. С.** Технико-экономическое обоснование внедрения ветроэнергетической установки на электрифицированных участках железных дорог постоянного тока с благоприятными ветровыми условиями / С. С. Черняев, В. В. Сироткин // Механика и трибология транспортных систем : сборник статей международной научной конференции «МехТрибоТранс-2021», Ростов-на-Дону, 09–10 ноября 2021 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2021. – С. 104–110. – DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021104.

11 **Петрушин, Д. А.** Моделирование режимов работы системы тягового электроснабжения с инерционным накопителем энергии / Д. А. Петрушин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 1 (37). – С. 114–118. – ISSN 0201-727X.

12 **Незевак, В. Л.** Мониторинг выполнения норм удельной рекуперации в границах производственной зоны мониторинга участка постоянного тока / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Известия Транссиба. – 2015. – № 2. – С. 87–95. – ISSN 2220-4245.

13 Об утверждении методики планирования и нормирования энергии рекуперации на уровне эксплуатационного локомотивного депо : распоряжение ОАО «РЖД» от 15 января 2013 г. № 44р. – Москва : ОАО «РЖД». – 14 с.

14 **Сироткин, В. В.** Расчет механической прочности ротора вентильно-индукторного генератора, подключенного к тяговой железнодорожной сети / В. В. Сироткин, А. В. Кашуба // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт : наука, образование, производство», Ростов-на-Дону, 26–28 апреля 2023 года. – Том 3. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 86–90. – ISBN 978-5-907295-90-2.

15 Определение мощности ветроэнергетической станции при ее работе в системе тягового электроснабжения постоянного тока / С. С. Черняев, В. В. Сироткин, М. Ю. Колмыкова [и др.] // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (56). – С. 55–61. – ISSN 1818-5509.

16 **Ворон, О. А.** Обоснование использования вентильно-индукторных электрических машин для управления потоком энергии рекуперации электрического подвижного состава / О. А. Ворон, В. В. Сироткин, А. Д. Петрушин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Том 66. – № 4. – С. 34–39. – DOI 10.17213/0136-3360-2023-4-34-39.

10 **Chernyaev, S. S.** Technical and economic assessment for implementation of a wind power plant on DC railways areas with favorable wind conditions / S. S. Chernyaev, V. V. Sirotkin // Mechanics and tribology of transport systems (MechTribTrans-2021) : collection of articles of the international scientific conference, Rostov-on-Don, November 09–10, 2021. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2021. – P. 104–110. – DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_104.

11 **Petrushin, D. A.** Simulation the operating modes of tractive power supply systems with flywheel energy storage / D. A. Petrushin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2010. – No. 1 (37). – P. 114–118. – ISSN 0201-727X.

12 **Nezevak, V. L.** The monitoring of the execution of the specific regeneration's norms within the ambit of the arbitrary monitoring's area of the dc area / V. L. Nezevak, A. P. Shatokhin // Izvestiya Transiba. – 2015. – No. 2. – P. 87–95. – ISSN 2220-4245.

13 On approval of the methodology for planning and rationing energy recovery at the level of the operational locomotive depot : Order of Russian Railways. – January 15, 2013 No. 44r. – Moscow : JSC «Russian Railways». – 14 p.

14 **Sirotkin, V. V.** Calculation of the mechanical durability of the rotor of switched reluctance generator connected to the traction railway network / V. V. Sirotkin, A. V. Kashuba // Collection of scientific papers «Transport : science, education, production» : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 26–28, 2023. – Vol. 3. – Rostov-on-Don : RSTU, 2023. – P. 86–90. – ISBN 978-5-907295-90-2.

15 Calculation of windmill power when it is in operation in a direct current traction power supply system / S. S. Chernyaev, V. V. Sirotkin, M. Yu. Kolmykova [et al.] // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 3 (56). – P. 55–61. – ISSN 1818-5509.

16 **Voron, O. A.** Justification of operation of switched reluctance motors to control the energy flow of electric rolling stock recuperation. / O. A. Voron, V. V. Sirotkin, A. D. Petrushin // News of higher educational institutions. Electromechanics. – 2023. – Vol. 66. – No. 4. – P. 34–39. – DOI 10.17213/0136-3360-2023-4-34-39.

17 ГОСТ 21427.2-83. Межгосударственный стандарт. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009104> (дата обращения: 13.05.2024).

17 GOST 21427.2-83. Interstate standard. Steel electrical cold-rolled isotropic sheet. Specifications. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009104> (date of access: 05/13/2024).

V. V. Sirotkin

USAGE OF THE ENERGY RECOVERING EFFICIENCY IN THE ELECTRIC-TRACTION NETWORK

Abstract. The paper presents the most effective ways saving fuel and energy resources used in railway transport area. A system of additional power supply to the traction network has been proposed, which makes it possible to combine the most promising energy-saving technologies in railway transport. Due to the use of an unconventional energy source and a modern switched reluctance type electromechanical converter connected to the traction railway network, a guaranteed beneficial use of recovering energy is ensured, the quality traction power supply system is improved of operation by smoothing the voltage in the traction railway network, and energy losses are reduced due to shorter circuits of flowing currents. Using the “MATLAB/Simulink” software package, one of the options for collaboration work of the proposed device and the traction railway network was calculated.

Keywords: energy efficiency, electric rolling stock, traction power supply system, switched reluctance generator, inertial energy storage, recovering braking, simulation.

For citation: Sirotkin, V. V. Usage of the energy recovering efficiency in the electric-traction network / V. V. Sirotkin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 100–109. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_2_100.

Сведения об авторах

Сироткин Вячеслав Викторович
Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
ассистент,
e-mail: viachieslav.sirotkin.93@mail.ru

Information about the authors

Sirotkin Vyacheslav Viktorovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Cars and Car Facilities»,
Assistant,
e-mail: viachieslav.sirotkin.93@mail.ru

В. Н. Черных, В. А. Осипов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ РАННЕГО ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Статья посвящена разработке принципов раннего обнаружения гололедно-изморозевых образований на контактной сети электрифицированных железных дорог. Рассмотренный в работе способ актуален для использования на перегонах с низкой интенсивностью движения, оборудованных полностью компенсированной контактной подвеской. В статье обосновывается возможность определения факта начала отложения гололеда путем измерения усилия в точке крепления неподвижного ролика компенсатора контактной сети. На основании выполненного анализа предложено оптимальное место установки тензометрического измерительного органа системы раннего обнаружения гололедообразования. Предлагается метод анализа полученных данных для выделения переменной составляющей веса провода. Приводится также обзор существующих методов борьбы с гололедом, дана их оценка.

Ключевые слова: гололед, гололедно-изморозевые образования, борьба с гололедом, тензодатчик, контактная сеть.

Для цитирования: Черных, В. Н. Совершенствование системы обнаружения раннего гололедообразования для контактных сетей электрифицированных железных дорог / В. Н. Черных, В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 110–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_110.

Введение

Контактная сеть (КС) электрифицированных железных дорог представляет собой систему проводов и поддерживающих конструкций, которые обеспечивают непрерывное питание тяговых потребителей электрической энергии. В ее состав входят провода и тросы, которые в совокупности образуют контактную подвеску, опорные и поддерживающие, а также фиксирующие конструкции, необходимые для нормального функционирования системы. Несмотря на всю значимость и важность бесперебойной работы, контактная сеть, ввиду невозможности другого технического исполнения, не имеет резерва. Именно поэтому необходимо стремиться к повышению надежности эксплуатационных характеристик всей системы в целом. Одним из основных факторов, отрицательно воздействующих на контактную сеть, является ее расположение на открытой местности, где она подвержена негативному влиянию различных атмосферных явлений.

К числу таких воздействий, пагубно влияющих на техническое состояние устройств КС, можно отнести значительные перепады температур, иногда в пределах одних суток, постоянные ветровые нагрузки, выпадение атмосферных осадков (дождь, снег). Наиболее тяжелым режимам работы система электроснабжения подвергается при эксплуатации ее в осенне-зимний и зимне-весенний периоды. Именно в это межсезонье провода и тросы контактной подвески подвержены максимальным механическим нагрузкам. В течение дня температура может резко колебаться от отрицательных значений к положительным и наоборот. Ветер достигает максимальных скоростей и порывов. Атмосферные осадки также могут видоизменяться в течение дня. Все эти факторы атмосферного влияния способствуют образованию таких сложных режимов работы, как гололед и гололед с ветром.

Эксплуатация контактной сети во время возникновения на ней гололеда и гололедно-изморозевых образований затрудняется по ряду причин. Основная причина – это ухудшение токосъема из-за образования наледи и гололеда на контактном проводе, которые приводят к искрению и возникновению электрической дуги в месте контакта полоза токоприемника и проводов контактной сети. Из-за этого соответственно разрушаются и деформируются и полозья токоприемников, и сами провода. Могут произойти пережоги контактного провода в месте соприкосновения с последующим обрывом целого участка контактной подвески и нарушением транспортного сообщения, зачастую на длительное время. Помимо электротермической составляющей негативных последствий не стоит забывать и об увеличении динамических и статических нагрузок на провода и тросы, поддерживающие и фиксирующие устройства системы. В частности, опоры, консоли и другая арматура контактной сети постоянно подвержены большим нагрузкам ввиду практически повсеместного применения систем компенсации

натяжения проводов и тросов контактной подвески, которые необходимы для качественного токо-схема. За счет налипания снега и/или образования гололеда эта нагрузка растет. Толщина гололедной муфты может достигать 50–70 мм, в значительной степени увеличивая нагрузку на провода и конструкции. Подобные аварийные режимы работы негативно сказываются на показателях работы участка железной дороги, а также влекут за собой значительные материальные затраты на восстановление работоспособности контактной сети.

Основная часть

Способов борьбы с гололедными отложениями, как и методов раннего обнаружения, на сегодняшний день известно достаточно большое количество, однако актуальность задачи эффективной борьбы с гололедом на контактной сети в настоящее время только возрастает. Одним из основных тезисов принятой и утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.» является увеличение скоростей и грузопотока совместно с повышением надежности работы устройств и систем электроснабжения. Решение данной задачи невозможно без обеспечения надежного и непрерывного электроснабжения ЭПС, что реализуется в том числе с помощью эффективных методов борьбы с гололедом.

На сегодняшний день основными приемами борьбы с гололедом на контактной сети являются его плавка токами короткого замыкания (КЗ) и профилактический подогрев [1]. Плавка гололеда как известно осуществляется путем нагрева проводов контактной подвески токами короткого замыкания. Данный способ борьбы имеет ряд существенных недостатков, главным из которых является полное прекращение отпуска электроэнергии потребителям, как тяговым, так и нетяговым, ввиду технических особенностей применяемых схем. Кроме этого, повышается риск обрыва проводов из-за возможных ошибок при расчете токов короткого замыкания, особенно это касается проводов и тросов контактной подвески, где для поддержания постоянного натяжения контактного провода применяются устройства грузокompенсации.

Очевидно, что бороться с уже образовавшимся гололедом сложнее, чем предупреждать его образование на ранних стадиях. Профилактика образования гололеда проводится за счет применения профилактического подогрева проводов воздушных линий электропередачи, который также получил широкое применение и на контактной сети. Однако на сегодняшний день существует проблема с рациональностью использования данного метода. В большинстве случаев профилактический подогрев проводов используется «вслепую», пока погодные условия не придут в норму. Такой подход влечет необоснованные экономические затраты на электроэнергию и реже, чем при плавке гололеда, но может приводить к неблагоприятным последствиям.

Поиском путей решения проблемы гололедно-изморозевого образования на элементах контактной цепной подвески занимался ряд научно-исследовательских институтов и коллективов специалистов данной области в нашей стране и за рубежом. Большой вклад в эти исследования был привнесен сотрудниками РГУПС/РИИЖТ. Учеными кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» были предложены и разработаны методики, позволяющие повысить эффективность борьбы с указанным нежелательным явлением [2–4].

Ярким примером такой работы является разработка методики расчета оптимальных значений тока плавки гололеда на неизолированных проводах воздушных линий [5, 6]. Над созданием методики борьбы с гололедом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПП, автоблокировки и продольного электроснабжения трудился не один коллектив научных сотрудников и конструкторского бюро, в том числе – от Ростовского государственного университета путей сообщения – профессора Е. П. Фигурнов и Ю. И. Жарков, а также кандидат технических наук, доцент Т. Е. Петрова. Использование вышеупомянутой методики позволяет с высокой точностью рассчитывать величину тока плавки гололеда, которая позволит растопить образовавшуюся наледь, минимизируя при этом негативные последствия от такого воздействия для проводов и устройств контактной сети. На основании изложенного в книгах материала были разработаны и составлены многочисленные таблицы, номограммы и схемы, используемые для профилактического подогрева или плавки гололеда.

Способы обнаружения гололедно-изморозевых образований на воздушных линиях разрабатываются, модернизируются и уточняются. На настоящий момент приоритет в этом направлении отводится разработке автоматизированной системы контроля за состоянием проводов и устройств воздушных линий электропередачи. Известно несколько способов организации такого контроля, применяемых на высоковольтных ЛЭП. Однако широкое применение получили лишь некоторые из них, а именно инклинометрический метод измерения гололедной нагрузки, радиолокационный и термодинамический.

Первый способ основан на регистрации в режиме реального времени угла наклона разнообразных предметов относительно гравитационного поля земли. В случае с воздушными линиями (ВЛ) этим «разнообразным предметом» выступает провод. Имеющий место в данном случае эффект «кручения» обусловлен тем, что при естественных механических деформациях провода происходит его оборот вокруг своей оси. Регистрируя такое изменение провода в пространстве, можно получить дополнительную информацию о состоянии проводов воздушных линий.

Суть радиолокационного метода состоит в подаче импульса в контролируемую линию с последующим определением времени, которое будет затрачено на распространение этого сигнала на протяжении всей линии в прямом и обратном направлениях. Любые неоднородности, которые возникают в линии (обрывы, КЗ, гололед и т. д.), увеличивают время прохождения сигнала по контролируемой линии. Главным недостатком такого способа является его низкая чувствительность.

Термодинамический способ обнаружения гололедно-изморозевых отложений основан на непрерывном контроле в режиме реального времени нескольких важных параметров провода, а именно его температуры и веса, также регистрируются направление и скорость ветра на участке предположительного гололедообразования. Температура провода и характеристические показатели ветра измеряются при помощи метеорологических станций, вес же проводов регистрируется при помощи специальных датчиков тяжения. Их принцип работы основан на применении явления тензоэффекта. Метод обладает достаточно высокой точностью и гибкостью настроек и конфигурации системы.

Наиболее близким к описанному способу является аппаратно-технический комплекс автоматизированной информационной системы контроля гололедной нагрузки (АИСКГН) «БЛАЙС®» (разработан «Специальным конструкторским бюро приборов и систем автоматизации», г. Невинномысск). В его состав входит весь необходимый комплекс датчиков – преобразователей нагрузки, системы регистрации атмосферных явлений, таких как влажность, температура, ветер, датчик контроля температуры провода и передающий собранную информацию блок. Совокупность датчиков контроля и датчиков-преобразователей (тензодатчиков), устанавливаемых на опоре ВЛ, образует пункт контроля (ПК). Он может устанавливаться как непосредственно на опору, так и неподалеку от нее. В его состав также обязательно входит система бесперебойного питания. Типы датчиков могут меняться в зависимости от того, какие параметры необходимо регистрировать на выбранном участке. После сбора информации с датчиков и устройств, установленных на ПК, ее передают на пункт приема (ПП), где она обрабатывается на АРМ диспетчера и выводится на монитор ноутбука или стационарного компьютера в понятной человеку форме. ПП представляет собой совокупность сетевого оборудования, необходимого для приема и обработки поступающей информации от ПК, в которую входят система бесперебойного питания для обеспечения надежности сохранности данных, серверный шкаф, модуль связи ПК и ПП.

Непосредственное использование такого комплекса на контактной сети электрифицированных железных дорог весьма затруднено из-за различий в способе подвески фазных проводов линии электропередачи и креплении проводников контактной сети. В отличие от проводов обычных ЛЭП, которые выполняют лишь функцию передачи электрической энергии и имеют некоторую стрелу провеса, к проводам и тросам контактной сети предъявляются более строгие требования. Одно из таких важных условий – натяжение провода с целью максимальной минимизации стрелы провеса контактного провода в пределах анкерного участка. Такой эффект достигается за счет использования грузокомпенсирующих устройств (КУ) и струн, которые в пределах одного анкерного участка поддерживают провод на нужной высоте.

Коллективом кафедры «Теоретические основы электротехники» ФГБОУ ВО РГУПС совместно со «Специальным конструкторским бюро приборов и систем автоматизации» (г. Невинномысск) был проведен ряд исследований и испытаний, который позволил сделать вывод о том, что установка системы АИСКГН «БЛАЙС®» на контактной сети возможна, но требует детальной переработки под условия эксплуатации. В результате выполненных исследований [7, 8] был предложен и опробован способ крепления тензометрического датчика на анкерной опоре полукомпенсированной контактной подвески, который находится на малоделятельном Ростовском участке Северо-Кавказской железной дороги в районе высокой насыпи и интенсивного воздействия ветровых нагрузок. Тензодатчики были закреплены на несущем тросе и контактном проводе методом «шунтирования», т. е. без повреждения проводов (рис. 1, а). При помощи полиспастных блоков контактный провод 4 и несущий трос 2 у анкерной опоры немного стянули, чтобы образовалась небольшая петля, а сам датчик-преобразователь 3 установили в образовавшуюся петлю при помощи специальных зажимов КС 1. Такой тип крепления

выполнял еще и защитную функцию, гарантируя в случае механического разрушения датчика сохранность контактной подвески. Фотоизображение установленных на реальном участке датчиков приведено на рис. 1, б.

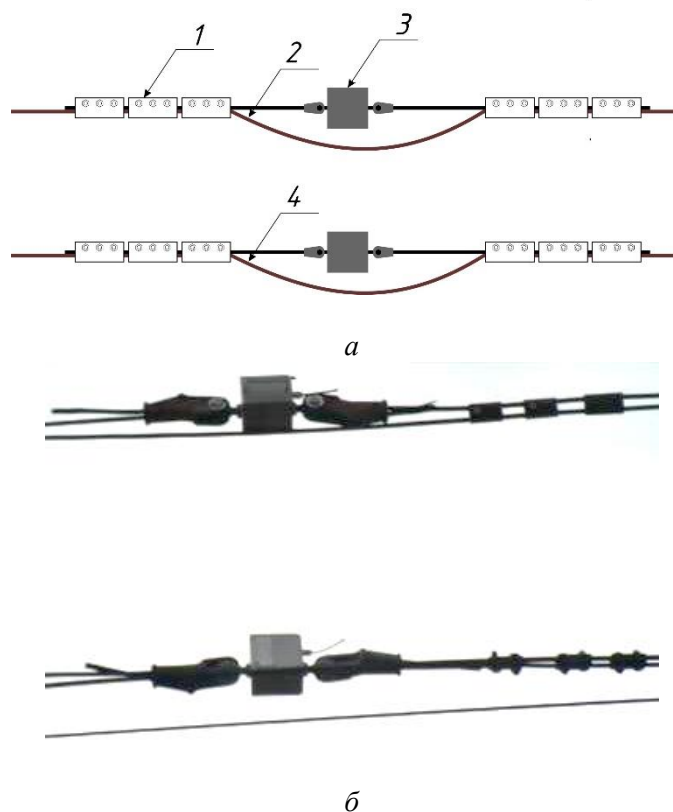


Рис. 1. Датчики-преобразователи натяжения на несущем тросе и контактном проводе:
а – схема установки; б – фотоизображение

Принцип определения наличия гололеда основан на том факте, что несущий трос жестко закреплен с двух сторон на анкерных опорах, и возникновение на нем гололедно-изморозевых образований приводит к увеличению натяжения несущего троса. Именно эта величина регистрируется тензометрическим датчиком и передается для дальнейшей обработки в центр управления. При этом благодаря наличию струн возникновение гололеда на контактном проводе также приводит к увеличению натяжения в несущем тросе, что позволяет по значению натяжения несущего троса судить о наличии гололеда на обоих проводниках контактной подвески. Следует отметить, что натяжение несущего троса будет изменяться в том числе и при прохождении подвижного состава, но в пределах одного анкерного участка это весьма кратковременное явление, сравнительно легко отслеживаемое посредством аналитической обработки массива данных, получаемых при измерении силы натяжения несущего троса.

Описанный способ определения начала гололедообразования не лишен недостатков. Крепление тензодатчика в несущий трос полукомпенсированной контактной подвески позволяет контролировать изменение его натяжения при воздействии сторонних факторов, при этом установка датчика в контактный провод не дает возможности получать данные об изменении натяжения провода. Вызвано это тем, что контактный провод находится в состоянии компенсации натяжения, что не позволяет судить о внешнем воздействии на него описанным выше способом. В результате по силе натяжения несущего троса возможно зарегистрировать сравнительно большой слой гололеда, но никак не начало его отложения. Также следует отметить, что на полностью компенсированных контактных подвесках данный способ неприменим вообще.

Авторами статьи предлагается иной подход при определении оптимального места установки измерительных преобразователей, который позволяет исключить ряд недостатков описанного выше метода и в результате повысить достоверность определения факта начала отложения гололеда. В статье

в качестве примера принята блочно-полиспастная система компенсации (рис. 2). Дальнейшие рассуждения применимы в общем виде и для других типов компенсации с некоторыми изменениями, обусловленными техническими особенностями исполнения.

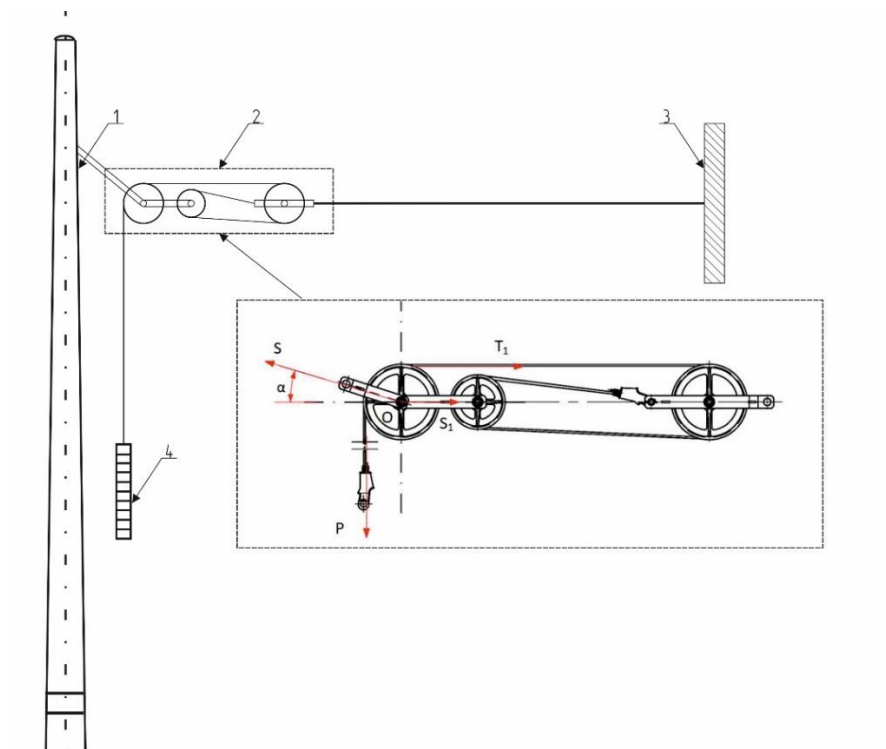


Рис. 2. Принятая система компенсации контактного провода

На рис. 2 представлено схематичное изображение анкерной опоры компенсированной контактной подвески. Здесь цифрой 1 обозначена сама опора, 2 – компенсатор блочно-полиспастного типа КБП-3-30, 3 – точка средней анкеровки контактного провода, 4 – грузы компенсирующего устройства. Для обоснования места установки тензометрических датчиков рассмотрим компенсирующее устройство с расстановкой сил и моментов, действующих на механизм. При анализе сделаем ряд допущений. Будем считать, что все тросы, используемые в системе натяжения, нерастяжимы и невесома, блоки невесома, трение в осях блоков отсутствует (рис. 3).

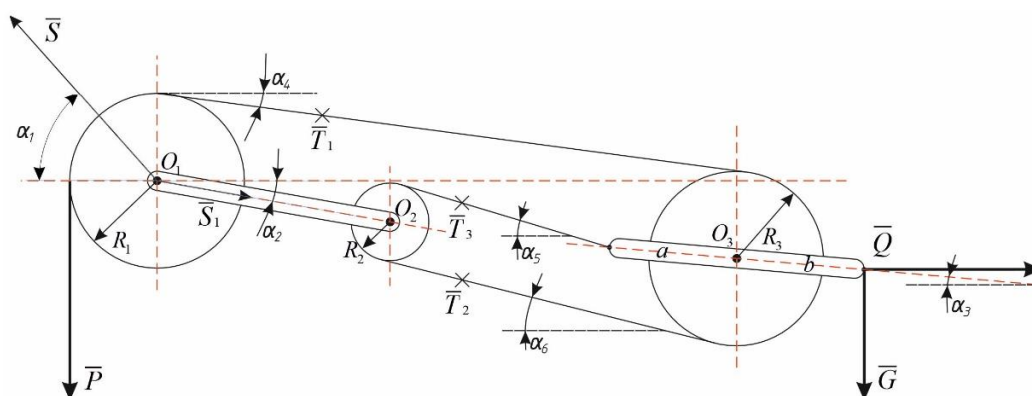


Рис. 3. Схема КУ с изображением действующих на них сил

Система уравнений сил и моментов для точки O_1 :

$$\sum F_{kx} = 0: -S \cdot \cos \alpha_1 + T_1 \cdot \cos \alpha_4 + S_1 \cdot \cos \alpha_2 = 0. \quad (1)$$

$$\sum F_{ky} = 0: -P + S \cdot \sin \alpha_1 - T_1 \cdot \sin \alpha_4 - S_1 \cdot \sin \alpha_2 = 0. \quad (2)$$

$$\sum M = 0: T_1 \cdot R_1 - P \cdot R_1 = 0. \quad (3)$$

Из (3) получим:

$$T_1 = P. \quad (4)$$

Система уравнений сил и моментов для точки O_2 :

$$\sum F_{kx} = 0: T_2 \cdot \cos \alpha_6 + T_3 \cdot \cos \alpha_5 - S_1 \cdot \cos \alpha_2 = 0. \quad (5)$$

$$\sum F_{ky} = 0: S_1 \cdot \sin \alpha_2 - T_2 \cdot \sin \alpha_6 - T_3 \cdot \sin \alpha_5 = 0. \quad (6)$$

$$\sum M = 0: T_3 \cdot R_2 - T_2 \cdot R_2 = 0. \quad (7)$$

Из (7) получим:

$$T_2 = T_3. \quad (8)$$

Система уравнений сил и моментов для точки O_3 :

$$\sum F_{kx} = 0: Q - T_1 \cdot \cos \alpha_4 - T_2 \cdot \cos \alpha_6 - T_3 \cdot \cos \alpha_5 = 0. \quad (9)$$

$$\sum F_{ky} = 0: -G + T_1 \cdot \sin \alpha_4 + T_2 \cdot \sin \alpha_6 + T_3 \cdot \sin \alpha_5 = 0. \quad (10)$$

$$\sum M = 0: T_1 \cdot R_3 - T_2 \cdot R_3 = 0. \quad (11)$$

Из (11) получим:

$$T_1 = T_3. \quad (12)$$

С учетом (4) и (8):

$$T_1 = T_2 = T_3 = P. \quad (13)$$

Объединив (1) с (5) и (2) с (6) с учетом (13), получим:

$$-S \cdot \cos \alpha_1 + P(\cos \alpha_4 + \cos \alpha_6 + \cos \alpha_5) = 0. \quad (14)$$

$$-P + S \cdot \sin \alpha_1 - P(\sin \alpha_4 + \sin \alpha_6 + \sin \alpha_5) = 0. \quad (15)$$

Перепишем (9) и (10) с учетом (13):

$$P \cdot (\cos \alpha_4 + \cos \alpha_6 + \cos \alpha_5) = Q. \quad (16)$$

$$P \cdot (\sin \alpha_4 + \sin \alpha_6 + \sin \alpha_5) = G. \quad (17)$$

Подставив (16) в (14), а (17) в (15), окончательно запишем:

$$S \cdot \cos \alpha_1 = Q. \quad (18)$$

$$S \cdot \sin \alpha_1 = P + G. \quad (19)$$

Анализируя выражения (18) и (19), можно прийти к выводу, что сила S имеет две составляющие: первая – горизонтальная, обусловленная натяжением контактного провода, вторая – вертикальная, обусловленная весом грузов компенсатора P и весом контактного провода, зажимов – G . Результирующее значение силы S будет определяться выражением:

$$S = \sqrt{Q^2 + (P + G)^2}. \quad (20)$$

При возникновении дополнительных горизонтальных нагрузок (например гололедно-изморозевые отложения) на контактный провод составляющая силы G получит некоторое приращение ΔG , а сила S получит приращение ΔS .

$$\Delta S = \sqrt{Q^2 + (P + G + \Delta G)^2} - \sqrt{Q^2 + (P + G)^2}. \quad (21)$$

Для расчета величины приращения ΔG важно помнить, что составляющие Q , P и G для конкретного анкерного участка являются неизменными величинами и определяются конструктивными параметрами контактной подвески, а следовательно, могут быть заданы.

Выводы

Выполненные исследования показали, что возникновение дополнительных гололедных нагрузок ΔG на контактный провод вызовет некоторое изменение силы в точке крепления неподвижного блока компенсатора. Такое положение вопроса позволяет дать рекомендацию по выбору оптимального места установки тензометрических датчиков. Для использования выражения (21) измерительные тензометрические датчики стационарно закрепляются между штангой для крепления неподвижного ролика типа «ушко-ушко» на опоре и неподвижным роликом блоков грузокомпенсирующих устройств. Для считывания информации с тензодатчиков на опоре размещаются модули приемо-передающей аппаратуры для связи датчиков с центром управления.

Здесь необходимо сделать весьма важную оговорку, касающуюся чувствительности разрабатываемого принципа на всем протяжении от места соединения контактного провода с компенсатором до средней анкерной. Составляющая силы G будет определяться весом контактного провода со всеми составляющими, находящимися на нем в пределах половины анкерного участка, при условии, что отсутствует поддерживающее воздействие струн цепной контактной подвески. При условии, что положение контактного провода можно считать беспровесным, а натяжение достаточно высоким, реакцией струн можно пренебречь [9, 10]. В противном случае чувствительность будет снижаться, в пределе приближаясь к возможности обнаружения гололеда только в первом пролете от места установки компенсатора.

Список литературы

- 1 **Фигурнов, Е. П.** Условия успешной плавки гололеда на неизолированных проводах воздушных линий / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Т. Е. Петрова // *Электричество*. – 2013. – № 8. – С. 21–27. – ISSN 0013-5380.
- 2 **Жарков, Ю. И.** Повышение надежности и безопасности электроснабжения на основе мониторинга и раннего обнаружения опасных внешних воздействий и скрытых дефектов в устройствах электроснабжения / Ю. И. Жарков, Ю. Г. Семенов, Е. П. Фигурнов // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2012. – № 1 (45). – С. 190–195. – ISSN 0201-727X.
- 3 **Кубкина, О. В.** Исследование возможности применения емкостного способа контроля толщины стенки гололедно-изморозевых образований на проводах. Математическая модель емкости планарного конденсатора / О. В. Кубкина // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2008. – № 2 (30). – С. 95–100. – ISSN 0201-727X.
- 4 **Попова, Н. А.** Уточнение критериев применения автоматизированной системы борьбы с гололедообразованием на проводах контактной сети / Н. А. Попова, А. В. Безуглый // *Инженерный вестник Дона*. – 2019. – № 9 (60). – С. 20. – ISSN 2073-8633.
- 5 Методические указания по борьбе с гололедом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПП, автоблокировки и продольного

References

- 1 **Figurnov, E. P.** Conditions of successful melting of ice on uninsulated wires of overhead lines / E. P. Figurnov, Yu. I. Zharkov, T. E. Petrova // *Elektrichestvo*. – 2013. – No. 8. – P. 21–27. – ISSN 0013-5380.
- 2 **Zharkov, Yu. I.** Increasing the reliability and safety of the power supply on the basis of monitoring and early detection of the dangerous external effects and hidden defects in the power supply devices / Yu. I. Zharkov, Yu. G. Semenov, E. P. Figurnov // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2012. – No. 1 (45). – P. 190–195. – ISSN 0201-727X.
- 3 **Kubkina, O. V.** Investigation of the possibility of using the capacitive method of controlling the wall thickness of ice and frost formations on wires. Mathematical model of the planar capacitor capacity / O. V. Kubkina // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2008. – No. 2 (30). – P. 95–100. – ISSN 0201-727X.
- 4 **Popova, N. A.** Refinement of the application criteria of the automated system for the anti-icing system on the contact network wires / N. A. Popova, A. V. Bezuglyy // *Engineering Journal of Don*. – 2019. – No. 9 (60). – P. 20. – ISSN 2073-8633.
- 5 Methodical guidelines for control of ice and auto-vibration on the contact network, DPR lines, autoblocking and longitudinal power supply. Book 1. Basics of prophylactic heating, melting of

электрообеспечения. Кн. 1. Основы профилактического подогрева, плавки гололедно-изморозевых образований и меры борьбы с автоколебаниями проводов контактной сети и высоковольтных линий / РЖД, Департамент электрификации и электрообеспечения. – Москва, 2004. – 132 с.

6 Методические указания по борьбе с гололедом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПР, автоблокировки и продольного электрообеспечения. Кн. 3. Методические указания по борьбе с гололедом на контактной сети системы переменного тока / РЖД, Департамент электрификации и электрообеспечения. – Москва, 2004. – 132 с.

7 **Трубицин, М. А.** Анализ способов обнаружения гололеда на проводах ЛЭП и их применение для контактной сети / М. А. Трубицин, О. Г. Лукашевич // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4 (43). – С. 23. – ISSN 2073-8633.

8 **Трубицин, М. А.** Проблема гололеда на проводах воздушных линий системы электрообеспечения железнодорожного транспорта / М. А. Трубицин, О. Г. Лукашевич // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4 (47). – С. 30. – EDN NUDHYH.

9 **Михеев, В. П.** Контактные сети и линии электропередачи : учебник для вузов железнодорожного транспорта / В. П. Михеев. – Москва : Маршрут, 2003. – 416 с. – ISBN 5-89035-086-2.

10 **Фрайфельд, А. В.** Проектирование контактной сети электрифицированных железных дорог / А. В. Фрайфельд. – Москва : Транспорт, 1984. – 327 п.

ice and frost formations and measures against auto-oscillations of wires of the contact network and high-voltage lines / Russian Railways, Department of Electrification and Power Supply. – Moscow, 2004. – 132 p.

6 Methodical instructions for control of ice and auto oscillations on the contact network, DPR lines, autoblocking and longitudinal power supply. Book 3. Methodical instructions for the control of ice on the contact network of the alternating current system / Russian Railways, Department of Electrification and Power Supply. – Moscow, 2004. – 132 p.

7 **Trubitsin, M. A.** Analysis of methods for detecting ice on the wires of power lines and their application for the contact network / M. A. Trubitsin, O. G. Lukashovich // Engineering Journal of Don. – 2016. – No. 4 (43). – P. 23. – ISSN 2073-8633.

8 **Trubitsin, M. A.** Problem of ice on the wires of overhead lines of the railway transport power supply system / M. A. Trubitsin, O. G. Lukashovich // Engineering Journal of Don. – 2017. – No. 4 (47). – P. 30. – EDN NUDHYH.

9 **Mikheev, V. P.** Contact networks and power lines : a textbook for railway transport universities / V. P. Mikheev. – Moscow : Marshrut, 2003. – 416 p. – ISBN 5-89035-086-2.

10 **Freifeld, A. V.** Designing of the contact network of electrified railways / A. V. Freifeld. – Moscow : Transport, 1984. – 327 p.

V. N. Chernykh, V. A. Osipov

IMPROVING THE EARLY ICE FORMATION DETECTION SYSTEM FOR CONTACT NETWORKS OF THE ELECTRIFIED RAILWAYS

Abstract. The paper is devoted to the development of the principles of early detection of ice and frost formations on the contact network of electrified railroads. The method considered in the paper is relevant for use on low-intensity crossings equipped with fully compensated contact suspension. The paper substantiates the possibility of determining the fact of the beginning of ice deposition by measuring the force at the point of fixing the fixed roller of the contact network compensator. On the basis of the performed analysis the optimal place of installation of strain gauge measuring body of the system of early detection of ice formation is proposed. A method of analyzing the obtained data to isolate the variable component of the wire weight is proposed. The paper also gives a review of the existing methods of de-icing and their evaluation.

Keywords: ice, ice-frost formations, ice control, strain gauge, contact network.

For citation: Chernykh, V. N. Improving the early ice formation detection system for contact networks of the electrified railways / V. N. Chernykh, V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 110–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_110.

Сведения об авторах**Черных Владимир Николаевич**

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы электротехники»,
ассистент,
e-mail: v014nd94@yandex.ru

Осипов Владимир Александрович

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы электротехники»,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: ova_toe@rgups.ru

Information about the authors**Chernykh Vladimir Nikolayevich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Basis of Electrical
Engineering»,
Assistant,
e-mail: v014nd94@yandex.ru

Osipov Vladimir Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Basis of Electrical
Engineering»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Department,
e-mail: ova_toe@rgups.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.025.4

DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_119

*С. Н. Глаголев, И. А. Новиков, Ю. Н. Линник, А. А. Акулов***ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОДДЕРЖКА РАБОТЫ ГРУЗОВОЙ
ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Аннотация. Рассмотрены направления совершенствования работы грузовой транспортно-логистической системы за счет предлагаемых мер государственной поддержки, инструментов цифровой трансформации транспортной отрасли, применения современных развивающихся инновационных цифровых технологий, организации грузовых перевозок с использованием элементов цифровой инфраструктуры, а также введения в работу сервисов ГИС «Национальная цифровая транспортно-логистической платформа», ГИС «Транспортно-экономический баланс». Представленные направления позволят сократить себестоимость процесса перевозок, повысить сервис транспортно-логистического обслуживания, произвести синхронизацию работы элементов транспортно-логистической системы, оптимально управлять запасами, ускорить движение материальных грузопотоков и в целом повысить конкурентоспособность транспортно-логистической системы страны на международном уровне.

Ключевые слова: транспортно-логистическая система, грузоперевозки, технологии, инфраструктура, цифровизация, государственная информационная система.

Для цитирования: Государственная поддержка работы грузовой транспортно-логистической системы / С. Н. Глаголев, И. А. Новиков, Ю. Н. Линник, А. А. Акулов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 119–131. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_119.

Введение

Повышение эффективности эксплуатации автомобильного транспорта, улучшение оказываемых транспортных услуг населению страны, организации международных перевозок, совершенствование работы грузовой транспортно-логистической системы (ГТЛС) регионов и страны в целом – некоторые приоритетные для государства направления развития транспортной отрасли [1]. Необходимость улучшения эксплуатации грузовой транспортно-логистической системы за счет предлагаемых мер государственной поддержки, инструментов цифровой трансформации транспортной отрасли, применения современных развивающихся инновационных цифровых технологий, организации грузовых перевозок с использованием элементов цифровой инфраструктуры определена в посланиях Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации, указах Президента Российской Федерации, в нормативно-правовых материалах [2–6] и других документах, приведенных в данной статье.

Основная часть

В нормативно-правовых указах и распоряжениях федерального значения, утвержденных Президентом Российской Федерации и Правительством Российской Федерации [7–10], перед специалистами автотранспортной отрасли поставлена задача повышения эффективности работы грузовой транспортно-логистической системы. Ключевые цели государственной политики Российской Федерации в области транспорта в 2023 и 2024 годах представлены на рис. 1. По рассматриваемому в статье вопросу выделены четыре ключевые цели на государственном уровне [1]. Одной из основных задач, направленных на достижение указанных целей, является развитие и поддержка ГТЛС регионов и страны в целом (см. рис. 1).

В настоящее время на государственном уровне предлагаются и внедряются решения и меры поддержки, использование которых позволит совершенствовать функционирование ГТЛС. Итоги деятельности государственной политики в области улучшения эксплуатации ГТЛС в 2023 году по направлениям, связанным с увеличением объема и скорости доставки грузов, развитием мультимодальных логистических технологий, вопросами цифровой и низкоуглеродистой трансформации от-

расли, согласно докладу о результатах деятельности Министерства транспорта Российской Федерации за 2023 год представлены на рис. 2 [11].



Рис. 1. Перечень целей государственной политики в области транспорта

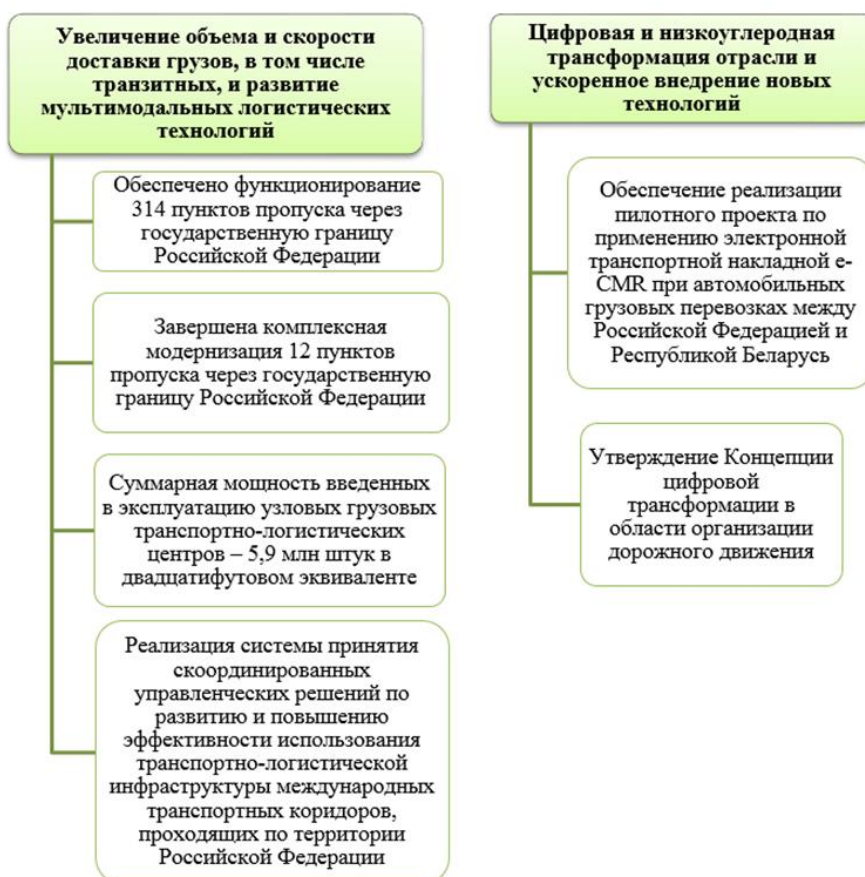


Рис. 2. Итоги деятельности государственной политики в области совершенствования работы ГТЛС в 2023 году [11]

Повысить эффективность работы грузовой транспортно-логистической системы возможно за счет использования комплекса современных инновационных технологий, применения предлагаемых инфраструктурных решений. Направления и меры государственной поддержки транспортно-логистической системы страны, цифровизация грузовых перевозок и цифровизация управления транспортным комплексом также способствуют повышению конкурентоспособности ГТЛС (рис. 3).

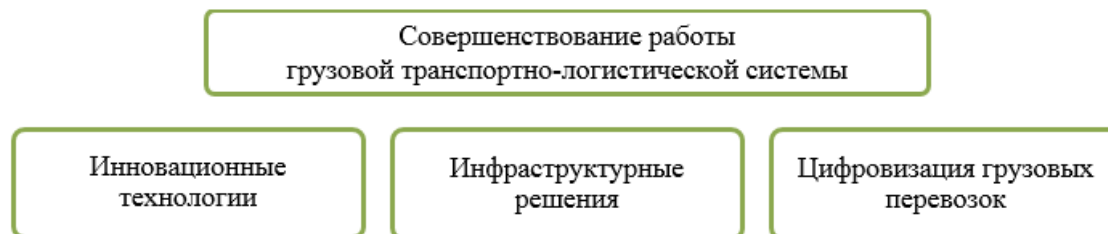


Рис. 3. Направления совершенствования работы ГТЛС

В [12, 13] представлены инновационные технологии, использование которых способствует повышению эффективности работы грузовых ГТЛС регионов и страны в целом и улучшению качества предоставления транспортных услуг. Осуществление грузовых перевозок и логистических услуг с применением современных объектов инфраструктуры, предложенных в [14], – еще одно направление улучшения работы ГТЛС.

Проекты и инициативы, предложенные на федеральном уровне, направленные на реализацию целей и задач цифровизации грузовых перевозок, цифровой трансформации работы ГТЛС, представлены на рис. 4 [15].

В направлении цифровизации грузовых перевозок и цифровизации управления транспортным комплексом в 2024 году на государственном уровне планируются меры по обеспечению эффективного функционирования информационных систем и созданию государственных информационных систем (рис. 5).

ФГБУ «НЦКТП Минтранса России» разработан Транспортно-экономический баланс Российской Федерации (ТЭБ). На основе исходной информации механизм ТЭБ позволяет описывать фактические и прогнозные объемы грузов и корреспонденции грузовых перевозок между субъектами Российской Федерации, обеспечивать транспортно-экономический баланс Российской Федерации. В достижении принципов ТЭБ задействована транспортная система страны и виды транспорта: железнодорожный, автомобильный, внутренний водный и морской. Информация тщательно обрабатывается, верифицируется, структурируется и создается сбалансированная номенклатура грузов транспортно-экономического баланса Российской Федерации, включающая 44 рода грузов. В описании механизма принимают участие следующие роды грузов: минерально-строительные грузы; уголь, кокс, торф и сланцы; нефтяные грузы; руды; черные металлы; удобрения; лесные грузы; хлебные грузы; остальные грузы. Использование механизма ТЭБ позволяет получить матрицу корреспонденций грузоперевозок между регионами Российской Федерации в рамках единой транспортной системы страны по 44 родам грузов [16].

Министерство транспорта Российской Федерации при участии транспортно-логистических организаций – представителей Ассоциации «Цифровой транспорт и логистика» сформировали архитектуру национальной цифровой транспортно-логистической платформы (НЦТЛП) для грузоперевозок, которая была представлена в 2023 году. НЦТЛП призвана объединить цифровые логистические сервисы грузоперевозчиков на одной платформе, осуществлять взаимодействие государства, перевозчиков и их клиентов [17].

Целью внедрения НЦТЛП является использование инструментов цифровизации для создания единого информационного цифрового пространства при оказании транспортно-логистических услуг [17].

Основные сервисы экосистемы НЦТЛП для грузоперевозок включены в единую модель данных, куда также должны поступать данные из перевозочных, товаросопроводительных и разрешительных документов. В базовую архитектуру НЦТЛП предложено включить элементы, приведенные на рис. 6.

Проект «Беспилотники для пассажиров и грузов»	<ul style="list-style-type: none">• Создание центров управления и инфраструктуры для движения беспилотников• Запуск в эксплуатацию беспилотных транспортных средств• Роботизация транспортно-логистических хабов• Внедрение продвинутых систем помощи водителю
Инициатива «Беспилотные логистические коридоры»	<ul style="list-style-type: none">• Организация движения грузовых беспилотных транспортных средств на автомобильной дороге общего пользования федерального значения М-11 «Нева»
Проект «Бесшовная грузовая логистика»	<ul style="list-style-type: none">• Завершение внедрения системы отслеживания грузоперевозок с использованием электронных навигационных пломб• Разработка цифровой платформы транспортного комплекса РФ• Формирование системы сквозного обмена электронными перевозочными документами• Создание национального цифрового контура логистики в рамках реализации экосистемы цифровых транспортных коридоров ЕЭС• Реализация условий для развития электронных площадок заказа грузовых перевозок, логистических услуг и услуг электронной коммерции (FaaS)• Создание интеллектуальных пунктов пропуска через государственную границу РФ
Проект «Цифровое управление транспортной системой Российской Федерации»	<ul style="list-style-type: none">• Создание единого центра управления транспортным комплексом, ситуационных центров• Развитие системы моделирования транспортных потоков с применением технологий искусственного интеллекта
Проект «Цифровизация для транспортной безопасности»	<ul style="list-style-type: none">• Создание единого защищенного информационного пространства и защищенных технологических сетей транспортного комплекса• Цифровизация государственных услуг в области транспортной безопасности с использованием сведений ограниченного доступа• Внедрение механизмов по обеспечению информационной безопасности на объектах транспортного комплекса и системы предварительного информирования• Обеспечение мониторинга защищенности транспортной информационной инфраструктуры
Проект «Цифровые двойники объектов транспортной инфраструктуры»	<ul style="list-style-type: none">• Запуск системы контроля дорожных фондов, создание 3D-модели объектов транспортной инфраструктуры• Разработка информационной системы учета и планирования работ на проектирование, строительство, ремонт и содержание объектов транспортной инфраструктуры• Создание мобильных измерительных лабораторий• Внедрение технологий информационного моделирования на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства транспортной инфраструктуры

Рис. 4. Ключевые инициативы и проекты, направленные на цифровую трансформацию работы ГТЛС



Рис. 5. Планируемые меры государственной поддержки цифровизации грузовых перевозок в 2024 году [11]



Рис. 6. Базовая архитектура сервисов НЦТЛП

Введение в работу ГТЛС основных сервисов из предложенных архитектурой НЦТЛП для грузоперевозок позволит улучшить работу ГТЛС, сократить трудоемкость выполнения организационных работ и время доставки грузов.

Другие меры государственной поддержки работы ГТЛС, проанализированные в статье, приведены на рис. 7.

В 2023 году начат и будет продолжен эксперимент по использованию навигационных пломб в рамках анализа механизмов реализации Соглашения о применении в Евразийском экономическом союзе (ЕАЭС) навигационных пломб для отслеживания перевозок

Обеспечено информационно-технологическое сопряжение Государственной автоматизированной информационной системы «ЭРА-ГЛОНАСС» с экстренными оперативными службами в автоматизированном режиме в большинстве субъектов Российской Федерации [11]

В [20] предложены нормативно-правовые механизмы использования с 1 сентября 2023 г. «электронной очереди» для синхронизации работы грузовой транспортно-логистической системы

Развитие государственной информационной системы электронных перевозочных документов (ГИС ЭПД)

Министерством транспорта Российской Федерации проведены работы по разворачиванию государственной информационной системы электронных перевозочных документов на ресурсах ГосОблако, для обеспечения более эффективной работы различных федеральных органов исполнительной власти. Унифицированные облачные услуги оказываются на определенной платформе [11]

Рис. 7. Меры государственной поддержки работы ГТЛС

Каждая из мер государственной поддержки предлагает свои решения. Например, в области использования навигационных пломб определен национальный оператор пломбирования в Российской Федерации. Это Центр развития цифровых платформ (ЦРЦП), создаются информационные системы, интегрированные между собой, которые обладают функцией обмена информацией о перевозках. Данная мера поддержки позволит обеспечить решение вопросов, указанных на рис. 8. Некоторые меры поддержки находятся на этапе формирования, требуют анализа, корректировки, что и происходит в настоящее время. Так, первая концепция проекта «Гособлако», который нацелен на предоставление госорганам единой облачной платформы, была утверждена в 2015 году, а в 2019 году проведена ее полная переработка. Кроме того, каждая из государственных мер поддержки отражена в соответствующих нормативно-правовых документах. Например, порядок взаимодействия с экстренными оперативными службами с использованием АИС проходит в рамках принципов, указанных в [18, 19].

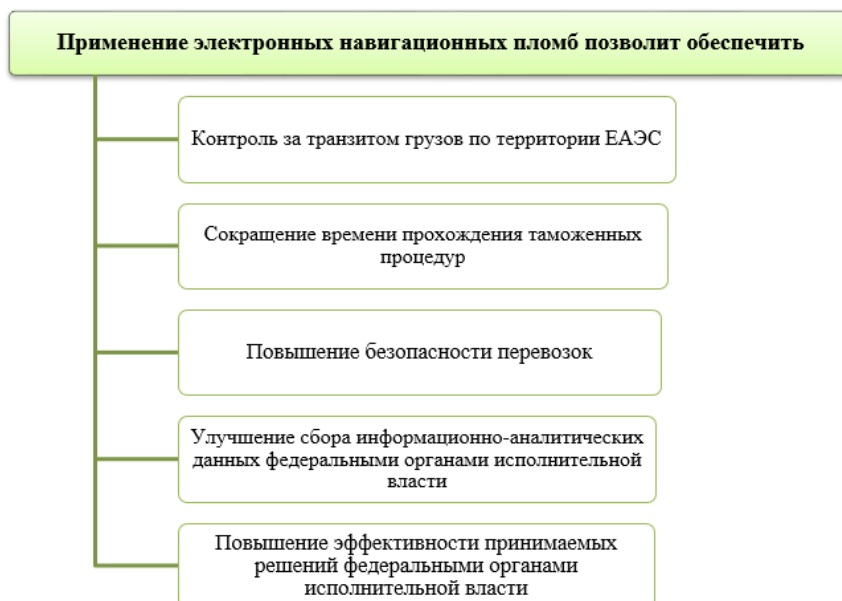


Рис. 8. Возможные результаты использования навигационных пломб

В рамках развития государственной информационной системы электронных перевозочных документов для отработки предложенных механизмов и корректировки работы ГИС ЭПД в 2023 году проведены меры, указанные на рис. 9.

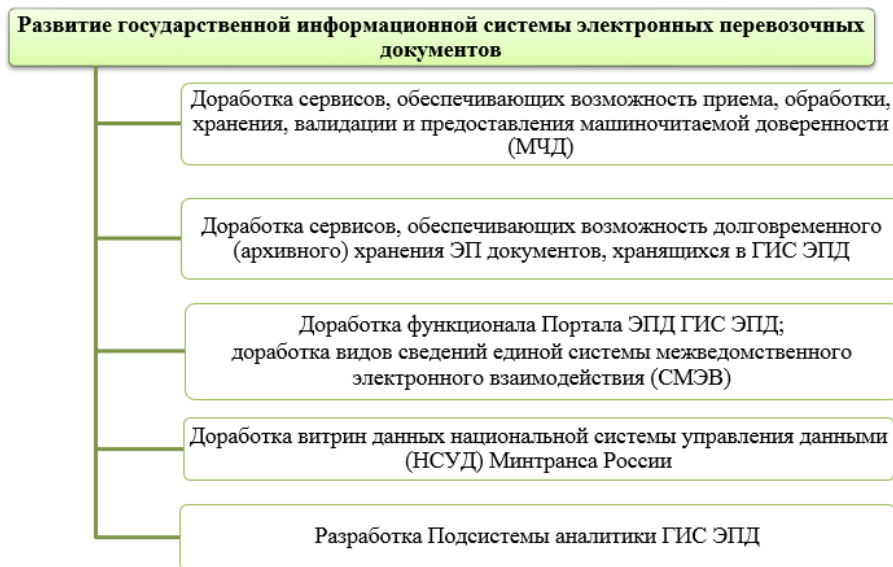


Рис. 9. Развитие государственной информационной системы электронных перевозочных документов

Расширен перечень обрабатываемых в ГИС ЭПД перевозочных документов для автомобильного транспорта. В результате с 1 марта 2023 года в электронном виде могут быть оформлены следующие документы (рис. 10) [11, 21, 22].

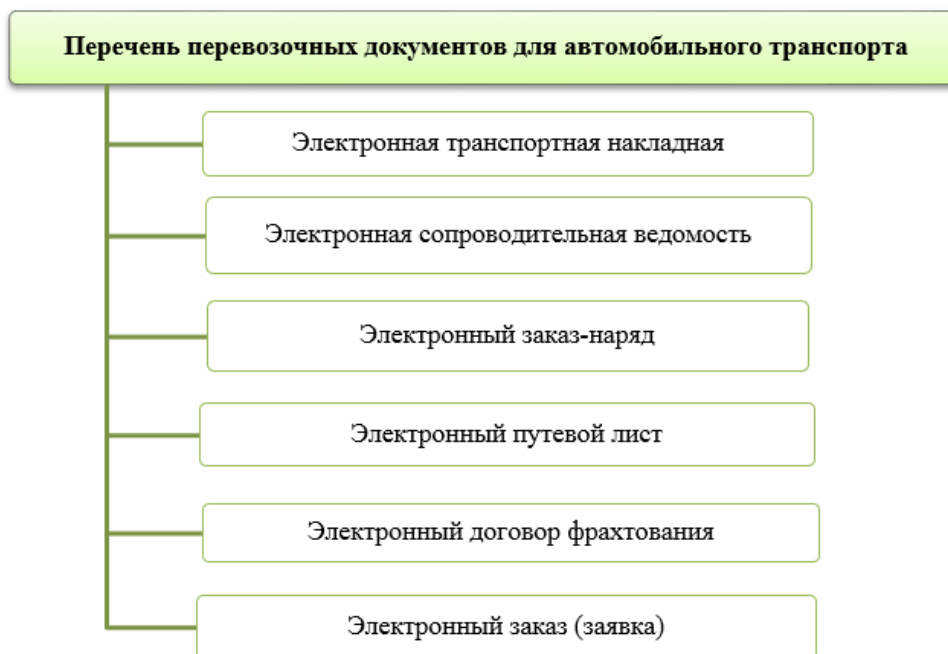


Рис. 10. Перечень обрабатываемых в ГИС ЭПД перевозочных документов для автомобильного транспорта (с первого марта 2023 года) [11]

На рис. 11 представлена обобщенная информация о возможных направлениях совершенствования работы ГТЛС с использованием актуальных инновационных цифровых технологий, инфраструк-

турных решений, инструментов цифровизации грузоперевозок и предоставляемых мер государственной поддержки транспортной отрасли.

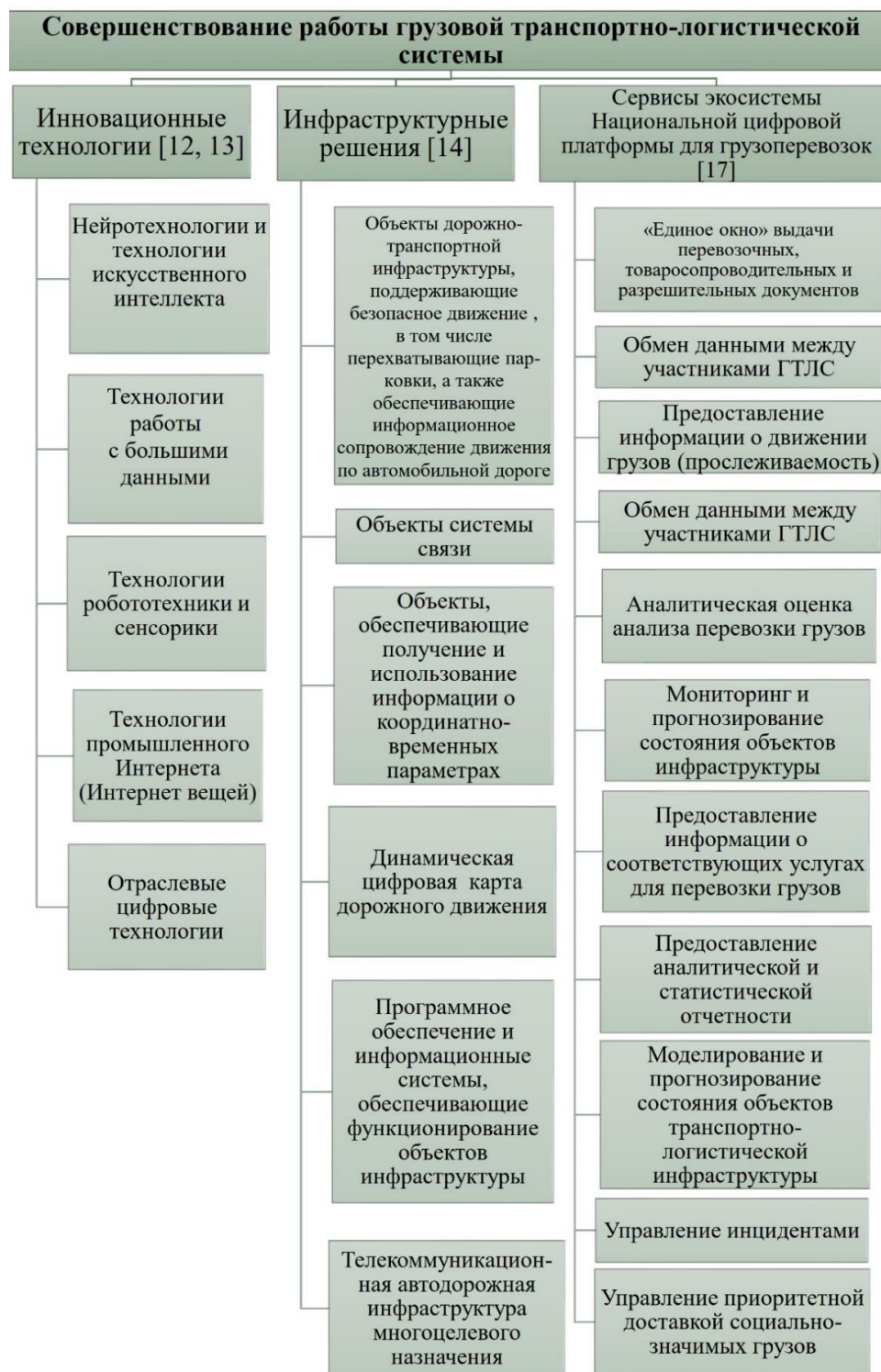


Рис. 11. Совершенствование работы ГТЛС

Рассмотренные в статье инструменты улучшения работы ГТЛС направлены на развитие экономики страны, повышение ее конкурентоспособности. Государственная политика предлагает комплекс мер, которые используются на практике, проходят апробацию, корректируются, вновь тестируются или планируются к внедрению в ближайшей перспективе. Ведется плановая, прогнозируемая работа

по повышению эффективности эксплуатации работы автомобильного транспорта. Применение инновационных цифровых технологий, инфраструктурных решений и предоставляемых мер государственной поддержки транспортной отрасли будет способствовать улучшению работы ГТЛС и позволит достичь определенных результатов, таких как сокращение себестоимости грузовых перевозок, повышение сервиса транспортно-логистического обслуживания, обеспечение бесперебойности грузовых автомобильных перевозок, синхронизация работы элементов ГТЛС и ускорение движения материальных грузопотоков.

Заключение

Развитие рассмотренных в данной статье направлений совершенствования работы ГТЛС за счет предлагаемых мер государственной поддержки, инструментов цифровой трансформации транспортной отрасли, применения современных развивающихся инновационных цифровых технологий, осуществления грузовых перевозок с использованием элементов цифровой инфраструктуры и введения в работу сервисов экосистемы национальной цифровой платформы для грузоперевозок ГИС «Национальной цифровой транспортно-логистической платформы», ГИС «Транспортно-экономический баланс» позволит решить задачи, которые ставит перед специалистами транспортной отрасли государство и в целом повысит конкурентоспособность транспортно-логистической системы страны на международном уровне.

Список литературы

- 1 Доклад о результатах деятельности Министерства транспорта Российской Федерации за 2022 год, целях и задачах на 2023 год и плановый период до 2025 года / Министерство транспорта РФ. – Москва, 2023. – 115 с.
- 2 О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года : Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204. – URL: <https://base.garant.ru/71937200/> (дата обращения: 20.04.2024).
- 3 О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года : Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474. – URL: <https://base.garant.ru/74404210/> (дата обращения: 07.05.2024).
- 4 Основные направления деятельности Правительства Российской Федерации на период до 2024 года : утверждены Председателем Правительства Российской Федерации 29 сентября 2018 г. (№ 8028п-П13). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_307872/ (дата обращения: 07.05.2024).
- 5 Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. № 207-р (в редакции распоряжения Правительства Российской Федерации от 30 сентября 2022 г. № 2877-р). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_318094/006fb940f95ef67a1a3fa7973b5a39f78dac5681/ (дата обращения: 20.04.2024).

References

- 1 Report on the results of the activities of the Ministry of Transport of the Russian Federation for 2022, goals and objectives for 2023 and the planning period until 2025 / Ministry of Transport of the Russian Federation. – Moscow, 2023. – 115 p.
- 2 On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period until 2024 : Decree of the President of the Russian Federation of May 7, 2018 No. 204. – URL: <https://base.garant.ru/71937200/> (date of access: 04/20/2024).
- 3 On the national development goals of the Russian Federation for the period until 2030 : Decree of the President of the Russian Federation of July 21, 2020 No. 474. – URL: <https://base.garant.ru/74404210/> (date of access: 05/07/2024).
- 4 The main directions of activity of the Government of the Russian Federation for the period until 2024 : approved by the Chairman of the Government of the Russian Federation on September 29, 2018 (No. 8028p-P13). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_307872/ (date of access: 05/07/2024).
- 5 Spatial development strategy of the Russian Federation for the period until 2025 : approved by Order of the Government of the Russian Federation dated February 13, 2019 No. 207-r (as amended by Order of the Government of the Russian Federation dated September 30, 2022 No. 2877-r). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_318094/006fb940f95ef67a1a3fa7973b5a39f78dac5681/ (date of access: 04/20/2024).

6 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/ (дата обращения: 21.04.2024).

7 Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011 № 899. – URL: <https://base.garant.ru/55171684/> (дата обращения: 07.05.2024).

8 О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408518353/> (дата обращения: 07.05.2024).

9 Концепция технологического развития на период до 2030 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406831204/> (дата обращения: 07.05.2024).

10 Федеральный закон «О промышленной политике в Российской Федерации» : утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 ноября 2020 г. № 3143-р. – URL: <https://base.garant.ru/70833138/> (дата обращения: 07.05.2024).

11 Доклад о результатах деятельности Министерства транспорта Российской Федерации за 2023 год, целях и задачах на 2024 год и плановый период до 2026 года / Министерство транспорта РФ. – Москва, 2024. – 40 с.

12 Об установлении экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций и утверждении Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по предоставлению транспортных услуг с использованием высокоавтоматизированных транспортных средств на территориях отдельных субъектов Российской Федерации (с изменениями и дополнениями) : постановление Правительства Российской Федерации от 29 декабря 2022 г. № 2495. – URL: <https://base.garant.ru/406065061/> (дата обращения: 07.05.2024).

13 Перечень технологий, применяемых в рамках экспериментальных правовых режимов в сфере цифровых инноваций : постановление Правительства Российской Федерации от 28 октября

6 Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035 : approved by Decree of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021 No. 3363-r. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/ (date of access: 04/21/2024).

7 On approval of priority directions for the development of science, technology and technology in the Russian Federation and the list of critical technologies of the Russian Federation : Decree of the President of the Russian Federation dated July 7, 2011 No. 899. – URL: <https://base.garant.ru/55171684/> (date of access: 05/07/2024).

8 On the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation : Decree of the President of the Russian Federation dated February 28, 2024 No. 145. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408518353/> (date of access: 05/07/2024).

9 The concept of technological development for the period until 2030 : approved by order of the Government of the Russian Federation dated May 20, 2023 No. 1315-r. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406831204/> (date of access: 05/07/2024).

10 Federal Law «On Industrial Policy in the Russian Federation» : approved by order of the Government of the Russian Federation dated November 28, 2020 No. 3143-p. – URL: <https://base.garant.ru/70833138/> (date of access: 05/07/2024).

11 Report on the results of the activities of the Ministry of Transport of the Russian Federation for 2023, goals and objectives for 2024 and the planning period until 2026 / Ministry of Transport of the Russian Federation. – Moscow, 2024. – 40 p.

12 On the establishment of an experimental legal regime in the field of digital innovations and approval of the Program of an experimental legal regime in the field of digital innovations for the provision of transport services using highly automated vehicles in the territories of certain constituent entities of the Russian Federation (with amendments and additions) : Decree of the Government of the Russian Federation dated December 29, 2022 No. 2495. – URL: <https://base.garant.ru/406065061/> (date of access: 05/07/2024).

13 List of technologies used within the framework of experimental legal regimes in the field of digital innovation : Decree of the Government of the Russian Federation of October 28, 2020 No. 1750. –

2020 года № 1750. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74723381/> (дата обращения: 07.05.2024).

14 Об установлении экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций и утверждении Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по эксплуатации высокоавтоматизированных транспортных средств в отношении реализации инициативы «Беспилотные логистические коридоры» на автомобильной дороге общего пользования федерального значения М-11 «Нева» : постановление Правительства Российской Федерации от 17.10.2022 г. № 1849 (в редакции постановлений Правительства Российской Федерации от 17.04.2023 № 607, от 08.08.2023 № 1296, от 24.11.2023 № 1986, от 14.02.2024 № 161). – URL:

<https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405410787/> (дата обращения: 07.05.2024).

15 Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли РФ до 2030 г. : распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2021 г. № 3744-р. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403211610/> (дата обращения: 07.05.2024).

16 Транспортно-экономический баланс Российской Федерации. – URL:

<https://mintrans.org/ru/transportnoe-planirovanie-i-modelirovanie/transportno-ekonomicheskij-balans-rossijskoj-federacii/> (дата обращения 28.03.2024).

17 Минтранс создает цифровую транспортную платформу для обмена данными с БРИКС и ШОС // Ведомости. – 2023, 06 июля. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/07/06/983962-mintrans-sozdaet-tsifrovuyu-transportnuyu-platformu-dlya-obmena-dannimi-s-briks-i-shos> (дата обращения 28.03.2024).

18 О Государственной автоматизированной информационной системе «ЭРА-ГЛОНАСС» : Федеральный закон от 28.12.2013 N 395-ФЗ (ред. от 30.12.2020). – URL: <https://base.garant.ru/70552564/> (дата обращения 28.03.2024).

19 О порядке взаимодействия с Государственной автоматизированной информационной системой «ЭРА-ГЛОНАСС» (с изменениями и дополнениями) : постановление Правительства Российской Федерации от 21 февраля 2015 г. N 151. – URL: <https://base.garant.ru/70877768/> (дата обращения 28.03.2024).

20 О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 17.02.2023 N 24-ФЗ (послед-

URL:

<https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74723381/> (date of access: 05/07/2024).

14 On the establishment of an experimental legal regime in the field of digital innovation and approval of the Program of an experimental legal regime in the field of digital innovation for the operation of highly automated vehicles in relation to the implementation of the initiative «Unmanned logistics corridors» on the public highway of federal significance M-11 «Neva» : Decree of the Government of the Russian Federation dated October 17, 2022 No. 1849 (as amended by Decrees of the Government of the Russian Federation dated April 17, 2023 No. 607, dated August 8, 2023 No. 1296, dated November 24, 2023 No. 1986, dated February 14, 2024 No. 161). – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405410787/> (date of access: 05.07.2024).

15 On approval of the strategic direction in the field of digital transformation of the transport industry of the Russian Federation until 2030 : Decree of the Government of the Russian Federation dated December 21, 2021 No. 3744-r. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403211610/> (date of access: 05/07/2024).

16 Transport and economic balance of the Russian Federation. – URL:

<https://mintrans.org/ru/transportnoe-planirovanie-i-modelirovanie/transportno-ekonomicheskij-balans-rossijskoj-federacii/> (date of access: 03/28/2024).

17 The Ministry of Transport is creating a digital transport platform for data exchange with BRICS and the SCO // Gazette. – 2023, July 06. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/07/06/983962-mintrans-sozdaet-tsifrovuyu-transportnuyu-platformu-dlya-obmena-dannimi-s-briks-i-shos> (date of access: 03/28/2024).

18 On the State Automated Information System «ERA-GLONASS» : Federal Law dated December 28, 2013 N 395-FZ (as amended on December 30, 2020). – URL: <https://base.garant.ru/70552564/> (date of access: 03/28/2024).

19 On the procedure for interaction with the State Automated Information System «ERA-GLONASS» (with amendments and additions) : Decree of the Government of the Russian Federation of February 21, 2015 N 151. – URL: <https://base.garant.ru/70877768/> (date of access: 03/28/2024).

20 On amendments to certain legislative acts of the Russian Federation : Federal Law No. 24-FZ dated 17.02.2023 (latest edition). – URL:

няя редакция). – URL: <https://base.garant.ru/406399939/> (дата обращения: 07.05.2024).

21 Государственная информационная система электронных перевозочных документов (ГИС ЭПД). – URL: <https://mintrans.gov.ru/activities/214./312?ysclid=luh6v021p7480183631> (дата обращения: 28.03.2024).

22 Geographic information systems to improve road safety / I. A. Novikov, A. E. Borovskoy, Y. V. Gorbun, A. V. Terentyev, M. G. Pletney // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. – 2021. – DOI 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416096.

23 Information technologies and management of transport systems development of the approach to assessing adaptation of the intersection transport model / I. A. Novikov, S. N. Glagolev, A. N. Novikov, A. G. Shevtsova // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 632. – Is. 012052. – P. 1–6.

<https://base.garant.ru/406399939/> (date of access: 05/07/2024).

21 State information system of electronic transportation documents (GIS EPD). – URL: <https://mintrans.gov.ru/activities/214./312?ysclid=luh6v021p7480183631> (date of access: 03/28/2024).

22 Geographic information systems to improve road safety / I. A. Novikov, A. E. Borovskoy, Y. V. Gorbun, A. V. Terentyev, M. G. Pletney // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. – 2021. – DOI 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416096.

23 Information technologies and management of transport systems development of the approach to assessing adaptation of the intersection transport model / I. A. Novikov, S. N. Glagolev, A. N. Novikov, A. G. Shevtsova // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 632. – Is. 012052. – P. 1–6.

S. N. Glagolev, I. A. Novikov, Yu. N. Linnik, A. A. Akulov

STATE SUPPORT FOR THE OPERATION OF THE CARGO TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM

Abstract. The authors analyzed the directions for improving the operation of the freight transport and logistics system through the proposed measures of state support, tools for digital transformation of the transport industry, the use of modern developing innovative digital technologies, the organization of freight transportation using elements of digital infrastructure and the introduction of GIS services of the National Digital Transport -logistics platform”, GIS “Transport and Economic Balance”. The presented directions will make it possible to reduce the cost of the transportation process, improve the service of transport and logistics services, synchronize the work of elements of the transport and logistics system, optimally manage inventories, speed up and facilitate the movement of material cargo flows.

Keywords: transport and logistics system, cargo transportation, technology, infrastructure, digitalization, state in-formation system.

For citation: State support for the operation of the cargo transport and logistics system / S. N. Glagolev, I. A. Novikov, Yu. N. Linnik, A. A. Akulov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 119–131. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_119.

Сведения об авторах

Глаголев Сергей Николаевич

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова), доктор экономических наук, профессор, ректор, e-mail: rector@intbel.ru

Новиков Иван Алексеевич

Белгородский государственный технологический

Information about the authors

Glagolev Sergey Nikolaevich

Belgorod State Technological University after V. G. Shukhov (BSTU after V. G. Shukhov), Doctor of Economic Sciences, Professor, Rector, e-mail: rector@intbel.ru

Novikov Ivan Alekseevich

Belgorod State Technological University after

университет им. В. Г. Шухова
(БГТУ им. В. Г. Шухова),
доктор технических наук, профессор,
директор института,
e-mail: ooows@mail

Линник Юрий Николаевич

Государственный университет управления (ГУУ),
кафедра «Экономика и управление в
топливно-энергетическом комплексе»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: yn_linnik@guu.ru

Акулов Алексей Андреевич

ГУУ, научно-исследовательский институт
государственной политики и управления
отраслевой экономикой,
кандидат технических наук,
научный сотрудник,
e-mail: aa_akulov@guu.ru

V. G. Shukhov (BSTU after V. G. Shukhov),
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Director of the Institute,
e-mail: ooows@mail

Linnik Yuri Nikolayevich

State University of Management (SUM),
Chair «Economics and Management in the Fuel
and Energy Complex»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: yn_linnik@guu.ru

Akulov Alexey Andreevich

State University of Management, Research
Institute of State Policy and Sectoral Economy
Management,
Candidate of Engineering Sciences, Researcher,
e-mail: aa_akulov@guu.ru

А. П. Грефенштейн

УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В ГОРОДСКИХ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗКАХ

Аннотация. Описано транспортно-экономическое содержание подхода по формированию договорного тарифа на городские железнодорожные грузоперевозки в рамках концепции распределительных центров. Тариф на новую услугу предложено определять с учетом цен конкурирующих автотранспортных предприятий для различных объемов грузов, предъявляемых к перевозке на расстояния в пределах агломерации крупного города.

По предложенному подходу рассчитаны и сопоставлены расходы на перевозку грузов в автомобилях и вагонах, приведены примеры рациональных вариантов реализации перевозок с городскими распределительными центрами. Результаты позволили сделать вывод о возможности предоставления новой железнодорожной услуги по перевозке на короткие расстояния при минимально достаточном грузопотоке.

Ключевые слова: городской распределительный центр, городские перевозки, автотранспорт, железнодорожный транспорт, крупный город, агломерация.

Для цитирования: Грефенштейн, А. П. Условия применения железнодорожного транспорта в городских грузовых перевозках / А. П. Грефенштейн // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 132–142. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_132.

Введение

Проблема негативного влияния автомобильного транспорта на жизнедеятельность людей является не новой, но весьма актуальной. В последние десятилетия данный вопрос рассматривается с позиции отрицательного воздействия грузовых автоперевозок на крупные города и их жителей. Автотранспорт считается главным источником формирования выбросов CO₂, CO, N₂O, CH₄, сажи и т. д., дорожно-транспортных происшествий, загруженности улично-дорожной сети и других пространств (например, парковок и стоянок) [1].

На практике управление грузовыми перевозками обычно происходит на основе правил дорожного движения (запрещение поездок различным категориям автомобилей в определенные часы суток или на определенных улицах и дорогах). В области научных разработок, напротив, исследования посвящены применению «альтернативных перевозок» с целью уменьшения негативных последствий от транспортных средств (ТС).

Новый научный подход, позволяющий развивать и расширять знания о современных методах организации и управления городскими грузовыми перевозками, называется «городской логистикой». Городская логистика, по сути, как новая функциональная область этой науки, направлена на достижение максимальных суммарных (общих) положительных результатов для всех участников транспортного процесса, в числе которых жители и административно-управленческий аппарат города, коммерческие компании, транспортно-экспедиционные предприятия и т. д.

Таким решением является многовидовая автомобильно-железнодорожная схема организации перевозок с городскими распределительными центрами (ГРЦ). Ее содержание ранее было подробно описано в научных работах [1–3], поэтому в текущей статье оно не приводится. На рис. 1 представлена иллюстрация технологии из [1–3], а на рис. 2 – пример организации таких перевозок на реальном географическом объекте.

Актуальность упомянутой темы подтверждается тем, что ряд отечественных и зарубежных авторов (например, Б. У. Сыздыкбаева, А. Ю. Тюрин, Э. Р. Айтбагина, О. А. Лебедева, М. К. Роженко, М. Mepparambath, L. Cheah, С. Courcoubetis, М. D. Simoni, Е. Nathanail, М. Gogas, S. S. Isa, М. Roca-Riu, К. Chwesiuk и другие) независимо друг от друга изучали целесообразность создания ГРЦ в городах разных стран. Исследовались вопросы выбора мест размещения ГРЦ, экономических аспектов их функционирования, технических и технологических проблем их создания, а также управления.

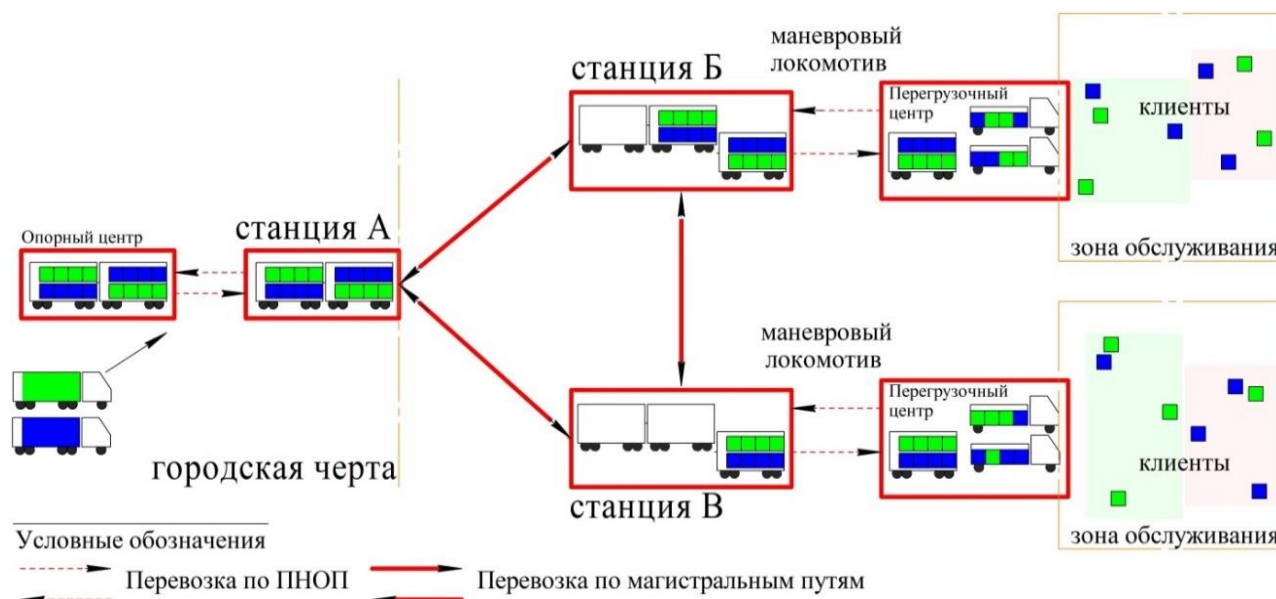


Рис. 1. Схема организации многовидовых перевозок с ГРЦ



Рис. 2. Схема примера организации перевозок с ГРЦ

Ожидается, что функционирование ГРЦ позволит консолидировать несколько партий грузов разных клиентов в рамках одной доставки и, соответственно, уменьшать количество ТС в общем трафике и их суммарный пробег в отдельных районах города [2]. На рис. 1 и 2 партии грузов разных клиентов изображены синим и зеленым цветами.

Такое сокращение общего числа транспорта достигается за счет повышения так называемого «уровня консолидации» – путем объединения большего числа партий грузов в одном автомобиле, нежели до создания ГРЦ. Сокращение общего пробега ТС обуславливается повышением «уровня участия» клиентов в новой технологии. Это означает, что на величину пробега ТС оказывает влияние не только число перевозимых партий грузов, но и их принадлежность и, соответственно, адрес (пункт) назначения. За счет более близкого расположения разных клиентов (магазинов, предприятий и т. д.) сокращается протяженность маршрутов доставки, нежели до создания ГРЦ.

В ранее опубликованных работах также было определено, что для большего сокращения числа автомобилей необходимо перераспределять входящие в город грузопотоки на другие виды транспорта [3, 4], например, заменить «тяжелые» ТС вагонами. При этом интеграция железнодорожного

транспорта в городскую среду агломерации должна обеспечивать конкурентоспособное время перевозки, однако при существующем порядке развоза грузов нормативный срок доставки в железнодорожном узле составит трое суток.

Известны разные примеры использования рельсового транспорта в городах: например, специальный грузовой трамвай или совмещение пассажирских и грузовых вагонов трамвая, метро. В статье [2] предложен новый способ развоза грузов, обеспечивающий сокращение технологического срока доставки. Он основывается на рациональном использовании имеющихся ресурсов владельца инфраструктуры и заключается «в применении станционного или диспетчерского локомотива для передачи груженых и порожних вагонов между станциями, на базе которых созданы ГРЦ» (см. рис. 1). В [2] речь идет об использовании маневрового локомотива или нескольких локомотивов в работе на перегонах. Такой способ не противоречит Инструктивным указаниям по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД».

В реальных условиях должно выполняться следующее:

1) железнодорожные станции должны иметь соответствующую оснащенность для выполнения необходимых коммерческих операций с вагонами, в том числе на путях необщего пользования (ПНОП);

2) загрузка используемых локомотивов должна обеспечивать их использование в дополнительном внутриузловом движении;

3) резерв пропускной способности используемых железнодорожных перегонов должен позволять пропустить дополнительное число поездов или пар поездов с требуемой приоритетностью.

В рамках технологии [2], изображенной на рис. 1, необходимо определять величину цен на предложенный способ (услугу) развоза грузов по железнодорожным путям. Однако вопрос формирования допустимого договорного тарифа не рассматривался ранее. Поэтому целью настоящей статьи является определение экономически обоснованных условий применения железнодорожного транспорта в городских грузовых перевозках с ГРЦ.

Методы исследования

Сопоставление значений расходов при разных вариантах организации перевозок позволит определить величину допустимого тарифа ОАО «РЖД» на новую услугу на основе клиентоориентированного подхода.

Расходы железнодорожной перевозки предложено рассчитывать в зависимости от затрат на выполнение работ по обмену вагонов на станции и по перевозке по путям общего и необщего пользования, а также учитывать вагонную составляющую тарифа. При оценке рациональных условий применения железнодорожного транспорта в описанной выше технологии должно выполняться условие:

$$C_r^{\max} + C_{rs} \leq C_a^{\max}, \quad (1)$$

где $C_{r,a}^{\max}$ – максимально рентабельная цена (железнодорожный или автомобильный транспорт соответственно), руб.;

C_{rs} – величина вагонной составляющей тарифа на железнодорожном транспорте, руб.

Слагаемое формулы (1) C_{rs} определяется количеством используемых вагонов и временем доставки. Остальные слагаемые могут рассчитываться по формуле (2):

$$C_{r,a}^{\max} = (1 + r_{r,a}) \cdot C_{r,a}, \quad (2)$$

где $r_{r,a}$ – уровень рентабельности (железнодорожный или автомобильный транспорт соответственно);

$C_{r,a}$ – общие расходы по выполнению соответствующей работы или услуги (железнодорожный или автомобильный транспорт соответственно), руб.

Тогда из условия (1) границы уровня рентабельности новой услуги ОАО «РЖД» с учетом автотранспорта можно найти по неравенству (3):

$$0 < r_r \leq \frac{C_a \cdot (1 + r_a) - C_{rs}}{C_r} - 1. \quad (3)$$

Опишем предлагаемые методики и подходы для расчета общих расходов по выполнению соответствующей работы или услуги на разных видах транспорта – C_a и C_r .

Автомобильный транспорт (методика)

Текущие уровни рыночных цен на предприятиях, оказывающих услуги в автотранспортной сфере, имеют достаточно разные диапазоны. Значительное число транспортно-экспедиционных компаний на официальных сайтах предлагают следующие схемы: сборную междугороднюю отpravку, «выделенный транспорт» (прямую помашинную отpravку) или почасовую аренду с дополнительными надбавками за работы, услуги, особые условия.

Городские и региональные автотранспортные предприятия обычно предлагают схемы почасовой оплаты из-за затрудненного движения, заторов, вынужденных частых остановок при работе на маршрутах и т. д. Именно поэтому такие тарифы не всегда корректно позволяют установить зависимость расходов эксплуатации ТС от параметров и условий перевозки, так как расходы зависят от характеристик дорожного движения.

В связи с вышесказанным величина C_a для формулы (3) может быть найдена в соответствии с подходом, изложенным в [5], и поэтому в данной статье он рассматривается в обобщенном виде.

В качестве типового грузового автомобиля, используемого для доставки грузов в городах, грузоподъемностью до 10 т, рассмотрены единицы ТС марки MAN (11,5 т и 50 м³). Выбор такого ТС обоснован наибольшей популярностью, распространенностью по данным наблюдений. Перечень исходных данных с пояснениями к подходу [5] приведен в табл. 1. Величина общих расходов C_a включает в себя сумму следующих видов затрат из табл. 1.

Таблица 1

Обобщенный вид расчета общих расходов перевозки грузов автотранспортом [5]

Затраты, руб.	Показатель	Обозначение показателя [5]	Значение	Примечание
Топливо	T_3	нормативный расход топлива на эксплуатацию автомобиля, л;	расчетное	$T_3 = (H_{100\text{км}} \cdot 0,01L + 0,01H_p \cdot P) \cdot (1 + 0,01D)$
	T_2	надбавка к расходу топлива на работу в зимнее время, л;	расчетное	$T_2 = T_3 \cdot 0,01H_m \cdot M_2 \cdot 12^{-1}$
	T_r	надбавка к расходу топлива на внутригаражные и технические нужды, л;	расчетное	$T_r = 0,01 \cdot (T_3 + T_2)$
	$H_{100\text{км}}$	базовая норма расхода топлива на 100 км пробега автомобиля, л;	22,0	в соответствии с [6]
	L	пробег автомобилей при выполнении перевозки, км;	расчетное	переменная величина – см. рис. 1
	H_p	дополнительная линейная норма на работу, л/100 т·км;	0	не учитывалась для легковых грузов
	P	объем выполненной транспортной работы, т·км;	расчетное	переменная величина – см. рис. 1
	D	суммарная надбавка к линейной норме расхода топлива, %	15	город с населением 250 тыс. – 1 млн чел.
Материалы	H_2	процент дополнительного расхода топлива зимой, %;	12	для г. Новосибирска
	M_2	количество зимних месяцев в году, мес.	5,5	для г. Новосибирска
	C_t	цена топлива, руб./л	64,0	для г. Новосибирска
	$H_{СМi}$	норма эксплуатационного i -го вида материала, л/100 л или кг/100 л [6];	3,2; 0,4; 0,1; 0,01	для моторных, трансмиссионных, специальных масел и смазок
$C_{СМi}$	цена эксплуатационного i -го вида материала, руб./л или руб./кг;	700; 500; 150; 300; 50		
Ремонт	$C_{кр}$	стоимость затрат на капитальный ремонт, руб.;	расчетное	$C_{кр} = C_{кр}^a \cdot (N_{кр})^{-1} \cdot L$
	$C_{ч}$	стоимость затрат на запасные части, руб.;	расчетное	$C_{ч} = L \cdot 0,001H_{ч} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$
	C_m	стоимость затрат на материалы (ремонтные), руб.;	расчетное	$C_m = L \cdot 0,001H_m$
	$H_{ч}$	норма затрат на запасные части на 1000 км пробега, руб./1000 км;	1500	в соответствии с открытыми данными
	k_1, k_2, k_3	коэффициенты изменения затрат от условий эксплуатации, модификации автомобилей и природно-климатических условий работы соответственно	1,4; 1,15; 1,1 и 0,7; 0,97; 0,9	для $C_{ч}$ и $C_{кр}$ соответственно
	H_m	норма затрат на материалы на 1000 км пробега, руб./1000 км.	500	в соответствии с открытыми данными
	$C_{кр}^a$	стоимость капитального ремонта одного автомобиля, млн руб.;	1,5	в соответствии с открытыми данными
Восстановление шин	$N_{кр}$	нормативный межремонтный пробег автомобиля, млн км.	0,5	в соответствии с открытыми данными
	$S_{ш}$	оптовая цена одного комплекта шин, тыс. руб.;	22	в соответствии с открытыми данными
	$K_{ш}$	количество комплектов шин на автомобиле, шт.;	6	без учета запасной шины
Оплата труда	$H_{ш}$	норма отчислений на восстановление и ремонт одного комплекта шин на 1000 км пробега в процентах от стоимости, %;	1,1	в соответствии с открытыми данными
	C_v	тарифная ставка оплаты труда водителя, руб./км;	10,2	в соответствии со среднемесячной зарплатой водителя
	k_p, k_d, k_c	районный и коэффициенты дополнительных, страховых взносов соответственно	1,200; 1,102; 1,302	для г. Новосибирска
Амортизация	$C_{авт}$	цена ПС, млн руб.;	4,5	в соответствии с открытыми данными
	$H_{вос}$	норма амортизационных отчислений на восстановление автомобилей в процентах на 1000 км пробега от цены автомобиля на 1000 км пробега, %;	0,17	
Прочие		накладные расходы, прочие отчисления и платежи, тыс. руб.	33,3	ОСАГО, транспортный налог и т. д.

Расходы на топливо (бензин, дизельное топливо):

$$C_T = C_T (T_3 + T_2 + T_r). \quad (4)$$

Расход смазочных эксплуатационных материалов i -го вида:

$$C_{\text{СМ}i} = C_{\text{СМ}i} (0,01H_{\text{СМ}i} \cdot (T_3 + T_3 + T_r)) \quad (5)$$

Расходы в ремонтный фонд по всем видам ремонта:

$$C_{\text{рем}} = C_{\text{кр}} + C_{\text{зч}} + C_{\text{м}} \quad (6)$$

Расходы на автомобильные шины:

$$C_{\text{ш}} = S_{\text{ш}} \cdot K_{\text{ш}} \cdot L \cdot 10^{-5} \cdot H_{\text{ш}} \quad (7)$$

Расходы на оплату труда работников-водителей:

$$C_3 = C_{\text{в}} \cdot k_{\text{р}} \cdot k_{\text{д}} \cdot k_{\text{с}} \quad (8)$$

Амортизационные отчисления на восстановление транспорта:

$$A_{\text{вос}} = C_{\text{авт}} \cdot 10^{-5} \cdot H_{\text{вос}} \cdot L \quad (9)$$

Железнодорожный транспорт (методика)

Базовые правила применения железнодорожного транспорта в перевозках грузов на коротких расстояниях в городах определены рядом нормативных документов [7–9]. Среди них Правила исчисления сроков доставки грузов железнодорожным транспортом [7], Методические рекомендации по определению договорных тарифов на работы и услуги, выполняемые железными дорогами по просьбам грузоотправителей, грузополучателей, цены на которые не указаны в тарифном руководстве [8] и Правила применения сборов за дополнительные операции, связанные с перевозкой грузов на федеральном железнодорожном транспорте [9].

Общие расходы по выполнению городской грузовой перевозки железной дорогой предложено определять из расходов, связанных с продвижением (перевозкой) и маневровой работой:

$$C_r = \sum_{j=1}^J (C_{r,j}^{\text{пу}} + C_{r,j}^{\text{с}}) + C_r^{\text{д}} \quad (10)$$

где J – количество ГРЦ (станций), ед.;

$C_{r,j}^{\text{пу}}$ – расходы на продвижение грузопотоков по ПНОП j -го ГРЦ (станции), руб.;

$C_{r,j}^{\text{с}}$ – расходы на маневровую работу на j -й станции, руб.;

$C_r^{\text{д}}$ – расходы на продвижение грузопотоков по перегонам между J станциями.

1 Величина расходов на продвижение грузопотоков по путям необщего пользования обуславливается принятым порядком взаимодействия станции и ПНОП. Если такие пути, не принадлежащие ОАО «РЖД», обслуживает локомотив перевозчика, тогда соответствующие расходы могут быть найдены пропорционально времени занятости этого локомотива:

$$C_{r,j}^{\text{пу}} = e_{\text{м}} \cdot t_{\text{м},j}^{\text{пу}} \quad (11)$$

где $e_{\text{м}}$ – укрупненная расходная ставка за маневровый локомотиво-час, руб., 2 512,75 руб./лок.-ч;

$t_{\text{м},j}^{\text{пу}}$ – время маневровой работы локомотива j -й станции по обслуживанию ПНОП, ч.

Величина времени работы локомотива будет зависеть от установленного варианта маневрового обслуживания ГРЦ, например, от количества используемых вагонов, числа их подач на грузовой фронт, длины соединительного пути и т. д. [9]. Она определяется в соответствии с технологическими картами на подачу-уборку вагонов.

2 Величина расходов на маневровую станционную работу зависит от времени занятости локомотива выполнением операций на станциях примыкания ГРЦ:

$$C_r^c = e_m \cdot \sum_{j=1}^J t_{m,j}^c, \quad (12)$$

где $t_{m,j}^c$ – время занятости локомотива(-ов) на j -й станции, ч:

$$t_{m,j}^c = t_j^o + t_j^{\text{доп}}, \quad (13)$$

t_j^o – время на выполнение операций с вагонами, ч;

$t_j^{\text{доп}}$ – дополнительное время (перестановки с пути на путь, заезды под вагоны, возвращение в маневровый район и т. д.).

Стоит отметить, что под «станционной маневровой работой» подразумевается совокупность операции по обмену вагонов [10]. Величина t_j^o определяется по методике Норм времени на маневровые работы, выполняемые на станциях ОАО «РЖД» [11] в зависимости от количества вагонов, подлежащих отцепке, прицепке или перецепке. Величина $t_j^{\text{доп}}$ – в соответствии с типовыми технологическими процессами работы станций.

3 Величина расходов на продвижение грузопотоков по перегонам C_r^A была определена методом расходных ставок. Суть метода состоит в том, что рассчитываются зависящие от размеров движения расходы, а условно-постоянные расходы составляют долю от них (формируются установленным процентом, принятым равным 60 %). Переменные расходы являются суммой произведений расходных ставок (в статье использованы данные 2023 года) на соответствующие калькуляционные измерители. Важно отметить, что для расчета C_r^A затраты калькуляционных измерителей были определены по формулам (14)–(26), уточненным в рамках новой услуги.

В частности, для затрат и расходов, связанных с общими вагоно-километрами nS , использовались формулы:

$$R_{nS} = e_{nS} \cdot nS, \quad (14)$$

$$nS = nS_{\text{гр}}(1 + \alpha_{\text{пор}}^{\text{гр}}) = nS_{\text{гр}} + nS_{\text{пор}}, \quad (15)$$

где e_{nS} – расходная ставка, руб./ваг-км, 0,023 руб./ваг-км;

$nS_{\text{гр}}$ – вагоно-км груженого пробега;

$\alpha_{\text{пор}}^{\text{гр}}$ – отношение порожнего пробега вагонов к груженому, принято равным 0,6 в соответствии с рис. 2;

$nS_{\text{пор}}$ – вагоно-км порожнего пробега.

Затраты и расходы, связанные с тонно-километрами брутто вагонов и локомотивов $Pl_{\text{бр}}$, определялись по формулам:

$$R_{PL} = e_{PL} \cdot Pl_{\text{бр}}, \quad (16)$$

$$Pl_{\text{бр}} = Pl_{\text{бр}_в} + Pl_{\text{бр}_л}, \quad (17)$$

где e_{PL} – расходная ставка, руб./т-км, 0,021 руб./т-км;

$Pl_{\text{бр}_в}$ – тонно-километры брутто вагонов;

$Pl_{\text{бр}_л}$ – тонно-километры брутто локомотивов.

$$Pl_{\text{бр}_в} = nS \cdot \bar{p}_в = nS_{\text{гр}} \cdot p_{\text{гр}} + nS_{\text{пор}} \cdot p_{\text{пор}}, \quad (18)$$

$\bar{p}_в$ – среднее значение массы грузового вагона с учетом груженого и порожнего пробега, тонн брутто:

$$\bar{p}_в = p_{\text{пор}} \cdot \alpha_{\text{пор}}^{\text{ГР}} + p_{\text{ГР}} \cdot (1 - \alpha_{\text{пор}}^{\text{ГР}}), \quad (19)$$

где $p_{\text{пор}}$ – средняя масса порожнего вагона, т, принята равной 22 т для крутого вагона;

$p_{\text{ГР}}$ – средняя масса груженого вагона, т.

$$Pl_{\text{бп.л}} = \left(\sum_{j=1}^{J-1} l_j + l_x \right) Q_{\text{л}}, \quad (20)$$

где $Q_{\text{л}}$ – вес локомотива, т, принят равным 123 т по массе маневрового тепловоза;

l_x – вспомогательный пробег локомотива при его затребовании с другой станции, км;

l_j – пробег локомотива по j -му перегону, км.

Затраты и расходы, связанные с локомотиво-часами и бригадо-часами, определялись с учетом графика движения по формулам:

$$R_{Mt} = e_{Mt} \cdot Mt, \quad (21)$$

$$R_{Mt\text{бп}} = e_{Mt\text{бп}} \cdot Mt, \quad (22)$$

$$Mt = \sum_{j=1}^{J-1} t_{x,j} + t_x + \sum_{j=1}^J t_{п,j}, \quad (23)$$

где e_{Mt} – расходная ставка за локомотиво-часы, руб./лок.-ч, 660,81 руб./лок.-ч;

$e_{Mt\text{бп}}$ – расходная ставка за работу локомотивных бригад, руб./бриг.-ч, 1826,69 руб./бриг.-ч;

Mt – время работы, ч;

$t_{x,j}$ – норма времени хода по j -му перегону, ч;

t_x – вспомогательное время хода при затребовании локомотива с другой станции, ч;

$t_{п,j}$ – время нахождения локомотива на j -й станции (обработка состава по прибытию, отправлению, отцепка, прицепка, перецепка вагонов и т. д.), ч.

Важно отметить, что время хода – величины $t_{x,j}$ и t_x формулы (23) – зависит также от времени на разгон и замедление, от технической скорости ($v_{\text{тех}} = 52$ км/ч). Величина определялась по графику исполненного движения поездов [11].

Технологическое время обработки состава по прибытию и отправлению формирует величину $t_{п,j}$. Технология обработки состава включает в себя затраты времени на закрепление, технический и коммерческий осмотр, отцепку и прицепку локомотива, зарядку тормозной магистрали, опробование тормозов, уборку тормозных башмаков и т. д.

Расходы на топливо в рамках перевозки (продвижения грузопотоков) по перегонам путей общего пользования (для маневрового локомотива) вычислялись с учетом величины его пробега по формулам (24) и (25):

$$R_{\text{Э}} = c_{\text{дт}} \cdot \text{Э}_{\text{т}}, \quad (24)$$

где $c_{\text{дт}}$ – стоимость топлива, руб./кг;

$\text{Э}_{\text{т}}$ – расход топлива, кг:

$$\text{Э}_{\text{т}} = \left(\sum_{j=1}^{J-1} l + l_x \right) H_{\text{э}}, \quad (25)$$

где $H_{\text{э}}$ – средняя норма расхода дизельного топлива на тягу поездов, кг/100 км, принята равной 86,1 кг/100 км.

Расчет затрат и расходов, приходящихся на отправленные вагоны, выполнен по формуле:

$$R_{\text{в}} = e_{\text{в}} \cdot n_{\text{о}}, \quad (26)$$

где $e_{\text{в}}$ – расходная ставка на один отправленный вагон, руб./ваг., принята равной 333,18 руб./ваг;
 $n_{\text{о}}$ – количество отправленных вагонов, ваг.

$$C_r^{\text{д}} = R_{\text{нс}} + R_{\text{пл}} + R_{\text{мт}} + R_{\text{мт6п}} + R_{\text{з}} + R_{\text{в}}. \quad (27)$$

Результаты

В статье экономическое обоснование рациональных вариантов организации перевозок выполнено графическим способом. На рис. 3 приведены примеры расчетов для разного числа перевозимых грузовых мест (например, транспортных пакетов генеральных грузов).

Приняты значения вместимости условного вагона – 40 грузовых мест, а автомобиля – 20 мест, на основе этого с учетом времени оборота определен необходимый парк вагонов и автомобилей, а также вагонная составляющая тарифа (расходы на аренду).

Рациональное расстояние перевозки железнодорожным транспортом между ГРЦ, полученное на рис. 3, с учетом равенства расходов формулы (1), составило свыше 70 км (рис. 3, а) и 75 км (рис. 3, б) соответственно для перевозимых партий 600 и 400 грузовых мест соответственно. На рис. 3 – это точки пересечения графиков расходов.

С помощью неравенства (3) для расстояний, полученных на рис. 3, рассчитаны диапазоны изменения доходной ставки и уровня рентабельности услуги r_r (табл. 2).

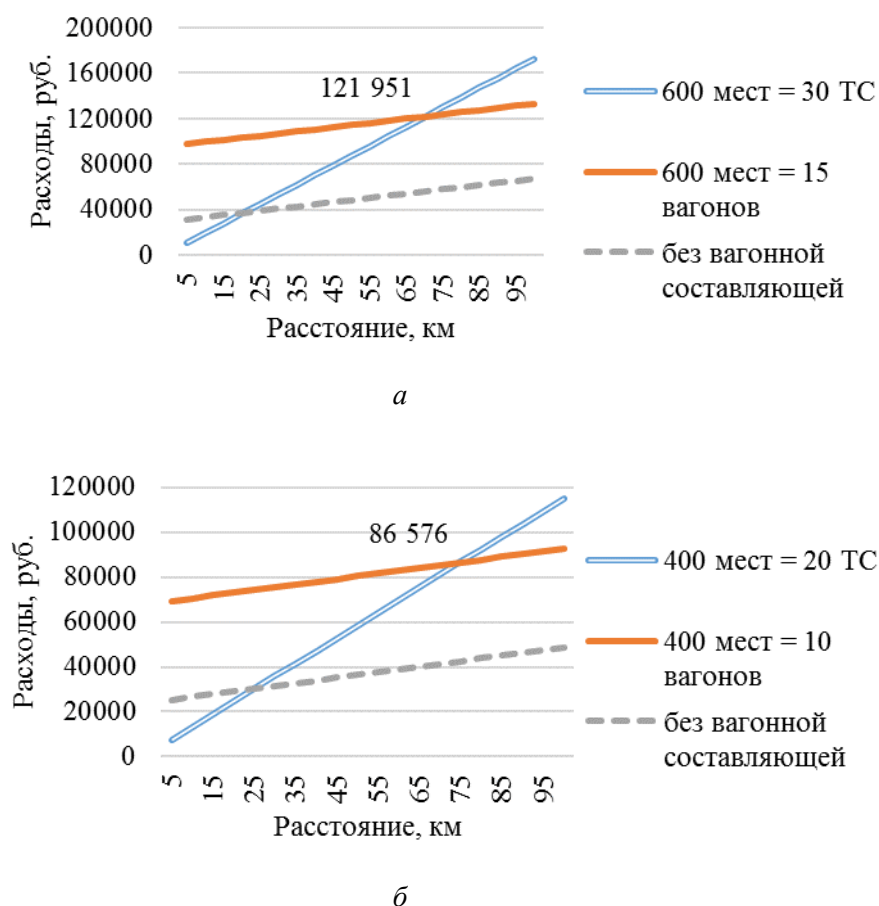


Рис. 3. Сопоставление расходов на перевозку:
 а – 600 грузовых мест; б – 400 грузовых мест

Таблица 2

Условия рационального использования железнодорожного транспорта

Число мест, ед.	Рациональное расстояние, км	Диапазон доходной ставки, руб./т	Диапазон уровня рентабельности, %
600	70–100	186–356	0–59
400	75–100	214–356	0–46

Обсуждение результатов

Приведенные результаты являются иллюстративным примером использования методики расчета и определения рациональных условий применения железнодорожного транспорта в грузовых перевозках с ГРЦ (см. рис. 3). С помощью формул (1)–(27) можно учитывать абсолютно разные исходные данные и получать результаты для отличающихся условий реализации перевозок, причем с использованием стандартных программ работы с таблицами (например, MS Excel). Поставленная задача может быть решена графически или аналитически. Предложенная методика отличается простой, поэтому может быть применена на практике.

При выполнении последующих расчетов были сделаны следующие выводы.

1 Доля вагонной составляющей $C_{гс}$ в железнодорожном тарифе меняется обратно пропорционально расстоянию перевозок и прямо пропорционально количеству перевозимых грузовых мест.

Кроме того, величина $C_{гс}$ существенно влияет на рациональное расстояние перевозок новым способом. Так, в рассматриваемом примере (см. рис. 3) арендная ставка принята равной 2200 руб./сут., а оборот вагонов – 2 сут. При уменьшении размера расходов на аренду подвижного состава, например, в два раза для 600 грузовых мест минимальное рациональное расстояние перевозки сократится с 70 до 45 км; доля вагонной составляющей тарифа снизится с 52 до 35 %. Такое возможно при уменьшении арендной ставки или оборота вагонов и, соответственно, их потребного парка.

2 Рекомендуемая доходная ставка и уровень рентабельности железнодорожных перевозок в рамках новой услуги растут с увеличением расстояния и количества перевозимых мест. С ростом объема грузов точка пересечения графиков смещается в сторону уменьшения расстояния – в начало осей координат. Это говорит о возможности задействования железнодорожного транспорта для развоза грузов на относительно коротких расстояниях между объектами, генерирующими грузопоток, достаточной мощности, например между ГРЦ в крупных городах и агломерациях.

В заключение отметим, что полученные результаты свидетельствуют о перспективности новых идей по совершенствованию технологии организации грузовых перевозок в крупных городах за ГРЦ в условиях взаимодействия автомобильного и железнодорожного видов транспорта. В статье были определены условия практического использования такого нетрадиционного подхода.

Список литературы

- 1 Псеровская, Е. Д. Формализация подхода к оценке целесообразности организации городских распределительных центров / Е. Д. Псеровская, А. П. Грешенштейн // Недропользование и транспортные системы. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 4–11. – ISSN 2949-0952.
- 2 Псеровская, Е. Д. Городская логистика в условиях взаимодействия видов транспорта / Е. Д. Псеровская, А. П. Грешенштейн // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. – 2023. – № 2 (9). – С. 49–54. – ISSN 2712-9195.
- 3 Теоретические аспекты организации перевозок с использованием железнодорожного транспорта на примере Новосибирска / А. П. Грешенштейн, Е. В. Грешенштейн, К. В. Желдак, С. Н. Павлов // Вестник Ростовского государственного университета путей со-

References

- 1 Pserovskaya, E. D. An algorithmic approach to assessing the feasibility of the urban consolidation centers development / E. D. Pserovskaya, A. P. Grefenshteyn // Subsurface Management and Transportation Systems. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 4–11. – ISSN 2949-0952.
- 2 Pserovskaya, E. D. Urban logistics in terms of interaction of modes of transport / E. D. Pserovskaya, A. P. Grefenshteyn // Fundamental and Applied Transport Issues. – 2023. – No. 2 (9). – P. 49–54. – ISSN 2712-9195.
- 3 Theoretical aspects of organizing railway transportation: a case study of Novosibirsk / A. P. Grefenshteyn, E. V. Grefenshteyn, K. V. Zheldak, S. N. Pavlov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1 (85). – P. 54–63. –

общения. – 2022. – № 1 (85). – С. 54–63. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_54.

4 **Грефенштейн, А. П.** Обоснование целесообразности создания распределительного центра в условиях взаимодействия разных видов транспорта / А. П. Грефенштейн // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (60). – С. 68–75. – ISSN 1815-9265.

5 **Грефенштейн, А. П.** Рациональные варианты организации курьерской доставки грузовых отправок / А. П. Грефенштейн, И. Н. Кагадий // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 6 (102). – С. 46–54. – ISSN 1997-0722.

6 Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте : издание официальное : утверждено Распоряжением Минтранса России от 14.03.2008 N AM-23-р (ред. от 20.09.2018) «О введении в действие методических рекомендаций».

7 Правила исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом : издание официальное : утверждено Приказом Министерства Транспорта Российской Федерации от 07.08.2015 № 245.

8 Об утверждении методических рекомендаций по определению договорных тарифов на работы и услуги, выполняемые железными дорогами по просьбам грузоотправителей, грузополучателей, цены на которые не указаны в тарифном руководстве : издание официальное : утверждено Указанием Министерства Путей сообщения Российской Федерации от 21.12.2001 № И-1947у.

9 Тарифное руководство № 3. Правила применения сборов за дополнительные операции, связанные с перевозкой грузов на федеральном железнодорожном транспорте : издание официальное : утверждено Постановлением Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации от 19.06.2002 № 35/15.

10 **Ким, А. С.** Пути совершенствования услуги по ускорению доставки грузов железнодорожным транспортом / А. С. Ким // Молодежная наука : Труды XXIV Всероссийской студенческой научно-практической конференции. В 4 т. / Редколлегия : В. С. Ратушняк (отв. ред.) [и др.]. – Т. 2. – Красноярск : Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», 2020. – С. 79–83. – ISBN 978-5-903293-60-5.

11 Нормы времени на маневровые работы, выполняемые на станциях ОАО «РЖД». – Москва : Техинформ, 2007. – 98 с.

DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_54.

4 **Grefenshteyn, A. P.** Justification of urban consolidation centre expediency with interaction transport modes / A. P. Grefenshteyn // The Siberian State Transport University Bulletin. – 2022. – No. 1 (60). – P. 68–75. – ISSN 1815-9265.

5 **Grefenshteyn, A. P.** Rational options for organizing courier delivery of cargo / A. P. Grefenshteyn, I. N. Kagadiy // Vestnik transporta Povolzhya. – 2023. – No. 6 (102). – P. 46–54. – ISSN 1997-0722.

6 Consumption standards for fuels and lubricants in road transport: official publication: approved by Order of the Ministry of Transport of Russia dated 14.03.2008 N AM-23-r (as amended on 20.09.2018) «On the implementation of methodological recommendations».

7 Rules for calculating delivery times for goods and empty freight cars by rail: official publication: approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 07.08.2015 No. 245.

8 On approval of methodological recommendations for determining contractual tariffs for work and services performed by railways at the request of shippers, consignees, prices for which are not indicated in the tariff manual : official publication : approved by Instruction of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated 21.12.2001 No. I-1947u.

9 Tariff Guide No. 3. Rules for the application of fees for additional operations related to the transportation of goods on federal railway transport: official publication: approved by Resolution of the FEC of the Russian Federation of 19.06.2002 No. 35/15.

10 **Kim, A. S.** Ways to improve services for accelerating the delivery of goods by rail / A. S. Kim // Youth Science : Proceedings of the XXIV All-Russian Student Scientific and Practical Conference. In 4 Vol. / Editorial Board : V. S. Ratushnyak (responsible editor) [at al.]. – Vol. 2. – Krasnoyarsk : Krasnoyarsk Rail Transport Institute – branch of the federal state budgetary educational institution of higher education «Irkutsk State Transport University», 2020. – P. 79–83. – ISBN 978-5-903293-60-5.

11 Time standards for shunting work performed at stations of JSC Russian Railways. – Moscow : Tekhinform, 2007. – 98 p.

12 Формирование узловых мультимодальных транспортно-логистических центров / С. Э. Ольховиков, Е. А. Петренева, И. Н. Кагадий, О. Б. Шерстобитова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 106–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_106.

12 Formation of junction multimodal transport and logistics centers / S. E. Olkhovikov, E. A. Petreneva, I. N. Kagadiy, O. B. Sherstobitova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 106–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_106.

A. P. Grefenshteyn

CONDITIONS FOR THE USE OF RAILWAY TRANSPORT IN URBAN FREIGHT TRANSPORTATION

Abstract. The paper describes the transport and economic content of the approach to the formation of a negotiated tariff for urban rail freight transportation within the framework of the concept of consolidation centers. It is proposed to determine the tariff for the new service taking into account the prices of competing motor transport enterprises for various volumes of cargo required for transportation over distances within the agglomeration of a large city.

Using the proposed approach, the costs of transporting goods in cars and wagons were calculated and compared, and examples of rational options for implementing transportation with urban consolidation centers were given. The results allowed us to conclude that it is possible to provide a new railway service for transportation over short distances with minimally sufficient freight traffic.

Keywords: urban consolidation center, urban transportation, motor transport, railway transport, large city, agglomeration.

For citation: Grefenshteyn, A. P. Conditions for the use of railway transport in urban freight transportation / A. P. Grefenshteyn // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 132–142. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_132.

Сведения об авторах

Грефенштейн Анна Павловна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: anna020295@mail.ru

Information about the authors

Grefenshteyn Anna Pavlovna

Siberian State Transport University (STU),
Chair «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: anna020295@mail.ru

А. В. Мартыненко, К. К. Ваколюк

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЩЕПЛЕНИЯ МЕЖДУГОРОДНИХ ПАССАЖИРОПОТОКОВ С УЧЕТОМ РАСПИСАНИЯ И ЗАТРАТ НА ВНУТРИГОРОДСКИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Аннотация. Предложена модель для оценки обобщенной стоимости индивидуальных межмуниципальных поездок. Данная модель интегрирует различные аспекты, включая затраты на внутригородское перемещение и предпочтения пассажиров относительно времени отправления и прибытия. Такой подход позволяет точнее определить выбор пассажирами вида транспорта, маршрута и конкретного рейса. Модель обладает гибкостью, возможностью модификации и использования в рамках традиционной четырехшаговой модели прогнозирования транспортного спроса. Рассмотрены методы определения калибровочных параметров, включая анализ входных данных, полученных из социологических опросов и открытых источников, что позволяет детально рассчитать параметры, связанные с внутригородскими перемещениями.

Ключевые слова: модель расщепления пассажиропотоков, предпочтительное время отправления и прибытия, транспортный спрос, межмуниципальные пассажиропотоки.

Для цитирования: Мартыненко, А. В. Моделирование расщепления междугородных пассажиропотоков с учетом расписания и затрат на внутригородские перемещения / А. В. Мартыненко, К. К. Ваколюк // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 143–155. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_143.

Введение

Моделирование пассажиропотоков – важный элемент при планировании развития транспортной инфраструктуры в регионах. Традиционно для этих целей применяется четырехшаговая модель транспортного спроса, которая может совершенствоваться за счет применения различного математического аппарата. Вопрос формирования обобщенной стоимости передвижения пассажиров важен на многих из этапов моделирования, в том числе при распределении поездок по видам транспорта.

В обобщенную стоимость междугородных поездок принято включать затраты на межмуниципальную поездку на конкретном виде транспорта, время в пути и переменную, отвечающую за индивидуальное предпочтение того или иного вида транспорта. Но такой подход не в полной мере описывает поведение пассажиров. Так, время отправления и прибытия для многих пассажиров является одним из ключевых факторов при выборе вида транспорта [1].

Также на принятие решения влияют и затраты на внутригородское перемещение. Например, индивидуум может быть проще осуществить межмуниципальную поездку на более дорогостоящем виде транспорта, находящемся в шаговой доступности, чем добираться на городском общественном транспорте до более дешевого. Так, выбор вида междугородного транспорта зависит не только от его собственных качеств, но и от качеств внутригородских транспортных систем. Неверный выбор среди альтернатив может повлечь дополнительные финансовые и временные затраты [2, 3].

Под расщеплением пассажиропотоков подразумеваются задача расщепления корреспонденций по улично-дорожной сети [4–6], а также задача расщепления по видам транспорта и рейсам. Так как в настоящей статье рассматриваются межмуниципальные поездки на общественном транспорте, то далее пойдет речь только о второй задаче, которой посвящено большое количество работ. Так, в [7] рассматривается применение синтетической гравитационной модели с показательно-степенной функцией тяготения для расчета расщепления пассажиропотока по разным видам городского общественного транспорта. В [8] была предложена методика расчета расщепления, основанная на делении пассажиров на группы по уровню доходов и на вычислении значений обобщенного критерия для каждого вида транспорта. В работе [9] была предпринята попытка определить факторы, влияющие на выбор вида транспорта для 112 европейских городов.

Обзор литературы показывает, что, несмотря на обширные исследования обобщенной стоимости поездки и моделирования пассажиропотоков, лишь в ограниченном количестве работ учитывается влияние предпочтительного времени отправления и прибытия (обзор основных результатов ис-

\check{t}_k^m – все затраты времени на перемещение в городе прибытия (от места высадки из междугородного транспорта до конечного пункта поездки);

\hat{c}_k^m – все финансовые затраты на перемещение в городе отправления (от начального пункта поездки до места посадки в междугородный транспорт);

\check{c}^m – стоимость поездки в междугородном транспорте;

\check{c}_k^m – все финансовые затраты на перемещение в городе прибытия (от места высадки из междугородного транспорта до конечного пункта поездки);

\hat{T}^m – время отправления междугородного транспорта из города отправления (тогда $\hat{T}^m - \hat{t}_k^m$ представляет собой время отправления из начального пункта поездки);

\check{T}^m – время прибытия междугородного транспорта в город прибытия (тогда $\check{T}^m - \check{t}_k^m$ представляет собой время прибытия в конечный пункт поездки);

$\hat{S}_k(t)$ – затраты индивида, появляющиеся в результате того, что ему для совершения междугородней поездки необходимо отправиться из начального пункта в момент времени t ;

$\check{S}_k(t)$ – затраты индивида, появляющиеся в результате того, что междугородняя поездка обеспечивает прибытие в конечный пункт именно в момент времени t ;

δ_k – дамми-переменная, позволяющая включить в обобщенную стоимость влияние расписания и разбивающая множество индивидов на две категории в зависимости от того, что для них важно в расписании: время отправления или время прибытия:

$$\delta_k = \begin{cases} 1, & \text{если для индивида } k \text{ важно время отправления,} \\ 0, & \text{если для индивида } k \text{ важно время прибытия;} \end{cases}$$

ω_k^m – свободный член, репрезентирующий затраты индивида k , связанные с уровнем комфорта и безопасности транспорта m ;

$\alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \varphi_k, \mu_k, \eta_k$ – весовые коэффициенты, определяющие индивидуальную (субъективную) значимость соответствующих параметров поездки.

Финансовые и временные затраты на внутригородские перемещения в городах отправления и прибытия зависят от используемого междугородного транспорта, поскольку, например, железнодорожный вокзал и автовокзал могут находиться в разных местах, следовательно, при выборе автобуса или поезда для междугородней поездки затраты на внутригородские перемещения будут различаться.

Каждая из функций $\hat{S}_k(t)$ и $\check{S}_k(t)$ – «глубоко индивидуалистична». Удобство/неудобство расписания транспорта зависит от жизненного расписания индивида, поэтому, данные функции могут быть полимодальными. Например, если основная цель поездки в большой город – визит к врачу, назначенный на 11:00, то расписание междугородного транспорта, обеспечивающее прибытие в конечный пункт в 10:45, будет выгоднее расписания, обеспечивающего прибытие в 10:20. Однако при этом прибытие в 10:00 может оказаться более предпочтительным, чем в 10:20, поскольку в этом случае появляется достаточно времени чтобы, например, посетить какой-нибудь магазин или кафе перед визитом к врачу (рис. 2).

Однако для большинства поездок $\hat{S}_k(t)$ и $\check{S}_k(t)$ все-таки являются унимодальными. То есть существует момент времени, который наилучшим образом подходит индивиду для отправления (прибытия). Обозначим такой наиболее подходящий момент отправления как $\hat{\theta}^k$, а наиболее подходящий момент прибытия как $\check{\theta}^k$.

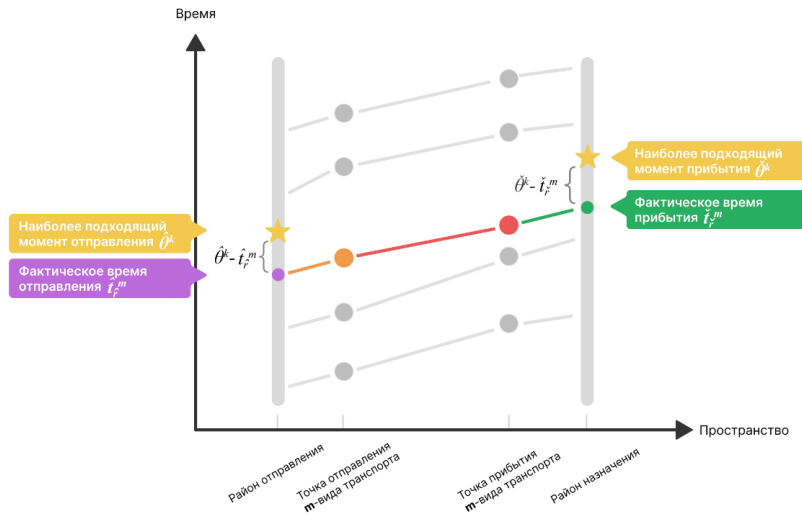


Рис. 2. Выбор альтернативы вида транспорта и рейса

Будем считать функции $\hat{S}_k(t)$ и $\check{S}_k(t)$ унимодальными и удовлетворяющими условиям:

$$\hat{S}_k(t) > 0 \text{ при } t \neq \hat{\theta}^k \text{ и } \hat{S}_k(\hat{\theta}^k) = 0;$$

$$\check{S}_k(t) > 0 \text{ при } t \neq \check{\theta}^k \text{ и } \check{S}_k(\check{\theta}^k) = 0.$$

Функции $\hat{S}_k(t)$ и $\check{S}_k(t)$ могут быть выбраны различными способами. Их конкретный (наиболее подходящий) вид может быть установлен только в результате калибровки модели на реальных данных. Сейчас лишь отметим, что наиболее простая спецификация этих функций имеет вид [15]

$$\hat{S}_k(t) = |t - \hat{\theta}^k|, \quad \check{S}_k(t) = |t - \check{\theta}^k|.$$

Этап II. Обобщенная стоимость для слоя спроса

Множество всех индивидов разбивается на подмножества – слои спроса. Разбиение производится с учетом цели поездки, а также половозрастной и социальной структуры пассажиров. Предполагаем, что для всех индивидов, входящих в слой спроса, весовые коэффициенты $\omega_k^m, \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \varphi_k, \mu_k, \eta_k$ являются одинаковыми.

Пусть P – множество всех пассажиров, совершающих поездку из $\hat{\Gamma}$ в $\check{\Gamma}$ и \mathcal{Q} – разбиение множества P на слои спроса (рис. 3), т.е.

$$P = \bigcup_{L \in \mathcal{Q}} L \text{ и } L_1 \cap L_2 = \emptyset \quad \forall L_1, L_2 \in \mathcal{Q}.$$

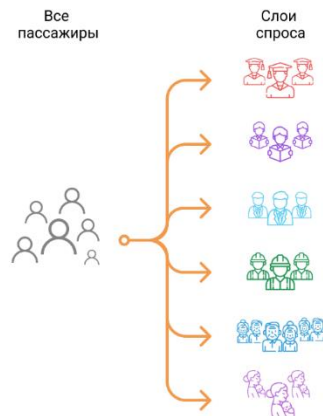


Рис. 3. Слои спроса

Чтобы учесть влияние расписания, каждый слой спроса разобьем еще на два непересекающихся подмножества: пассажиры, для которых важно время отправления, и пассажиры, для которых важно время прибытия. Эти множества будем называть полуслоями, т.е.

$$L = \hat{L} \cup \check{L} \quad \forall L \in \mathcal{L},$$

где

$$\hat{L} = \{k \in L | \delta_k = 1\}, \quad \check{L} = \{k \in L | \delta_k = 0\}.$$

Также предполагаем, что для всех индивидов из одного слоя L функции $\hat{S}_k(t)$ и $\check{S}_k(t)$ имеют одинаковый вид, а от k зависят только наиболее подходящие моменты отправления и прибытия $\hat{\theta}^k$ и $\check{\theta}^k$. Поэтому далее эти функции будем записывать в виде

$$\hat{S}_k(\hat{T}^m - \hat{t}_k^m) = \hat{S}_L(\hat{T}^m - \hat{t}_k^m - \hat{\theta}^k);$$

$$\check{S}_k(\check{T}^m + \check{t}_k^m) = \check{S}_L(\check{T}^m + \check{t}_k^m - \check{\theta}^k).$$

Таким образом, для каждого пассажира $k \in \hat{L}$

$$G_k^m = \omega_L^m + \alpha_L \cdot \hat{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_k^m + \gamma_L \cdot \check{t}_k^m + \varphi_L \cdot \hat{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_k^m + \eta_L \cdot \check{c}_k^m + \hat{S}_L(\hat{T}^m - \hat{t}_k^m - \hat{\theta}^k). \quad (2)$$

Аналогично для каждого пассажира $k \in \check{L}$

$$G_k^m = \omega_L^m + \alpha_L \cdot \check{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_k^m + \gamma_L \cdot \check{t}_k^m + \varphi_L \cdot \hat{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_k^m + \eta_L \cdot \check{c}_k^m + \check{S}_L(\check{T}^m + \check{t}_k^m - \check{\theta}^k). \quad (3)$$

Этап III. Обобщенная стоимость для слоя спроса с разбиением городов отправления и прибытия на районы

Город отправления и город прибытия разобьем на районы. Пусть \hat{R} – множество районов города отправления, а \check{R} – множество районов города прибытия. Будем предполагать, что для всех точек отправления и прибытия внутри одного района величины \hat{t}_k^m , \check{t}_k^m , \hat{c}_k^m , \check{c}_k^m являются постоянными, т.е. для каждого индивида k , отправляющегося из района $r \in \hat{R}$, будет

$$\hat{t}_k^m = \hat{t}_r^m \text{ и } \hat{c}_k^m = \hat{c}_r^m.$$

Аналогично для каждого индивида k , прибывающего в район $r \in \check{R}$, будет

$$\check{t}_k^m = \check{t}_r^m \text{ и } \check{c}_k^m = \check{c}_r^m.$$

Также будем предполагать, что все слои (и полуслои) одинаковым образом распределяются по районам города – пропорционально какой-то характеристике района, например, численности населения, количеству рабочих мест и т.п. Пусть для всех $r \in \hat{R}$ задана характеристика $\hat{\rho}(r)$, а для всех $r \in \check{R}$ пусть задана характеристика $\check{\rho}(r)$. Будем использовать следующие обозначения:

$\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}$ – множество пассажиров из полуслоя спроса \hat{L} , которые отправляются из района \hat{r} города отправления в район \check{r} города прибытия;

$\check{L}_{\hat{r}\check{r}}$ – множество пассажиров из полуслоя спроса \check{L} , которые отправляются из района \hat{r} города отправления в район \check{r} города прибытия.

Таким образом, для каждого пассажира $k \in \hat{L}_{\hat{r}\check{r}}$

$$G_k^m = \omega_L^m + \alpha_L \cdot \hat{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_{\hat{r}}^m + \gamma_L \cdot \check{t}_{\check{r}}^m + \varphi_L \cdot \hat{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_{\hat{r}}^m + \eta_L \cdot \check{c}_{\check{r}}^m + \hat{S}_L(\hat{T}^m - \hat{t}_{\hat{r}}^m - \hat{\theta}^k). \quad (4)$$

Аналогично для каждого пассажира $k \in \check{L}_{\hat{r}\check{r}}$

$$G_k^m = \omega_L^m + \alpha_L \cdot \tilde{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_{\hat{r}}^m + \gamma_L \cdot \check{t}_{\check{r}}^m + \varphi_L \cdot \tilde{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_{\hat{r}}^m + \eta_L \cdot \check{c}_{\check{r}}^m + \check{S}_L(\check{T}^m + \check{t}_{\check{r}}^m - \check{\theta}^k). \quad (5)$$

Этап IV. Обобщенная стоимость для слоя спроса с учетом внутригородских районов и распределения наилучшего времени отправления (прибытия)

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \tilde{L}(\theta) &= \{k \in \tilde{L} | \hat{\theta}^k = \theta\}; \\ \check{L}(\theta) &= \{k \in \check{L} | \check{\theta}^k = \theta\}; \\ \tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta) &= \{k \in \tilde{L}_{\hat{r}\check{r}} | \hat{\theta}^k = \theta\}; \\ \check{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta) &= \{k \in \check{L}_{\hat{r}\check{r}} | \check{\theta}^k = \theta\}. \end{aligned}$$

Очевидно, что в каждом из случаев $k \in \tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ и $k \in \check{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ обобщенная стоимость поездки G_k^m не зависит от k , но зависит от районов отправления и прибытия \hat{r} и \check{r} , а также от θ (и, естественно, от слоя L). Поэтому далее обобщенную стоимость поездки для пассажиров из $\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ будем обозначать как

$$\begin{aligned} \hat{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta) &= \omega_L^m + \alpha_L \cdot \tilde{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_{\hat{r}}^m + \gamma_L \cdot \check{t}_{\check{r}}^m + \\ &+ \varphi_L \cdot \tilde{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_{\hat{r}}^m + \eta_L \cdot \check{c}_{\check{r}}^m + \hat{S}_L(\hat{T}^m - \hat{t}_{\hat{r}}^m - \theta), \end{aligned} \quad (6)$$

а для пассажиров из $\check{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ как

$$\begin{aligned} \check{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta) &= \omega_L^m + \alpha_L \cdot \tilde{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_{\hat{r}}^m + \gamma_L \cdot \check{t}_{\check{r}}^m + \\ &+ \varphi_L \cdot \tilde{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_{\hat{r}}^m + \eta_L \cdot \check{c}_{\check{r}}^m + \check{S}_L(\check{T}^m + \check{t}_{\check{r}}^m - \theta). \end{aligned} \quad (7)$$

Расщепление пассажиропотока между двумя городами

Пусть M – множество всех рейсов всех видов транспорта общего пользования между городами $\hat{\Gamma}$ и $\check{\Gamma}$. Будем предполагать, что расщепление пассажиропотока по рейсам различных видов транспорта происходит согласно логистической регрессии. То есть вероятность того, что индивид k выберет рейс m , равна

$$Prob(m) = \frac{e^{-\lambda \cdot G_k^m}}{\sum_{j \in M} e^{-\lambda \cdot G_k^j}}.$$

Значит, вероятность того, что индивидуум $k \in \tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ выберет рейс m , равна

$$Prob(m) = \frac{e^{-\lambda \cdot \hat{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M} e^{-\lambda \cdot \hat{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}, \quad (8)$$

и аналогично вероятность того, что индивидуум $k \in \check{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ выберет рейс m , равна

$$Prob(m) = \frac{e^{-\lambda \cdot \check{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M} e^{-\lambda \cdot \check{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}. \quad (9)$$

С учетом сформулированного выше предположения количество пассажиров в $\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ равно

$$|\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)| = |\tilde{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{p}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{p}(r)} \cdot \frac{\check{p}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{p}(r)}. \quad (10)$$

Аналогично, количество пассажиров в $\check{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ равно

$$|\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)| = |\tilde{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{\rho}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{\rho}(r)} \cdot \frac{\check{\rho}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{\rho}(r)}. \quad (11)$$

Здесь и далее через $|X|$ обозначаем количество элементов множества X .

Из (8) – (11) следует, что количество пассажиров из $\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$, которые выбирают рейс m , равно

$$|\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)| = |\hat{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{\rho}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{\rho}(r)} \cdot \frac{\check{\rho}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{\rho}(r)} \cdot \frac{e^{-\lambda \cdot \tilde{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M} e^{-\lambda \cdot \tilde{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}, \quad (12)$$

а количество пассажиров из $\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$, которые выбирают рейс m , равно

$$|\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)| = |\tilde{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{\rho}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{\rho}(r)} \cdot \frac{\check{\rho}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{\rho}(r)} \cdot \frac{e^{-\lambda \cdot \tilde{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M} e^{-\lambda \cdot \tilde{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}. \quad (13)$$

Пусть P_m – множество пассажиров из $\hat{\Gamma}$ в $\check{\Gamma}$, которые выбрали рейс m , тогда

$$|P_m| = |P_m(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| = \sum_{L \in \Omega} \sum_{\hat{r} \in \hat{R}} \sum_{\check{r} \in \check{R}} \int_0^{24} (|\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)| + |\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)|) d\theta. \quad (14)$$

Формула (14) содержит интегрирование по параметру θ , поскольку с теоретической точки зрения наиболее подходящий момент прибытия (отправления) θ может быть любым. Однако при практической реализации предлагаемого подхода данные о значениях величин $\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)$ и $\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)$ для разных θ могут быть получены только лишь на основании опросов пассажиров. Например, может быть задан вопрос: «В какое время вам наиболее удобно отправляться/прибывать?». Как правило, никто не будет давать ответ на такой вопрос с точностью до секунд. Более того, обычно опрашиваемые отвечают на такой вопрос с точностью до 5, 10 или 30 мин. Поэтому будут являться конечными следующие множества:

$\hat{\Theta}$ – множество всех возможных значений наиболее подходящего момента отправления;

$\check{\Theta}$ – множество всех возможных значений наиболее подходящего момента прибытия.

Для удобства можем считать, что $\hat{\Theta} = \check{\Theta} = \Theta$ и это множество состоит из всех моментов времени от начала суток до конца с шагом 5 мин, а если какой-то из этих моментов не будет наиболее подходящим для отправления (прибытия) ни для одного пассажира, то это означает, что

$$\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta) = \emptyset \quad (\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta) = \emptyset).$$

Тогда формулу (14) можно переписать в дискретной форме:

$$|P_m(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| = \sum_{L \in \Omega} \sum_{\hat{r} \in \hat{R}} \sum_{\check{r} \in \check{R}} \left(\sum_{\theta \in \Theta} |\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)| + \sum_{\theta \in \Theta} |\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)| \right). \quad (15)$$

Обозначим через B_m максимальную вместимость пассажиров для рейса $m \in M$.

Может оказаться так, что

$$|P_m(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| > B_m. \quad (16)$$

Естественно, в этом случае на рейсе m отправится B_m пассажиров. А $(|P_m(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| - B_m)$ пассажиров нужно «распределить» по другим рейсам.

Итак, пусть после применения формулы (15) для некоторых рейсов оказалось выполненным условие (16). Обозначим множество всех таких рейсов через M_B . Количество пассажиров на этих рейсах будет

$$\sum_{m \in M_B} B_m. \quad (17)$$

Соответственно на остальных рейсах будет

$$|P| - \sum_{m \in M_B} B_m. \quad (18)$$

Этих пассажиров нужно снова «распределить» по рейсам на основе формул (12), (13), (15). Доля этих пассажиров равна

$$Z = \frac{|P| - \sum_{m \in M_B} B_m}{|P|}, \quad (19)$$

и, предполагая, что такие пассажиры пропорционально «рассредоточены» по слоям спроса, получаем для $m \in M/M_B$

$$|\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^{m,new}(\theta)| = Z \cdot |\hat{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{\rho}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{\rho}(r)} \cdot \frac{\check{\rho}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{\rho}(r)} \cdot \frac{e^{-\lambda \cdot \hat{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M/M_B} e^{-\lambda \cdot \check{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}, \quad (20)$$

$$|\check{L}_{\hat{r}\check{r}}^{m,new}(\theta)| = Z \cdot |\check{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{\rho}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{\rho}(r)} \cdot \frac{\check{\rho}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{\rho}(r)} \cdot \frac{e^{-\lambda \cdot \check{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M/M_B} e^{-\lambda \cdot \hat{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}. \quad (21)$$

Соответственно для $m \in M/M_B$

$$|P_m^{new}(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| = \sum_{L \in \Omega} \sum_{\hat{r} \in \hat{R}} \sum_{\check{r} \in \check{R}} \left(\sum_{\theta \in \Theta} |\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^{m,new}(\theta)| + \sum_{\theta \in \Theta} |\check{L}_{\hat{r}\check{r}}^{m,new}(\theta)| \right). \quad (22)$$

Таким образом, окончательно получаем

$$|P_m(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| = \begin{cases} B_m & \text{при } m \in M_B, \\ |P_m^{new}(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| & \text{при } M/M_B. \end{cases} \quad (23)$$

Возможные подходы к калибровке модели

Калибровка предложенной модели заключается в определении параметров

$$\lambda \omega_L^m, \lambda \alpha_L, \lambda \beta_L, \lambda \gamma_L, \lambda \varphi_L, \lambda \mu_L, \lambda \eta_L, \lambda \hat{S}_L(\cdot), \lambda \check{S}_L(\cdot) \quad (24)$$

по наблюдаемым входным данным (для каждого слоя спроса) и пассажиропотокам на разных рейсах всех видов транспорта общего пользования. Основная сложность здесь заключается в недоступности значительной части необходимых для этого данных. Например, недоступны для использования данные по объемам автобусных перевозок (такие данные есть только непосредственно у самих перевозчиков, а они, как правило, крайне неохотно дают к ним доступ). Кроме того, сами по себе такие данные малополезны для калибровки модели, поскольку они не содержат информацию о разбиении пассажиропотока на слои спроса.

Рассмотрим более подробно необходимые для калибровки данные и возможные источники их получения. Часть исходных данных определяется экспертным путем на основе доступной картографической информации и социально-экономической статистики. В частности, это касается разбиения на районы \hat{R} , \check{R} и определения их характеристик $\hat{\rho}(\cdot)$, $\check{\rho}(\cdot)$.

Рассматриваемые населенные пункты необходимо разбивать на транспортные районы \hat{R} , \check{R} , размер и количество которых зависят от размеров городов и численности населения. При задании границ рекомендуется следовать определенным принципам:

- использование линий естественных и искусственных преград (реки, линии железных дорог и т.д.);
- согласование с административным делением территории;
- учет функционального зонирования территории города;
- сохранение сложившихся кварталов застройки;
- недопущение районов вытянутой конфигурации [16];
- учет границ муниципальных районов, городских и сельских поселений [17].

В качестве исходных данных наиболее удобно использовать информацию, предоставляемую проектом OpenStreetMap, поскольку там помимо графа улично-дорожной сети можно получить детализиро-

ванное представление о расположении зданий с учетом типа землепользования, разделения на административные районы, а также определить точки интереса (вузы, торговые центры, медицинские учреждения и пр.). Это позволяет более точно определить значения характеристик $\hat{\rho}(\cdot)$, $\check{\rho}(\cdot)$ по районам [18].

Также в модели используются внешние параметры

$$\hat{T}^m, \hat{t}_r^m, \check{T}^m, \check{t}_r^m, \hat{c}_r^m, \check{c}_r^m, \hat{c}^m, \check{c}^m, B_m. \quad (25)$$

Значения параметров (25) можно получить из открытых источников. Но это является достаточно сложной задачей, так как необходимая информация разрознена и не структурирована. Параметры \hat{T}^m , \check{T}^m , \hat{t}_r^m , \check{t}_r^m , \hat{c}_r^m , \check{c}_r^m , \hat{c}^m , \check{c}^m , B_m можно определить в соответствии с расписанием каждого рейса каждого вида транспорта, но при создании транспортной модели региона вручную проделать такую работу в приемлемые сроки невозможно. Для этого необходимы разработка и программная реализация алгоритмов по сбору, очистке, объединению и агрегации данных.

Пассажирские железнодорожные перевозки в РФ осуществляют 24 пригородные пассажирские компании, представленные в 66 регионах страны. Актуальную информацию о расписании и стоимости перевозок можно узнать на их официальных сайтах (система автоматизации сбора таких данных разработана авторами [19]).

Параметры автобусного сообщения можно получить на официальных сайтах автовокзалов (хотя в сети, как правило, представлены автовокзалы только крупных населенных пунктов) или, что более предпочтительно, в сервисах по online-покупке билетов, таких как Tutu.ru. Для автоматизированного сбора подобной информации (нитки графика, стоимость, модель транспортного средства, вместимость транспортного средства и т.п.) авторами разработана система сбора данных [20].

Помимо традиционных видов транспорта популярность на рынке завоёвывают сервисы карпулинга, в частности BlaBlaCar. Естественно, это явление необходимо учитывать при разработке современных транспортных моделей [21, 22]. Так как бизнес-модель сервисов не предполагает жесткого расписания, а перевозчиками выступают владельцы личного автотранспорта, параметры \hat{T}^m , \check{T}^m , \hat{t}_r^m , \check{t}_r^m можно получить в усредненном виде, собирая данные о размещаемых на сервисах карпулинга объявлениях (соответствующая система разработана авторами в [23]). При этом параметр B_m определяется в соответствии с маркой автомобиля.

Говоря о параметрах внутригородского перемещения, рассчитать \hat{t}_r^m , \check{t}_r^m , \hat{c}_r^m , \check{c}_r^m наиболее предпочтительно при помощи программных алгоритмов и сервисов маршрутизации, так как для каждого района \hat{R} , \check{R} необходимо найти соответствующие значения до всех точек отправления и от всех точек прибытия межмуниципальных поездок. Что касается традиционных видов транспорта, количество расчетов в большей степени будет зависеть от количества районов, так как объектов инфраструктуры межмуниципального транспорта общего пользования не так много (автовокзалы и железнодорожные станции). При интеграции в транспортную модель карпулинговых поездок количество расчетов возрастает, вследствие того, что любая точка в пространстве может послужить точкой отправления/прибытия для таких поездок.

Наиболее труднодоступной является информация о полуслоях спроса $\hat{L}(\theta)$, $\check{L}(\theta)$ и их расщеплении по разным видам транспорта. Для ее получения может быть использован метод опроса, поскольку для калибровки модели расщепления нет необходимости иметь данные о величине пассажиропотоков, достаточно знать их доли в общем пассажиропотоке, которые можно определить на основании репрезентативной выборки. Для этого необходимо провести опрос на всей территории, для которой формируется транспортная модель. Соответственно необходима организация социологического исследования во множестве населенных пунктов. В настоящее время можно снизить издержки за счет размещения ссылок на онлайн-опросы в социальных сетях.

Основная информация, которую необходимо получить:

- пространственное распределение спроса;
- подвижность населения;
- предпочтительный вид транспорта;
- предпочтительное время отправления/прибытия.

Калибровку модели на основе описанных выше данных можно осуществить с помощью метода наименьших квадратов.

Выводы

Предложенная модель формирования обобщенной стоимости индивидуальной межмуниципальной поездки направлена на более точное моделирование поведения населения при выборе вида транспорта за счет учета затрат на внутригородское перемещение, а также предпочтительного времени отправления и прибытия. Модель является достаточно гибкой и допускает различные модификации. В частности, использование логистической регрессии для расщепления пассажиропотоков по видам транспорта не является принципиальным, ее можно заменить на любую другую модель дискретного выбора.

Моделирование влияния предпочтительного времени отправления и прибытия сводится к рассмотрению однопараметрического семейства унимодальных функций затрат с дискретным множеством значений параметра Θ .

Также важно отметить, что калибровка параметров модели является сложной задачей, требующей комплексного подхода. Необходима организация социологических опросов для определения транспортного поведения населения, разработка алгоритмов автоматизированного сбора данных о межмуниципальных поездках из открытых источников, а также программная реализация некоторых расчетов для определения параметров внутригородского перемещения.

В настоящее время авторами разработаны алгоритмы сбора информации о межмуниципальных поездках. Планируется организация социологических опросов в Свердловской области для определения калибровочных коэффициентов и формирования синтетической популяции на основе репрезентативной выборки. В дальнейшем будет произведена апробация предложенного подхода при создании транспортной модели для оптимизации расписания межмуниципального общественного транспорта.

Список литературы

1 **Ortuzar, J. D.** Modelling Transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen // Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 606 p. – ISBN 9780470760390.

2 **Reis, V.** Rail and multi-modal transport / V. Reis // Research in Transportation Economics. – 2013. – Vol. 41. – No. 1. – P. 17–30. – DOI 10.1016/j.retrec.2012.10.005.

3 **Barus, L. S.** Intercity mode choice modelling : considering the intracity transport systems with application to the Jakarta-Bandung corridor / L. S. Barus // International Journal of Technology. – 2016. – Vol. 7. – No. 4. – P. 581–591. – DOI 10.14716/ijtech.v7i4.2798.

4 Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учебное пособие / А. В. Гасников [и др.] ; под редакцией А. В. Гасникова. – Издание 2-е, испр. и доп. – Москва : МЦНМО, 2013 г. – ISBN 978-5-4439-0040-7.

5 **Швецов, В. И.** Математическое моделирование загрузки транспортных сетей / В. И. Швецов, А. С. Алиев. – Москва : URSS, 2003. – 64 с. – ISBN 5-354-00385-7.

6 **Abdulaal, M.** Methods for combining modal split and equilibrium assignment models / M. Abdulaal, L. J. LeBlanc // Transportation Science. – 1979. – Vol. 13. – No. 4. – P. 292–314. – DOI 10.1287/trsc.13.4.292.

7 **Тимофеева, Г. А.** Применение синтетической гравитационной модели с показательно-

References

1 **Ortuzar, J. D.** Modelling Transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen // Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 606 p. – ISBN 9780470760390.

2 **Reis, V.** Rail and multi-modal transport / V. Reis // Research in Transportation Economics. – 2013. – Vol. 41. – No. 1. – P. 17–30. – DOI 10.1016/j.retrec.2012.10.005.

3 **Barus, L. S.** Intercity mode choice modelling : considering the intracity transport systems with application to the Jakarta-Bandung corridor / L. S. barus // International Journal of Technology. – 2016. – Vol. 7. – No. 4. – P. 581–591. – DOI 10.14716/ijtech.v7i4.2798.

4 Introduction to Mathematical Modelling of Transport Flows : Textbook / A. V. Gasnikov [et al.] ; Edited by A. V. Gasnikov. – Edition 2nd revised and supplemented by. – Moscow : ICNMO, 2013. – ISBN 978-5-4439-0040-7.

5 **Shvetsov, V. I.** Mathematical modelling of loading of transport networks / V. I. Shvetsov, A. S. Aliev // Moscow : URSS, 2003. – 64 p. – ISBN 5-354-00385-7.

6 **Abdulaal, M.** Methods for combining modal split and equilibrium assignment models / M. Abdulaal, L. J. LeBlanc // Transportation Science. – 1979. – Vol. 13. – No. 4. – P. 292–314. – DOI 10.1287/trsc.13.4.292.

7 **Timofeeva, G. A.** Application of synthetic gravity model with indicative-degree gravity function

- степенной функцией тяготения для расчета расщепления пассажиропотока по разным видам общественного транспорта / Г. А. Тимофеева, О. Н. Ие // Транспорт Урала. – 2020. – № 4. – 67 с. – DOI 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9.
- 8 **Тимофеева, Г. А.** Моделирование расщепления пассажиропотока по видам транспорта методом взвешенных групповых оценок / Г. А. Тимофеева, А. Д. Хазимуллин // Транспорт Урала. – 2022. – № 2. – С. 3–8. – DOI 10.20291/1815-9400-2022-2-3-8.
- 9 **Santos, G.** Factors influencing modal split of commuting journeys in medium-size European cities / G. Santos // Journal of Transport Geography. – 2013. – Vol. 30. – P. 127–137. – DOI 10.1016/j.jtrangeo.2013.04.005.
- 10 **Thorhauge, M.** Departure time choice : Modelling individual preferences, intention and constraints / M. Thorhauge, J. Rich, E. Cherchi // Department of Transport. – 2015. – 147 p.
- 11 **Small, K. A.** The scheduling of consumer activities : work trips / K. A. Small // The American Economic Review. – 1982. – Vol. 72. – No. 3. – P. 467–479.
- 12 **Vickrey, W. S.** Congestion theory and transport investment / W. S. Vickrey // The American Economic Review. – 1969. – P. 251–260.
- 13 **Cosslett, S.** The trip timing decision for travel to work by automobile / S. Cosslett // Demand Model Estimation and Validation, The Urban Travel Demand Forecasting Project, McFadden, D. – 1977. – P. 201–221.
- 14 **Cascetta, E.** Assessment of schedule-based and frequency-based assignment models for strategic and operational planning of high-speed rail services / E. Cascetta, P. Coppola // Transportation Research Part A : Policy and Practice. – 2016. – Vol. 84. – P. 93–108. – DOI 10.1016/j.tra.2015.09.010.
- 15 **Cascetta, E.** Transportation systems analysis : models and applications / E. Cascetta // Springer Science & Business Media. – 2009. – Vol. 29. – ISSN 1931-6828.
- 16 Методические рекомендации по использованию программных продуктов математического моделирования транспортных потоков при оценке эффективности проектных решений в сфере организации дорожного движения. – Москва : Министерство транспорта Российской Федерации, 2017. – 72 с.
- 17 **Якимов, М. Р.** Транспортное планирование : практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в программном комплексе PTV Vision@ VISUM : монография. / М. Р. Якимов, Ю. А. Попов. – 2-е изд., перераб. и for calculation of passenger flow splitting by different types of public transport / G. A. Timofeeva, O. N. Ie // Transport of the Urals. – 2020. – No. 4. – P. 67. – DOI 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9.
- 8 **Timofeeva, G. A.** Modelling of passenger flow splitting by types of transport by the method of weighted group estimates / G. A. Timofeeva, A. D. Hazimullin // Transport of the Urals. – 2022. – No. 2. – P. 3–8. – DOI 10.20291/1815-9400-2022-2-3-8.
- 9 **Santos, G.** Factors influencing modal split of commuting journeys in medium-size European cities / G. Santos // Journal of Transport Geography. – 2013. – Vol. 30. – P. 127–137. – DOI 10.1016/j.jtrangeo.2013.04.005.
- 10 **Thorhauge, M.** Departure time choice : Modelling individual preferences, intention and constraints / M. Thorhauge, J. Rich, E. Cherchi // Department of Transport. – 2015. – 147 p.
- 11 **Small, K. A.** The scheduling of consumer activities : work trips / K. A. Small // The American Economic Review. – 1982. – Vol. 72. – No. 3. – P. 467–479.
- 12 **Vickrey, W. S.** Congestion theory and transport investment / W. S. Vicrey // The American Economic Review. – 1969. – P. 251–260.
- 13 **Cosslett, S.** The trip timing decision for travel to work by automobile / S. Cosslett // Demand Model Estimation and Validation, The Urban Travel Demand Forecasting Project, McFadden, D. – 1977. – P. 201–221.
- 14 **Cascetta, E.** Assessment of schedule-based and frequency-based assignment models for strategic and operational planning of high-speed rail services / E. Cascetta, P. Coppola // Transportation Research Part A : Policy and Practice. – 2016. – Vol. 84. – P. 93–108. – DOI 10.1016/j.tra.2015.09.010.
- 15 **Cascetta, E.** Transportation systems analysis : models and applications / E. Cascetta // Springer Science & Business Media. – 2009. – Vol. 29. – ISSN 1931-6828.
- 16 Methodical Recommendations on the Use of Software Products of Mathematical Modelling of Traffic Flows in the Evaluation of the Effectiveness of Design Solutions in the Sphere of Traffic Management. – Moscow : Ministry of Transport of the Russian Federation, 2017. – 72 p.
- 17 **Yakimov, M. R.** Transport planning : practical recommendations for the creation of urban transport models in the software package PTV Vision@ VISUM : monograph. / M. R. Yakimov, Yu. A. Popov. – 2nd ed., rev. and supplement. –

доп. – Москва : Проспект, 2022. – 176 с. – ISBN 978-5-392-35972-1.

18 **Якимов, М. Р.** Транспортное планирование : создание транспортных моделей городов : монография / М. Р. Якимов. – Москва : Логос, 2013. – 188 с. – ISBN 978-5-98704-729-3.

19 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619563 Российская Федерация. Автоматизированная система сбора и обработки информации о расписании пригородных электропоездов : № 2023618697 : заявл. 03.05.2023 : опубл. 12.05.2023 / К. К. Ваколюк, А. В. Мартыненко. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

20 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619562 Российская Федерация. Автоматизированная система сбора и обработки информации о межмуниципальном автобусном сообщении : № 2023618696 : заявл. 03.05.2023 : опубл. 12.05.2023 / К. К. Ваколюк, А. В. Мартыненко. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

21 **Мартыненко, А. В.** Влияние сервиса BlaBlaCar на междугородные пассажирские перевозки в Свердловской области / А. В. Мартыненко, К. К. Ваколюк // Железнодорожный транспорт и технологии. – 2023. – С. 224–226. – ISBN 978-5-94614-528-2.

22 **Martynenko, A.** Analysis of the Regional Carpooling Market (Case Study of the Sverdlovsk Region) / A. Martynenko, K. Vakolyuk // Transportation Research Procedia. – 2023. – Vol. 68. – P. 785–791. – DOI 10.1016/j.trpro.2023.02.109.

23 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20233619564 Российская Федерация. Автоматизированная система сбора и обработки информации о предложениях рынка карпулинга : № 2023618698 : заявл. 03.05.2023 : опубл. 12.05.2023 / К. К. Ваколюк, А. В. Мартыненко. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

Moscow : Prospect, 2022. – 176 с. – ISBN 978-5-392-35972-1.

18 **Yakimov, M. R.** Transport planning : creation of transport models of cities : monograph / M. R. Yakimov. – Moscow : Logos, 2013. – 188 p. – ISBN 978-5-98704-729-3.

19 Certificate of State Registration of Computer Programme No. 2023619563 Russian Federation. Automated system of collection and processing of information about the schedule of suburban electric trains / K. K. Vakolyuk, A. V. Martynenko. – No. 2023618697 ; filed. 03.04.2023, publ. 12.04.2023. – Registered in the Register of Computer Programs.

20 Certificate of state registration of computer programme No. 2023619562 Russian Federation. Automated system of collection and processing of information about intermunicipal bus service / K. K. Vakolyuk, A. V. Martynenko. – No. 2023618696 ; filed. 03.04.2023, publ. 12.04.2023. – Registered in the Register of Computer Programs.

21 **Martynenko, A. V.** Influence of BlaBlaCar service on intercity passenger transportations in the Sverdlovsk region / A. V. Martynenko, K. K. Vakolyuk // Railway Transport and Technology. – 2023. – P. 224–226. – ISBN 978-5-94614-528-2.

22 **Martynenko, A.** Analysis of the Regional Carpooling Market (Case Study of the Sverdlovsk Region) / A. Martynenko, K. Vakolyuk // Transportation Research Procedia. – 2023. – Vol. 68. – P. 785–791. – DOI 10.1016/j.trpro.2023.02.109.

23 Certificate of state registration of computer programme No. 20233619564 Russian Federation. Automated system of collection and processing of information about carpooling market offers / K. K. Vakolyuk, A. V. Martynenko. – No. 2023618698 ; avt. 03.04.2023, publ. 12.04.2023 – Registered in the Register of Computer Programs.

A. V. Martynenko, K. K. Vakolyuk

MODELLING OF THE INTERCITY PASSENGER TRAFFIC DIVISION WITH CONSIDERATION OF TIMETABLE AND COSTS FOR INTRACITY MOVEMENTS

Abstract. This paper proposes a model to estimate the generalised cost of individual inter-municipal trips. The model integrates various aspects, including intra-city travel costs and passengers' preferences for departure and arrival times. This approach allows for a more accurate determination of passengers' choice of transport mode, route and trip. The model is flexible and can be modified and used within a traditional four-step transport demand forecasting model. The paper also outlines methods for determining calibration parameters, including analysis of input data obtained from sociological surveys and open sources, which allows for detailed calculation of parameters related to intra-city movements.

Keywords: passenger flow splitting model, preferred time of departure and arrival, transport demand, inter-municipal passenger flows.

For citation: Martynenko, A. V. Modelling of the intercity passenger traffic division with consideration of timetable and costs for intracity movements / A. V. Martynenko, K. K. Vakolyuk // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 143–155. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_143.

Сведения об авторах

Мартыненко Александр Валериевич

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Естественнонаучные дисциплины»,
кандидат физико-математических наук,
доцент.

Институт экономики Уральского отделения
Российской академии наук (ИЭ УрО РАН),
Центр развития и размещения
производительных сил,
старший научный сотрудник,
e-mail: AMartynenko@usurt.ru

Ваколюк Кирилл Константинович

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Естественнонаучные дисциплины»,
аспирант,
e-mail: kirillvakolyuk@mail.ru

Information about the authors

Martynenko Alexander Valerievich

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair «Natural Science Disciplines»,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Associate Professor.

Institute of Economics of the Ural Branch of
the Russian Academy of Sciences,
Centre for Development and Location of
Productive Forces,
Senior Researcher,
e-mail: AMartynenko@usurt.ru

Vakolyuk Kirill Konstantinovich

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair «Natural Science Disciplines»,
Postgraduate Student,
e-mail: kirillvakolyuk@mail.ru

О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева, А. А. Хишова

ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАБОТЕ ГРУЗОВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

Аннотация. Рассмотрены основные тенденции и направления внедрения цифровых технологий на грузовых железнодорожных станциях, такие как цифровизация и автоматизация технологических процессов, цифровое взаимодействие с пользователями транспортных услуг, цифровизация рабочих мест, роботизация технологических операций на складах и грузовых фронтах мест общего пользования, а также создание цифровых двойников. Представлены технологические инновации, направленные на улучшение производственных процессов работы на грузовых железнодорожных станциях и повышение их эффективности. В ходе исследования был определен уровень цифровизации грузовых железнодорожных станций Куйбышевской железной дороги, а также представлен SWOT-анализ реализации цифровых технологий в работе грузовых железнодорожных станций.

Ключевые слова: грузовая железнодорожная станция, цифровизация, цифровая трансформация, цифровой двойник, автоматизированные системы, цифровое взаимодействие, роботизация.

Для цитирования: Москвичев, О. В. Обзорный анализ реализации отечественных цифровых технологий в работе грузовых железнодорожных станций / О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева, А. А. Хишова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 156–164. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_156.

Введение

В современной транспортной инфраструктуре грузовые железнодорожные станции являются основными объектами приема, хранения и распределения грузов, обеспечивают рациональное взаимодействие с грузоотправителями и грузополучателями. На грузовых станциях начинаются и заканчиваются материальные процессы перевозок грузов, осуществляется их перегрузка с одних видов транспорта на другие, поэтому они являются неотъемлемой частью логистических цепочек доставки грузов.

В настоящее время базовым условием создания новых и повышения качества существующих транспортных услуг в сфере грузовых железнодорожных перевозок является обеспечение цифровой трансформации производственных процессов. Однако, согласно исследованию, было выявлено, что данный процесс реализуется в первую очередь на сортировочных железнодорожных станциях. Такая тенденция объясняется высокой инвестиционной стоимостью цифровых технических решений, срок окупаемости которых будет зависеть в том числе и от объемов грузо- и вагонопотоков. Так, одна сортировочная станция обрабатывает большое количество вагонов, в среднем в сутки число которых варьируется от 6000 до 20 000, что требует выполнения более 100 000 разнообразных технологических операций, связанных с расформированием и формированием подвижного железнодорожного состава.

Вместе с тем необходимо помнить, что от эффективности функционирования грузовых железнодорожных станций и их клиентоориентированного взаимодействия с грузовладельцами зависит генерация грузопотоков, что напрямую влияет на прибыль компании ОАО «РЖД».

Основная часть

Рассмотрим и систематизируем основные направления реализации цифровых технологий в работе железнодорожных грузовых станций на современном этапе цифровой трансформации компании ОАО «РЖД»:

- 1) цифровизация и автоматизация технологических процессов;
- 2) цифровое взаимодействие с пользователями транспортных услуг;
- 3) цифровизация рабочих мест;

4) роботизация технологических операций на складах и грузовых фронтах мест общего пользования;

5) создание цифровых двойников (ЦД).

До недавнего времени базовой системой управления станциями являлась многофункциональная система реального времени АСУ СТ (автоматизированная система управления станциями), обеспечивающая комплексную автоматизацию выполнения технологических операций, предусмотренных технологическим процессом работы района управления [1]. Система обеспечивает реализацию нижнего уровня оперативно-диспетчерского управления перевозочным процессом, прежде всего местной работой в пределах станций, входящих в район управления [2]. АСУ СТ обеспечивает сокращение затрат времени на развоз местного груза и сбор на базовой станции погруженных вагонов. Также система обеспечивает ведение в реальном времени первичной базы данных модели перевозочного процесса, полноту и достоверность данных и графическое предоставление информации.

В настоящее время реализуется и развивается проект «Цифровая железнодорожная станция» (ЦЖС), направленный на комплексную автоматизацию всех этапов технологических операций на станции, начиная от планирования и заканчивая контролем выполнения эксплуатационной работы в режиме реального времени. Это осуществляется путем интеграции со станционными программно-аппаратными комплексами низовой автоматики и интеграции с системами полигонно-планирующего уровня. В рамках проекта ЦЖС реализованы следующие модули:

– *модуль контроля исполнения* – в него входят подсистема «Табло коллективного пользования», которое отображает информацию о работе станции, наличии локомотивов и бригад в депо и на станциях, наличии вагонов на станциях, и подсистема «Функциональный навигатор», которая обеспечивает формирование цепочек технологических операций, контроль соблюдения нормативов, а также выдачу заданий на МРМ (мобильные рабочие места) персоналу на выполнение технологических операций;

– *модуль планирования* – в него входит подсистема «Планирование и контроль отправления поездов» (ПиКОП), которая реализует функции автоматического планирования подвязки составов, локомотивов и локомотивных бригад к ниткам нормативного графика, также в данном модуле реализована функция согласования с клиентами плана маневровой работы по подаче/уборке вагонов на пути необщего пользования промышленных предприятий [3, 4].

Важную роль в автоматизации технологических операций на станциях играет активно внедряющаяся на всей сети российских железных дорог автоматизированная система коммерческого осмотра (АСКО ПВ). Комплекс предназначен для выявления коммерческих неисправностей, угрожающих безопасности движения поездов и сохранности перевозимых грузов. АСКО ПВ включает в себя несколько блоков: телевизионную систему видеоконтроля, электронные габаритные ворота, тензометрический рельс для взвешивания вагонов и автоматизированное место пункта коммерческого осмотра. Система позволяет значительно – до 30 % сократить время проведения коммерческого осмотра, что, в свою очередь, влияет на ускорение продвижения вагонопотоков и повышает качество самого коммерческого осмотра, влияющее на безопасность движения поездов и сохранность перевозимых грузов [5].

В рамках цифровизации и дальнейшего совершенствования средств диагностики подвижного состава в компании ОАО «РЖД» реализуется план внедрения системы интегрированных постов автоматизированного приема и диагностики подвижного состава (ППСС). Система представляет собой мультитехнологичную единую аппаратно-программную платформу, интегрирующую различные диагностические подсистемы. Благодаря применению таких технологий, как машинное зрение, лазерное 3D-сканирование, тензометрия, тепловая диагностика, ППСС автоматизирует более 50 операций технического обслуживания и более 40 операций коммерческого осмотра. Эффективность внедрения ППСС заключается в повышении безопасности перевозочного процесса, увеличении пропускной способности станции, снижении трудозатрат при коммерческом и техническом обслуживании вагонов, уменьшении степени негативного влияния человеческого фактора, повышении качества контроля веса подвижного состава и груза и прочее.

«Цифровое взаимодействие с пользователями транспортных услуг» реализуется за счет взаимодействия компании ОАО «РЖД» с клиентом в электронном формате, что значительно сокращает время на сбор, обработку информации и документов. Можно отметить следующие клиентоориентированные сервисы.

Электронный документооборот первичных документов представляет собой интегрированную платформу, которая способствует сокращению затрат на обработку, печать, архивирование и передачу документов. Она разработана с целью использования электронной подписи для подписания электронных счетов-фактур, актов и перечней между ЦФТО/ТЦФТО и клиентами. Электронное подписание актов и перечней клиентами и уполномоченными сотрудниками ОАО «РЖД» осуществляется через «единое окно» в рамках системы ЭТРАН [6].

В мае 2019 года ОАО «РЖД» был реализован такой информационный ресурс, как личный кабинет клиента ОАО «РЖД» – приложение, которое позволяет получать информационные услуги, оформлять и подписывать первичные документы в мобильном приложении. В личном кабинете пользователю доступны справки о местоположении, техническом состоянии вагонов и другая информация о подвижном составе, а также о станциях и поездах. В электронном виде в личном кабинете клиента ОАО «РЖД» для грузовых перевозок предоставляются различные первичные и учетные документы, такие как уведомления о завершении грузовых операций (форма ГУ-26), заявка на грузоперевозку (форма ГУ-12), памятка приемосдатчика на подачу и уборку вагонов (форма ГУ-45), ведомость подачи и уборки вагонов (форма ГУ-46), акт общей формы (форма ГУ-23), учетная карточка (форма ГУ-1), накопительная ведомость (форма ФДУ-92) и др. [7].

Система «Коммерческая диспетчеризация» предоставляет грузоотправителям цифровые сервисы взаимодействия, которые обеспечивают своевременный подвод вагонов под погрузку в соответствии с потребностями клиента и их продвижение до пункта назначения. При выполнении договора на такую услугу на станции должны обеспечить своевременный подвод порожнего подвижного состава в соответствии с потребностями грузовладельцев. Разрабатывается график приема к перевозке груженых/порожних вагонов, а также их уборки с путей необщего пользования.

Применение системы «Коммерческая диспетчеризация» на Куйбышевской дороге привело к увеличению надежности доставки на 0,4 %, скорости доставки до 319 км в сутки и дополнительному доходу от перевозки на 6,8 млн руб.

Система «Цифровизация рабочих мест» позволяет собирать, обрабатывать, передавать и хранить информацию в электронном формате с минимальным участием человека, тем самым повышать производительность труда, а в перспективе переходить на безлюдные технологии [8, 9]. По данному направлению внедрены следующие проекты, связанные с грузовой и коммерческой работой.

«Цифровой приемосдатчик» – технология, позволяющая проводить приём к перевозке порожних и груженых вагонов при помощи дистанционного электронного обмена данными. Представляет собой сервис, реализованный на базе корпоративного мессенджера и личного кабинета клиента ОАО «РЖД» в сфере грузовых перевозок. На удаленных и малодоступных грузовых фронтах грузоотправитель или грузополучатель фиксирует груженный и порожний подвижной железнодорожный состав на мобильный телефон с голосовым сопровождением, записывает видео, конкретизируя отдельные элементы и детали вагона, номера и целостность запорно-пломбировочных устройств, трафаретов, состояние вагона после выгрузки и др., далее пересылает видеоматериал специалисту ОАО «РЖД». После сверки данных из видеофайла с документами, представленными на перевозку, и при отсутствии замечаний происходит прием вагона в дистанционном формате в информационных системах ОАО «РЖД» [7].

Технология «Электронный претензионист» – документооборот полного цикла всей входящей и исходящей претензионной работы ОАО «РЖД» в электронной форме. Система автоматически рассматривает входящие претензии, начисляет штрафы, формирует исходящую претензию, анализирует качество оказанной услуги и т.д. В перспективе система должна проводить аудит процессов и выявлять точки их нарушения.

Технология «Автоагент» обеспечивает последовательное оформление перевозочных документов с использованием действующих нормативных документов и НСИ от имени перевозчика. Она осуществляет необходимые проверки для гарантирования правильности и полноты заполнения накладной по данным, предоставленным грузоотправителем, и подписывает документ электронной подписью. Технология также проверяет возможность принятия груза или порожнего вагона к перевозке, что позволяет сократить ожидание оформления перевозочных документов, улучшить качество и своевременность их оформления, а также гарантировать правильность начисления и взыскания доходов от грузовых перевозок [6]. Опыт применения технологии «Автоагент» на сети железных дорог показывает, что временные затраты на оформление документов значительно сокращаются. По некоторым данным, среднее время, затраченное на оформление документов, снижается на 75 %. В целом в

автоматическом режиме без участия человека оформляется 95 % порожних и 72 % гружёных вагонов, раскредитовываются перевозочные документы у более чем 94 % порожних и 35 % гружёных вагонов.

В настоящее время вопросам, связанным с цифровизацией и роботизацией технологических процессов на грузовых фронтах, терминально-складских комплексах, уделяется всё больше внимания. Важность модернизации транспортно-логистической инфраструктуры является одной из задач Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года. Кроме модернизации непосредственно инфраструктуры, стратегия к ключевым направлениям относит стимулирование развития транспортно-логистических технологий в транспортно-логистических центрах: технологии ускоренной разгрузки контейнерных поездов, роботизированного управления складской логистикой и т.д. В рамках Стратегии цифровой трансформации ОАО «РЖД» предполагается переход к новому программно-аппаратному комплексу управления – автоматизированной системе управления терминально-складским комплексом (АСУ ТСК), в функциональных требованиях к которой изначально заложена возможность перехода к полной автоматизации функционирования терминально-складских комплексов. Автоматизированная система управления транспортным складом объединяет функциональность следующих цифровых технологий и систем: цифровые двойники; технология машинного зрения; использование носимых мобильных устройств; интернет вещей; автоматическая идентификация и отслеживание объектов; роботизация; электронный документооборот.

Цифровой двойник, также известный как Digital Twin, – это виртуальная интерактивная копия реального объекта или процесса, которая моделирует их технические характеристики и поведение в различных ситуациях, таких как возникновение помех и воздействие окружающей среды. Управляя цифровым двойником, можно контролировать жизненный цикл оригинального объекта. Цифровые двойники применяются для оптимизации и повышения эффективности процесса перевозок, а также для обеспечения безопасности движения. В настоящее время на железнодорожных станциях внедрены программные комплексы, которые позволяют эффективно собирать и анализировать большое количество информации, а также выполнять технологические операции по обработке поездов и вагонов [10]. Создание цифрового двойника грузовой железнодорожной станции – это создание виртуальной модели, которая позволит планировать и прогнозировать работу станции на новом, более высоком уровне, а также организовывать технологическое взаимодействие с путями общего и необщего пользования. Заранее известная последовательность и длительность операций с каждым вагоном позволит планировать работу станции на сутки вперед, оптимизировать себестоимость перевозок и повысить безопасность.

Основные направления реализации цифровых технологий на грузовых железнодорожных станциях представлены на рис. 1.

В качестве примера для определения уровня цифровизации грузовых станций по ключевым технико-технологическим решениям указанных направлений (рис. 2) были проанализированы грузовые станции Куйбышевской железной дороги, выполняющие основную долю погрузки и выгрузки её регионов, а также их взаимодействие с грузоотправителями и грузополучателями. При оценке реализации цифровой трансформации производственных процессов грузовых станций получены следующие данные:

- технология «Автоагент» внедрена на всех железнодорожных станциях дороги;
- электронный документооборот – оформление 25 видов документов, связанных с перевозкой грузов, реализовано с электронной подписью в АС «ЭТРАН» для 1078 клиентов (грузоотправителей/грузополучателей) дороги;
- личный кабинет клиента ОАО «РЖД» используют 1007 грузоотправителей/грузополучателей дороги;
- технология «Цифровой приемосдатчик» (ЦПС) внедрена на 12 железнодорожных станциях из 40, где коммерческий осмотр производится с выездом приемосдатчика груза и багажа с опорной станции;
- модуль «ПиКОП» – автоматизированное планирование обмена вагонопотоками реализовано между станциями узла Жигулевское Море и основными клиентами ПАО «Тольяттиазот», ПАО «КуйбышевАзот», ООО «НХТК»;
- автоматизация технологических операций – АСКО ПВ внедрена в эксплуатацию на одной грузовой железнодорожной станции дороги, АСКО ПО 3Д внедрена в эксплуатацию на сортировочных железнодорожных станциях дороги, ППСС планируется к внедрению на сетевой сортировочной железнодорожной станции дороги.

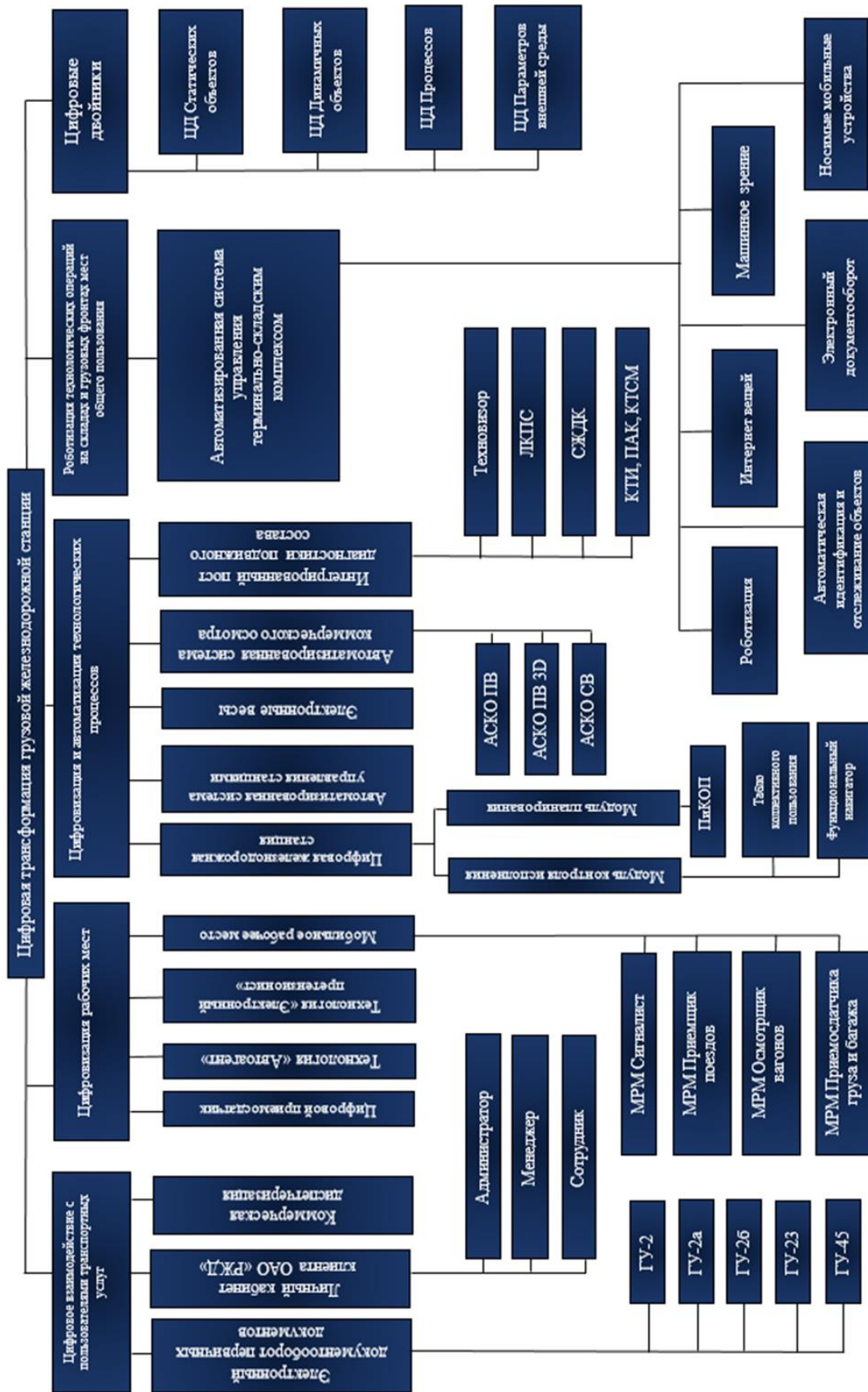


Рис. 1. Основные направления реализации цифровых технологий, применяемых на грузовых железнодорожных станциях

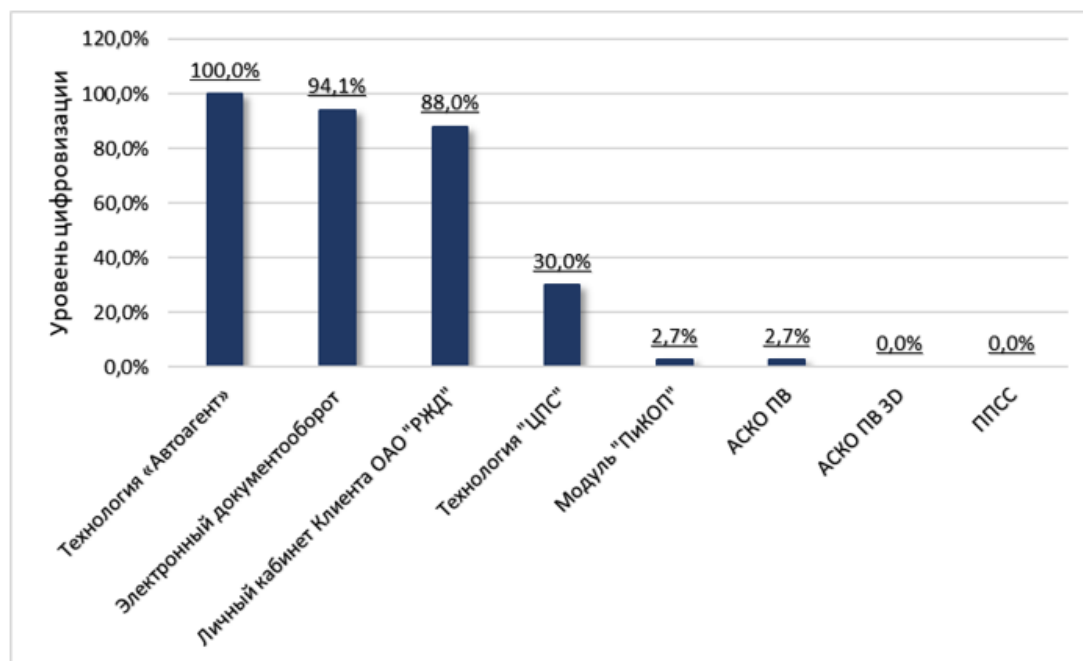


Рис. 2. Уровень цифровизации грузовых станций Куйбышевской железной дороги

Несмотря на технологическую, экономическую и социальную эффективность внедрения цифровых технологий в производственную деятельность грузовых станций и пользователей услуг железнодорожного транспорта, существует ряд факторов и рисков, тормозящих процесс цифровой трансформации и мешающих полноценной реализации вышеописанных проектов.

Комплексное действие этих факторов отражает SWOT-анализ реализации цифровых технологий в работе грузовых железнодорожных станций (таблица).

SWOT-анализ реализации цифровых технологий в работе грузовых железнодорожных станций

Сильные стороны	Слабые стороны
<p>Повышение пропускной способности станции за счёт ускорения обработки железнодорожного подвижного состава и сокращения межоперационных простоев;</p> <p>оптимизация использования ресурсов за счет повышения качества планирования работы с поездами на участках, эксплуатационной и грузовой работы станции с учётом работы грузоотправителей и грузополучателей;</p> <p>сокращение эксплуатационных расходов за счёт повышения производительности, уменьшения бумажного документооборота;</p> <p>повышение безопасности движения за счёт минимизации человеческого фактора в принятии оперативных решений, сокращения числа работников, находящихся в зоне интенсивного движения [3];</p> <p>успешный опыт реализации цифровых технологий на грузовых железнодорожных станциях</p>	<p>Низкий уровень технической оснащённости станционной железнодорожной инфраструктуры общего и необщего пользования;</p> <p>недостаточный уровень автоматизации процессов прогнозного планирования и управления исполнением перевозочного процесса на сортировочных станциях;</p> <p>недостаточное количество квалифицированных кадров в области цифровизации;</p> <p>недостаточный уровень кибербезопасности;</p> <p>необходимость пересмотра действующих нормативных документов;</p> <p>высокая инвестиционная составляющая в большинстве проектов по реализации цифровой трансформации производственных процессов;</p> <p>отсутствие регламентированного научно-методического сопровождения внедрения типовых цифровых решений в производственные процессы железнодорожного транспорта [3]</p>

Окончание табл.

Возможности	Угрозы
Государственная поддержка цифровой трансформации отраслей экономики; обеспечение конкурентоспособности железнодорожного транспорта на рынке транспортно-логистических услуг; повышение клиентоориентированности железнодорожной отрасли	Непредсказуемость социально-экономических ситуаций (пандемии, международные конфликты); возникновение рисков административно-управленческого характера, связанных с несвоевременным финансированием проектов; наличие технических рисков, связанных с возникновением непредвиденных затрат из-за неточного определения инвестиционной стоимости проектов и экономических эффектов; возможность кибератак; недостаточная активность пользователей услуг железнодорожного транспорта в участии в проектах, связанных с организацией работы в едином информационном пространстве грузовой станции и грузоотправителей, грузополучателей

Выводы

Таким образом, базовым условием создания новых и повышения качества существующих транспортных услуг в сфере грузовых железнодорожных перевозок в настоящее время является обеспечение цифровой трансформации станционных производственных процессов. Основными направлениями реализации цифровых технологий в работе железнодорожных грузовых станций на современном этапе являются цифровизация и автоматизация технологических процессов; цифровое взаимодействие с пользователями транспортных услуг; цифровизация рабочих мест; роботизация технологических операций на складах и грузовых фронтах мест общего пользования; создание цифровых двойников.

На основе полученной оценки уровня цифровизации грузовых станций к основным направлениям, имеющим наибольший показатель реализации, относятся цифровое взаимодействие с пользователями транспортных услуг и цифровизация рабочих мест. Как показывает SWOT-анализ, эффективность реализации цифровых технологий в работе грузовых железнодорожных станций напрямую зависит от наличия инвестиционных ресурсов на комплексное внедрение цифровых проектов, принятых научно-методических подходов к их выбору и оценке эффективности внедрения, а также информационного и технологического уровня взаимодействия с примыкающими путями необщего пользования (грузоотправителями и грузополучателями) и сортировочными станциями полигона дороги.

Список литературы

- 1 **Варгунин, В. И.** Информационные технологии и автоматизированные системы управления на железнодорожном транспорте : учебное пособие / В. И. Варгунин, О. В. Москвичев ; ФГБОУ ВО СамГУПС. – Самара : СамГУПС, 2007. – 234 с. – ISBN 978-5-98941-048-4.
- 2 **Шерстюков, О. С.** Способы передачи информации о работе технических средств в автоматизированные информационные системы / О. С. Шерстюков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (81). – С. 80–87. – ISSN 0201-727X.
- 3 **Москвичев, О. В.** Анализ влияния цифровизации производственных процессов на техно-

References

- 1 **Vargunin, V. I.** Information technologies and automated control systems in railway transport: a textbook / V. I. Vargunin, O. V. Moskvichev ; FGBOU VO SamGUPS. – Samara : SamGUPS, 2007. – 234 p. – ISBN 978-5-98941-048-4.
- 2 **Sherstyukov, O. S.** Methods of transmitting information about the operation of technical means in automated information systems / O. S. Sherstyukov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (81). – P. 80–87. – ISSN 0201-727X.
- 3 **Moskvichev, O. V.** Analysis of the impact of digitalization of production processes on the technology

логию работы железнодорожной станции / О. В. Москвичев, М. С. Титаренко // Транспортная наука и инновации : материалы международной научно-практической конференции / Самарский государственный университет путей сообщения. – Самара, 2023. – С. 121–124. – EDN GUUFTS.

4 **Москвичева, Е. Е.** К вопросу практической реализации цифровизации грузовых станций / Е. Е. Москвичева // Наука и образование транспорту. – 2022. – № 1. – С. 159–161. – EDN WEIQUL.

5 **Тонкова, М. Л.** Инновационные технологии коммерческого осмотра поездов и вагонов / М. Л. Тонкова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – № 1. – С. 130–138. – EDN LEVVUO.

6 **Быстрова, О. Л.** Автоматизация оформления перевозочных документов как эффективность процесса / О. Л. Быстрова, А. А. Кириллова // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 2 (12). – С. 560–567. – EDN PPFRTQ.

7 **Москвичев, О. В.** Цифровизация рабочих мест в грузовой работе как инновационный метод повышения безопасности и качества приёма грузов к железнодорожной перевозке / О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Международной научно-практической конференции / Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель, 2022. – С. 45–46. – ISBN 978-985-891-070-9.

8 Цифровые технологии в управлении перевозочным процессом : учебное пособие / А. Т. Осминин, О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева, А. В. Кабанов ; ФГБОУ ВО СамГУПС. – Самара : СамГУПС, 2023. – 206 с. – ISBN 978-5-98941-372-0.

9 **Шевердова, М. В.** Проект цифрового решения по расширению функционала «мобильного рабочего места машиниста» / М. В. Шевердова, Д. А. Полиэктв, О. Д. Покровская // Актуальные вопросы инженерного предпринимательства в условиях Индустрии 4.0 : сборник трудов студенческой научно-практической конференции с международным участием / под редакцией М. А. Дроздовой, О. Д. Покровской. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 377–384. – ISBN 978-5-369-02120-0.

10 **Римская, О. Н.** Цифровые двойники и их применение в экономике транспорта / О. Н. Римская, И. В. Анохов // Стратегические решения и риски-менеджмент. – 2021. – № 2. – С. 127–137. – ISSN 2618-947X.

of railway station operation / O. V. Moskvichev, M. S. Titarenko // Transport science and innovations : materials of the international scientific and practical conference / Samara State University of Railway Communications. – Samara, 2023. – P. 121–124. – EDN GUUFTS.

4 **Moskvicheva, E. E.** On the issue of practical implementation of digitalization of freight stations / E. E. Moskvicheva // Science and education for transport. – 2022. – No. 1. – P. 159–161. – EDN WEIQUL.

5 **Tonkova, M. L.** Innovative technologies of commercial inspection of trains and wagons / M. L. Tonkova // Proceedings of the Saint Petersburg University of Railway Engineering. – 2019. – No. 1. – P. 130–138. – EDN LEVVUO.

6 **Bystrova, O. L.** Automation of registration of transportation documents as an efficiency of the process / O. L. Bystrova, A. A. Kirillova // Young Science of Siberia. – 2021. – No. 2 (12). – P. 560–567. – EDN PPFRTQ.

7 **Moskvichev, O. V.** Digitalization of workplaces in freight work as an innovative method of improving the safety and quality of receiving goods for rail transportation / O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva // Problems of transport safety : materials of the XII International Scientific and Practical Conference / Belarusian State University of Transport. Gomel, 2022. – P. 45–46. – ISBN 978-985-891-070-9.

8 Digital technologies in the management of the transportation process : a textbook / A. T. Osminin, O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva, A. V. Kabanov ; FGBOU IN SamGUPS. – Samara : SamGUPS, 2023. – 206 p. – ISBN 978-5-98941-372-0.

9 **Sheverdova, M. V.** The project of a digital solution to expand the functionality of the «mobile workplace of a machinist» / M. V. Sheverdova, D. A. Polyektov, O. D. Pokrovskaya // Actual issues of engineering entrepreneurship in the context of Industry 4.0 : Proceedings of the student scientific and practical conference with international participation. Edited by M. A. Drozdova, O. D. Pokrovskaya. – Saint Petersburg, 2023. – P. 377–384. – ISBN 978-5-369-02120-0.

10 **Rimskaya, O. N.** Digital twins and their application in the transport economy / O. N. Rimskaya, I. V. Anokhov // Strategic decisions and risk management. – 2021. – No. 2. – P. 127–137. – ISSN 2618-947X.

O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva, A. A. Hishova

OVERVIEW ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE OPERATION OF FREIGHT RAILWAY STATIONS

Abstract. The paper considers the main trends and directions for the implementation of digital technologies at freight railway stations such as digitalization and automation of technological processes, digital interaction with users of transport services, digitalization of workplaces, robotization of technological operations in warehouses and cargo fronts of public places, as well as the creation of digital twins. Technological innovations aimed at improving production processes at freight railway stations and increasing their efficiency are presented. The study determined the level of digitalization of freight railway stations of the Kuibyshev Railway, and also presented a SWOT analysis of the implementation of digital technologies in the operation of freight railway stations.

Keywords: freight railway station, digitalization, digital transformation, digital twin, automated systems, digital interaction, robotization.

For citation: Moskvichev, O. V. Overview analysis of the implementation of digital technologies in the operation of freight railway stations / O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva, A. A. Hishova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 156–164. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_2_156.

Сведения об авторах

Москвичев Олег Валерьевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: moskvichev063@yandex.ru

Москвичева Елена Евгеньевна

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: moskvichevalena@yandex.ru

Хишова Анжелика Андреевна

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
преподаватель,
e-mail: a.hishova@samgups.ru

Information about the authors

Moskvichev Oleg Valerievich

Samara State University of Railway Engineering (SamGUPS),
Chair «Operational Work Management»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: moskvichev063@yandex.ru

Moskvicheva Elena Evgenievna

Samara State University of Railway Engineering (SamGUPS),
Chair «Technologies of Cargo and Commercial Work, Stations and Junctions»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: moskvichevalena@yandex.ru

Hishova Angelika Andreevna

Samara State University of Railway Engineering (SamGUPS),
Chair «Operational Work Management»,
Lecturer,
e-mail: a.hishova@samgups.ru

Н. Б. Попова, М. Е. Корягин, А. Д. Калидова

РАБОТА КОНТЕЙНЕРНЫХ ОПЕРАТОРОВ НА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Аннотация. Перевозка грузов в контейнерах считается одним из прогрессивных направлений в совершенствовании процесса перевозок. Контейнерные операторы являются компаниями-перевозчиками, благодаря которым осуществляется доставка товарной продукции.

В статье рассмотрены основные направления отправок грузов в контейнерах, выполненных с Западно-Сибирской железной дороги (ЗСЖД) контейнерными операторами. Показано доленое участие контейнерных операторов в отправлениях, выполненных в регионы России в разрезе железных дорог страны и в международном сообщении.

Исходя из территориальных (географических) и объемных (количественных) показателей отправок, сделан вывод о тесноте товарно-транспортных связей ЗСЖД с железными дорогами сети и со странами мира.

Цель исследования заключалась в анализе работы контейнерных операторов, организующих перевозку грузов внутреннего и экспортного назначения, видового разнообразия грузов, отправленных в контейнерах, и местоположения грузополучателей. Что позволило выявить и обозначить участие железной дороги во внутреннем и внешнем товарно-транспортных рынках.

В статье приведена методика учета и анализа грузовых отправок, выполненных контейнерными операторами, апробированная на полигоне Западно-Сибирской железной дороги.

Ключевые слова: контейнерные операторы, внутреннее сообщение, экспортные поставки, виды грузов, отправка грузов в контейнерах, железные дороги России, страны мира.

Для цитирования: Попова, Н. Б. Работа контейнерных операторов на Западно-Сибирской железной дороге / Н. Б. Попова, М. Е. Корягин, А. Д. Калидова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 165–172. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_165.

Введение

Современный процесс перевозок – это многогранное явление на рынке транспортных услуг. Чтобы обеспечить реализацию доставки товара от производителя до потребителя требуется выполнение определенных технико-технологических операций, существенное участие в которых принимает оператор контейнерных перевозок.

Институт операторов перевозок вообще и контейнерных перевозок в частности, в широком смысле, существует с момента организации транспортного производства на железной дороге, то есть со второй половины XIX века, претерпевая на пути своего развития весьма значимые изменения. К числу таких изменений следует относить реформирование, связанное как с внедрением технических и технологических достижений, так и с организационно-управленческими инновациями.

Следствием отраслевого реформирования начала XXI века стало появление и законодательное закрепление организационных и производственных структур, наделенных правами предоставления и реализации полного цикла транспортных услуг – контейнерных операторов. Поэтому в узком смысле оператор контейнерных железнодорожных перевозок – это современная транспортная компания, предлагающая клиенту спектр услуг, включающий перевозку контейнеров, организацию транзита и выполнение иных информационных и прочих логистических услуг.

Цель исследования заключалась в анализе работы контейнерных операторов, организующих перевозку грузов внутреннего и экспортного назначения по железным дорогам страны, учет видового разнообразия грузов, отправленных в контейнерах, и местоположения грузополучателей.

Материалы и методы исследования

Исходными исследовательскими материалами послужила информация из различных научных [1–3], публицистических [4–6] и статистических [7, 8] источников, связанная с характеристикой, учетом и анализом процессов перевозок, осуществляемых преимущественно железнодорожным транспортом. Сам по себе железнодорожный транспорт – это стабильный перевозчик, на долю которого приходится более 50 % грузооборота транспорта общего пользования [7], как составной элемент отрасли «транспортировка и хранение» транспорт обеспечивает до 6,0 % валового внутреннего продукта страны, созданного во всех отраслях экономики. При этом железнодорожный транспорт, располагая инфраструктурными объектами, способными функционировать всевозможным и круглогодично, создает более чем существенный результат этой работы.

Реформирование отечественного народного хозяйства, выразившееся в изменении форм собственности, зарождении (или обновлении) рынка и создании конкурентной среды, привело к появлению перевозчиков, для которых основной работой является перемещение грузов и все, что неразрывно связано с этим процессом. Одним из видов перемещения грузов являются контейнерные перевозки, а контейнерные операторы – это транспортные компании, работающие на рынке перевозок.

Объектом исследования стали контейнерные операторы, работающие на Западно-Сибирской железной дороге (ЗСЖД) и реализующие контейнерные перевозки грузов, поступающих в виде продукции, произведенной предприятиями добывающих и перерабатывающих отраслей, функционирующих в зоне влияния ЗСЖД.

Предметом исследования явились сведения, отражающие видовое разнообразие контейнерных грузов; адресатов контейнерных отправок, а также объемы отправленных грузов за период 2020–2022 гг. Основное внимание при этом было уделено конкретным контейнерным операторам, в особенности показателям их перевозочной работы. Именно эти транспортные структуры, работающие на рынке грузовых перевозок, позволили представить всю полноту спектра процесса контейнерных перевозок с территориально-географических, организационно-транспортных и товарных позиций.

Методы количественного учета, расчета и анализа, сравнения и сопоставления, применяемые для достижения результата, подчеркивающего особенности работы конкретных контейнерных операторов, связанные с распределением грузовых отправок по дорогам страны и государствам мира, использовались на разных этапах исследовательской деятельности.

Вопросы, касающиеся технических характеристик контейнеров, технологических операций с контейнерами и самими грузами, в данном исследовании не рассматривались.

Методика учета и анализа

В соответствии с имеющимся информационным массивом были рассмотрены и обобщены грузы в контейнерах по видам, адресатам и количеству контейнерных отправок в разрезе железных дорог страны. Сведения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Контейнерные отправки, выполненные с ЗСЖД по России за 2020–2022 гг.*

Контейнерный оператор	Вид груза и количество отправок	Адресат (железная дорога)
1 ООО «Феско Интегрированный транспорт»	стройматериалы, комбикорма, тара стеклянная, СКО**	Дальневосточная
	стройматериалы, комбикорма, СКО	Восточно-Сибирская
	стройматериалы	Западно-Сибирская
	стройматериалы, СКО	АО АК «Железные дороги Якутии»
	СКО	Красноярская
всего	11 отправок	5 дорог
2 ПАО «Трансконтейнер»	стройматериалы, битумы нефтяные строительные, СКО	Дальневосточная
	стройматериалы, СКО	АО АК «ЖДЯ»
	стройматериалы, СКО	Забайкальская
	стройматериалы, СКО	Восточно-Сибирская
	стройматериалы	Красноярская
	стройматериалы, СКО	Северная
стройматериалы	Западно-Сибирская	
всего	13 отправок	7 дорог

Окончание табл. 1

3 ООО «Газпромнефть-Логистика»	ксилол, масло моторное	Куйбышевская
	ксилол	Свердловская
	ксилол, петролатум, воск защитный	Северная
	ксилол	Северо-Кавказская
	ксилол	Юго-Восточная
	ксилол, присадки к минер. маслам	Московская
	ксилол	Горьковская
	ксилол	Западно-Сибирская
всего	12 отправок	8 дорог
4 АО «Евросиб СПб-ТС»	стройматериалы, напитки, изол	АО АК «ЖДЯ»
	стройматериалы, тара стеклянная, напитки, изол	Дальневосточная
	стройматериалы, напитки, изол	Восточно-Сибирская
	стройматериалы, напитки, изол	Забайкальская
всего	13 отправок	4 дороги
5 ООО «Камчатское морское пароходство»	мука пшеничная, стройматериалы, комбикорма, СКО, конструкции металлические, крупа, напитки; оборудование, машины и различные запасные части	Дальневосточная
всего	8 отправок	1 дорога

* здесь и далее структура и направления отправок в количественном выражении приняты по данным ЗСЖД для служебного пользования.

**сборная контейнерная отправка

В табл. 2 представлены сведения по видам грузов, количеству контейнерных отправок и странам-грузополучателям.

Таблица 2

**Контейнерные отправки, выполненные с ЗСЖД
по странам мира за 2020–2022 гг.**

Контейнерный оператор	Вид груза и количество отправок	Адресат (страна мира)
1 ООО «Феско Интегрированный транспорт»	семена льна, пиломатериалы, мука пшеничная, лузга, горох дробленый	Китай
	пиломатериалы	Вьетнам
	пиломатериалы	Япония
	пиломатериалы, лузга	Республика Корея
	пиломатериалы	Таиланд
	пиломатериалы, горох дробленый	Малайзия
	пиломатериалы	Австралия
	мука пшеничная	Никарагуа
	горох дробленый	Бангладеш
	горох дробленый	Пакистан
	горох дробленый	Шри-Ланка
всего	17 отправок	11 стран
2 АО «Евросиб СПб-ТС»	пиломатериалы, семена льна, семена масличных культур, шпон лущеный и строганный, лузга	Китай
	пиломатериалы, шпон лущеный и строганный	Вьетнам
	пиломатериалы	Египет
	пиломатериалы	Камбоджа
всего	9 отправок	4 страны

Окончание табл. 2

3 ООО «Европак-Юг»	масло рапсовое, семена льна,	Китай
	масло льняное, масло подсолнечное	
	масло рапсовое	Вьетнам
	всего 5 отправок	2 страны
4 ООО «АльянсТрансТорг»	пиломатериалы, шпон	Китай
	лущеный и строганный, семена льна, ячмень	
	всего 4 отправки	одна страна
5 ООО «Нефтехимическая транспортная компания»	полиэтилен, полипропилен	Китай
	всего 2 отправки	одна страна
6 ООО «Алэнси»	уголь каменный марки «Д», уголь каменный марки «СС»	Китай
	всего 2 отправки	одна страна
7 «Лесофонд»	пиломатериалы	Китай
	всего одна отправка	одна страна

Результаты исследования

Сравнительный анализ показал, что в исследуемый период в отправке грузов в контейнерах ЗСЖД сотрудничала с пятью контейнерными операторами, осуществлявшими доставку по России. Всего было выполнено 57 контейнерных отправок, поступивших в адрес тринадцати железных дорог. При этом ПАО «Трансконтейнер» и АО «Евросиб СПб-ТС» выполнили по 13 контейнерных отправок, «Газпромнефть-Логистика» – 12, «Феско Интегрированный транспорт» – 11 и «Камчатское морское пароходство» – 8 контейнерных отправок. Наибольшее количество контейнерных отправок поступило в адрес Дальневосточной железной дороги (4). По три контейнерных отправки ушло в адрес Восточно-Сибирской, Западно-Сибирской железных дорог и АО АК «Железные дороги Якутии». Дважды адресатами контейнерных отправок с ЗСЖД явились Красноярская, Забайкальская и Северная железные дороги. В адрес шести железных дорог – Куйбышевской, Свердловской, Северо-Кавказской, Юго-Восточной, Московской и Горьковской – ушло по одной контейнерной отправки.

В реализации контейнерных отправок с ЗСЖД в различные страны мира, участвовали 7 контейнерных операторов. Наибольшее количество отправок (17) было выполнено транспортной компанией «Феско Интегрированный транспорт». Компания «Евросиб СПб-ТС» выполнила 9 отправок, ООО «Европак-Юг» – 5, «АльянсТрансТорг» – 4. По две контейнерные отправки выполнили «Нефтехимическая транспортная компания» и ООО «Алэнси». Одна контейнерная отправка была выполнена компанией «Лесофонд», входящей в группу компаний «Дело» совместно с ПАО «Трансконтейнер».

Контейнерные отправки с ЗСЖД, поступившие в различные страны мира, отразили следующие особенности. Всего было выполнено 40 отправок, поступивших в 13 стран мира. Наиболее часто страной-грузополучателем выступал Китай. В эту страну доставляли грузы в контейнерах все упомянутые контейнерные операторы. Другой страной-получателем грузов в контейнерах стал Вьетнам. В эту страну контейнерные отправки были осуществлены благодаря работе таких операторов, как «Феско Интегрированный транспорт», «Евросиб СПб-ТС», «Европак-Юг». Другие страны мира получили в основном по одной отправки, выполненной преимущественно двумя контейнерными операторами – ООО «Феско Интегрированный транспорт» и ООО «Евросиб СПб-ТС».

Эти страны: Японию, Республику Корея, Таиланд, Малайзию, Индонезию, Бангладеш, Пакистан, Шри-Ланку, Камбоджу, как получателей российских контейнерных отправок, поступивших с ЗСЖД, – объединяет их местоположение. Все поименованные страны расположены в Восточной, Юго-Восточной или в Южной Азии. И только Никарагуа является Центральноамериканским государством, Египет – африканским, Австралия расположена на «собственном» континенте.

Судя по видам отправленных грузов, контейнерные операторы, сотрудничавшие с ЗСЖД в доставке грузов по России, обладают самой разнообразной тарой (контейнерами), способными перевозить грузы в твердом и жидком состоянии; грузы сыпучие и стеклянную тару, грузы технического и пищевого назначения и т.п. Если в контейнерных отправках по России наиболее часто отправляемым грузом были строительные материалы и различная химическая продукция, то в адрес других стран «ушли» отправки, содержащие в основном пиломатериалы, различные семена и иные зерновые и бобовые культуры. Следовательно, парк контейнеров и фитинговых платформ, специализированных и иных контейнеров, принадлежащих контейнерным операторам в настоящее время, позволяет предположить, что размер их участия в реализации контейнерного грузопотока, направленного с

ЗСЖД, имеет все предпосылки к увеличению вклада данного вида операционной работы в процесс перевозок.

Современные показатели долевого участия контейнерных операторов как транспортных компаний в реализации контейнерных отправок с ЗСЖД обобщены в табл. 3.

Таблица 3

Долевое участие контейнерных операторов в отправлениях с ЗСЖД за 2020–2022 гг., %

Контейнерный оператор	Отправки по России			Отправки экспортные		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022
1 ООО «Феско Интегрированный транспорт»	28,0	25,8	32,6	14,8	13,2	10,0
2 АО «ЕвросибСПб-ТС»	14,9	9,5	11,3	30,2	33,1	18,8
3 ПАО «Трансконтейнер»	37,4	32,0	27,4	-	-	-
4 «Лесфонд» входит в ГК «Дело» совместно с ПАО «Трансконтейнер»	-	-	-	14,6	8,3	6,9
5 ООО «Газпромнефть-Логистика»	15,2	24,4	18,6	-	-	-
6 ООО «Камчатское морское пароходство»	4,4	8,3	10,1	-	-	-
7 ООО «Европак-Юг»	-	-	-	12,4	27,0	31,3
8 ООО «АльянсТрансТорг»	-	-	-	7,3	6,6	13,7
9 ООО «Нефтехимическая транспортная компания»	-	-	-	20,6	11,7	10,2
10 ООО «Алэнси»	-	-	-	-	-	9,0
ИТОГО	100	100	100	100	100	100

Анализ табличных данных показал, что в исследуемый период ЗСЖД сотрудничала с десятью транспортными компаниями, обеспечивающими реализацию отправок грузов в контейнерах. Фактически три из десяти контейнерных операторов «сработали» как на внутреннем, так и на внешнем транспортных рынках. То есть специализируются на перевозках контейнерных грузов по России и в страны мира. Две компании: ООО «Газпромнефть-Логистика» и ООО «Камчатское морское пароходство», – осуществили доставку контейнеров только в пределах России. Три компании: ООО «Европак-Юг», ООО «АльянсТрансТорг» и ООО «Алэнси», – выполнили контейнерные отправки только на экспорт. Рис. 1 иллюстрирует участие контейнерных операторов во внутренних отправлениях с ЗСЖД.

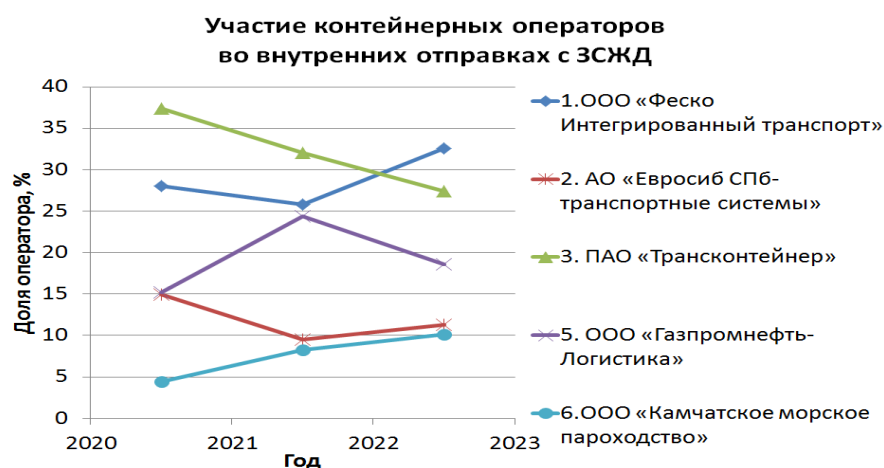


Рис. 1. Участие контейнерных операторов во внутренних отправлениях с ЗСЖД

На рис. 2 графически показано участие контейнерных операторов в экспортных отправлениях с ЗСЖД.

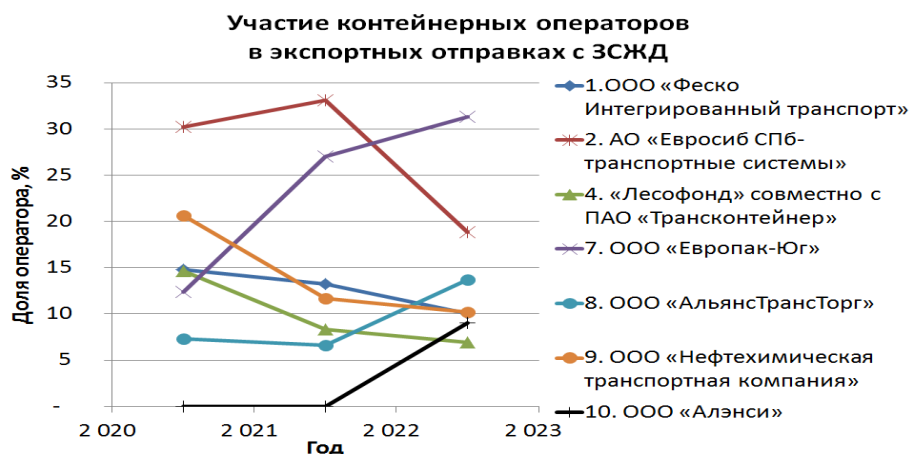


Рис. 2. Участие контейнерных операторов в экспортных отправлениях с ЗСЖД

Табличные данные и графические показатели свидетельствуют, что совокупный вклад транспортных компаний ООО «Феско Интегрированный транспорт», АО «Евросиб СПб-ТС», ПАО «Трансконтейнер» как основных операторов, осуществлявших отгрузку грузов в контейнерах по России, составил более 70 %. Доля этих контейнерных операторов в отгрузках за рубеж составила около 36 %.

Таким образом, современное состояние контейнерных отправок с позиций видового разнообразия грузов и участия контейнерных операторов в этой части процесса перевозок рассмотрено и исследовано. Обозначены основные контейнерные операторы, учтен и проанализирован их вклад в процесс грузовых перевозок ЗСЖД.

Перспективное развитие такого вида железнодорожных перевозок, как отгрузка грузов в контейнерах, во многом зависит от профессиональной работы контейнерных операторов, в частности, от разработки логистических маршрутов доставки грузов, наличия разнообразного контейнерного парка в составе их предприятий, наличия контейнерных сервисов с широкой сетью экспедиторских услуг для внутрироссийских и международных направлений [9–11].

Выводы

1 Контейнерные операторы, работающие в партнерских отношениях с Западно-Сибирской железной дорогой, являются отечественными транспортными компаниями, при непосредственном участии которых формируется место ЗСЖД на внутреннем и внешнем товарно-транспортных рынках.

2 В настоящее время посредством перевозочной деятельности, осуществляемой контейнерными операторами, ЗСЖД как структура железнодорожного транспорта отмечена на тринадцати железных дорогах страны и в тринадцати государствах мира, расположенных преимущественно в Азии.

3 Анализ работы контейнерных операторов показал, что в исследуемый период отгрузка грузов в контейнерах с Западно-Сибирской железной дороги осуществлялась при участии трех основных транспортных компаний-перевозчиков: ООО «Феско Интегрированный транспорт», АО «Евросиб СПб-ТС», ПАО «Трансконтейнер» совместно с «Лесофонд». Всего в обеспечении контейнерных отправок приняли участие 10 транспортных компаний – контейнерных операторов.

4 Анализ направлений контейнерных грузопотоков выявил, что преимущественными адресатами-грузополучателями по России являются железные дороги, расположенные в азиатской части страны: в Сибири и на Дальнем Востоке. Это Дальневосточная, Восточно-Сибирская, Западно-Сибирская, АО АК «Железные дороги Якутии». Аналогично и в контейнерных отгрузках на экспорт: основными грузополучателями являются страны, также расположенные в различных регионах Азии (Китай, Вьетнам, Малайзия, Таиланд, Республика Корея и др.).

Список литературы

1 Левин, С. Б. Управление перевозочным процессом транспортной компании / С. Б. Левин // Транспорт : наука, техника, управление. – 2015. – № 2. – С. 48–52. – ISSN 0236-1914.

References

1 Levin, S. B. Management of the transportation process of a transport company / S. B. Levin // Transport : science, technology, management. – 2015. – No. 2. – P.48–52. – ISSN 0236-1914.

- 2 Гончарова, Т. В. Анализ основных проблем международных контейнерных перевозок / Т. В. Гончарова // NovaInfo. – 2017. – № 63. – С. 220–225 — URL: <https://novainfo.ru/article/12311> (дата обращения: 17.02.2024).
- 3 Гашкова, Л. В. Современное состояние рынка международных контейнерных перевозок в России / Л. В. Гашкова, О. Ю. Морозова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2022. – № 9–1. – С. 53–61. – ISSN 2226-3977.
- 4 Концепция комплексного развития контейнерного бизнеса в холдинге «РЖД». – URL: <https://yandex.ru/search/?text=logo-polis.ru> wp-content/uploads/2015/12/ ... (дата обращения: 15.02.2024).
- 5 Обзор рынка контейнерных перевозок. – URL: <https://ar2022.fesco.ru/ru/strategic-report/market-overview/transportation> (дата обращения: 16.02.2024).
- 6 Перевозки груженых контейнеров на ЗСЖД. – URL: <https://zszd.rzd.ru/ru/2807/page/104069?id=289725> (дата обращения 16.02.2024).
- 7 Транспорт в России. 2022 : Стат. сб. / Росстат. – Москва, 2022. – 101 с.
- 8 Регионы России. Социально-экономические показатели. – 2022 : Стат. сб. / Росстат. – Москва, 2022. – 1122 с.
- 9 Перспективы контейнерного бизнеса. – URL: <https://espnko.ru/tpost/invr3ctbc1-konteinernii-biznes-v-ozhidanii-prirosta> (дата обращения: 17.02.2024).
- 10 Управление контейнерным бизнесом. – URL: <https://plus.rbc.ru/partners/627aa6ba7a8aa91620792ea5> (дата обращения: 17.02.2024).
- 11 Перспективы и тренды российского рынка контейнерных перевозок. – URL: <https://perevozka24.ru/pages/perspektiva-konteynernih-perevozok> (дата обращения: 17.02.2024).
- 2 **Goncharova, T. V.** Analysis of the main problems of international container transportation / T. V. Goncharova // NovaInfo. – 2017. – No. 63. – P. 220–225 — URL: <https://novainfo.ru/article/12311> (date of access: 02/17/2024).
- 3 **Gashkova, L. V.** The current state of the international container transportation market in Russia / L. V. Gashkova, O. Yu. Morozova // Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law. – 2022. – No. 9–1. – P. 53–61. – ISSN 2226-3977.
- 4 The concept of integrated development of container business in the Russian Railways holding. – URL: <https://yandex.ru/search/?text=logo-polis.ru> "wp-content/uploads/2015/12/ ... (date of access: 02/15/2024).
- 5 Overview of the container transportation market. – URL: <https://ar2022.fesco.ru/ru/strategic-report/market-overview/transportation> (date of access: 02/16/2024).
- 6 Transportation of loaded containers on the railway. – URL: <https://zszd.rzd.ru/ru/2807/page/104069?id=289725> (date of access: 02/16/2024).
- 7 Transport in Russia. 2022 : Stat. sat. / Rosstat. – Moscow, 2022. – 101 p.
- 8 Regions of Russia. Socio-economic indicators. – 2022 : Stat. sat. / Rosstat. – Moscow, 2022. – 1122 p.
- 9 Container business prospects. – URL: <https://espnko.ru/tpost/invr3ctbc1-konteinernii-biznes-v-ozhidanii-prirosta> (date of access: 02/17/2024).
- 10 Container Business Management. – URL: <https://plus.rbc.ru/partners/627aa6ba7a8aa91620792ea5> (date of access: 02/17/2024).
- 11 Prospects and trends of the Russian container transportation market. – URL: <https://perevozka24.ru/pages/perspektiva-konteynernih-perevozok> (date of access: 02/17/2024).

N. B. Popova, M. E. Koryagin, A. D. Kalidova

THE CONTAINER OPERATORS' WORK ON THE WEST SIBERIAN RAILWAY

Abstract. The transportation of goods in containers is considered one of the progressive directions in improving the transportation process. Container operators are shipping companies, thanks to which the delivery of commercial products is carried out.

The paper discusses the main directions of shipping goods in containers carried out by container operators from the West Siberian Railway. The share of container operators in shipments made to the regions of Russia in the context of the country's railways and in international traffic, that is, across the world, is shown.

Based on the territorial (geographical) and volumetric (quantitative) indicators of shipments, the conclusion is made about the closeness of commodity and transport links of the Russian Railways with the railways of the network and with the countries of the world.

The purpose of the study was to analyze the work of container operators organizing the transportation of goods for domestic and export purposes, the species diversity of goods shipped in containers and the location of consignees. This made it possible to identify and identify the participation of the railway in the domestic and foreign commodity and transport markets.

The paper presents a methodology for accounting and analyzing shipments made by container operators, tested at the landfill of the West Siberian Railway.

Keywords: container operators, internal communication, export deliveries, types of cargo, shipping of goods in containers, railways of Russia, countries of the world.

For citation: Popova, N. B. The container operators` work on the West Siberian Railway / N. B. Popova, M. E. Koryagin, A. D. Kalidova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 165–172. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_2_165.

Сведения об авторах

Попова Наталья Борисовна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Экономики транспорта»,
доктор географических наук, профессор,
e-mail: pnb1512@yandex.ru

Корягин Марк Евгеньевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Высшая математика»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: markkoryagin@yandex.ru

Калидова Александра Дмитриевна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Железнодорожные станции и узлы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: alexsandra_kd@bk.ru

Information about the authors

Popova Natalia Borisovna

Siberian State Transport University (SSTU),
Chair «Transport Economics»,
Doctor of Geographical Sciences, Professor,
e-mail: pnb1512@yandex.ru

Koryagin Mark Evgenievich

Siberian State Transport University (SSTU),
Chair «Higher Mathematics»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Chair,
e-mail: markkoryagin@yandex.ru

Kalidova Alexandra Dmitrievna

Siberian State Transport University (SSTU),
Chair «Railway Stations and Junctions»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: alexsandra_kd@bk.ru

Г. А. Тимофеева, А. Д. Хазимуллин

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПЕРЕВОЗЧИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ *

Аннотация. Предложена методика оценки управленческих решений компании железнодорожного перевозчика по привлечению грузовой базы и диверсификации направлений бизнеса с учетом дифференциации грузоотправителей. Подход опирается на использование нечеткой логики при анализе изменений объемов перевозок и дохода компании для описания неполноты информации о реакции клиентов. В качестве критерия используется эффективность вложений, подход учитывает различную реакцию клиентов на выбор управляющих решений в зависимости от типа груза, изменение объемов и доходов перевозок описывается треугольными нечеткими числами. Показано, что в настоящее время наиболее эффективной является стратегия, предусматривающая расширение сопутствующих перевозке транспортно-логистических услуг по сравнению с решениями, направленными на дисконтирование железнодорожного тарифа.

Ключевые слова: управленческие решения, перевозка грузов, привлечение клиентов, нечеткая логика, эффективность.

Для цитирования: Тимофеева, Г. А. Выбор оптимальных управленческих решений железнодорожного перевозчика с использованием нечеткой логики / Г. А. Тимофеева, А. Д. Хазимуллин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 173–180. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_173.

Введение

Исследование посвящено разработке методики оценки управляющих решений компании – железнодорожного перевозчика по привлечению грузоотправителей с учетом их дифференциации в зависимости от типа груза. В отличие от работ [1–3] здесь не анализируются стратегические решения по развитию транспортно-логистической системы страны, а изучается взаимодействие перевозчика с потребителями услуг. Для анализа отклика клиентов может использоваться вероятностное и имитационное моделирование, однако не всегда имеется возможность получить статистические данные о реакции клиентов на выбор стратегии, поэтому в данном исследовании рассматривается анализ стратегий компании с использованием нечеткой логики для описания отклика клиентов.

Нечеткие числа и нечеткая логика введены Л. Заде [4], в прикладных исследованиях эти математические понятия используются для анализа инвестиционных проектов [5, 6], также авторы используют нечеткое представление для описания широкого круга проблем развития транспортно-логистических систем [7].

Оценка реакции грузоотправителей на решения компании

В работах [8, 9] предложено учитывать дифференциацию грузоотправителей железнодорожного транспорта при анализе эффективности управленческих решений железнодорожного перевозчика. Установлено, что основное различие грузоотправителей состоит в классе отправляемого груза. В табл. 1 представлена структура объемов отгрузки по классу груза и доходов, получаемых железнодорожным перевозчиком от их транспортировки, по всей сети в 2022 году [10].

На основе представленной дифференциации можно сделать вывод о предпочтении выбора таких управленческих решений железнодорожного перевозчика U_i , которые бы способствовали увеличению высокодоходных классов грузов в общей структуре погрузки.

* Исследования выполнены в рамках проекта № 124032700006-3 «Повышение эффективности и клиентоориентированности региональных транспортных систем на основе моделирования и анализа больших данных» при финансовой поддержке госзаказа.

Таблица 1

Соотношение основных типов грузов на грузовых железнодорожных перевозках

Класс грузов	Доля класса грузов, %	
	в объеме перевозок	в доходе
Первый – низкодоходные грузы (сырьевые и другие массовые грузы, управляемые в больших объемах для производственных целей)	63	23
Второй – среднедоходные грузы (нефтепродукты, лесоматериалы, товары первой необходимости)	25	54
Третий – высокодоходные грузы (готовая продукция, занимающая наименьший объем перевозок, но имеющая очень широкую номенклатуру)	12	23

Проведем анализ потенциальных управленческих решений железнодорожного перевозчика с учетом разбиения всех грузоотправителей на три основные группы по типу груза. Будем рассматривать следующие стратегии железнодорожного перевозчика [8]:

- стратегия U_1 – развитие и внедрение новых логистических услуг;
- стратегия U_2 – применение единого дисконта на перевозку всех видов груза;
- стратегия U_3 – многоуровневое дисконтирование в зависимости от дальности перевозки.

Введем следующие обозначения для параметров общих показателей перевозки до внедрения стратегии по привлечению клиентов:

$V_k(0)$ – объем перевозимого груза k -го типа до введения стратегии, $k = 1, 2, 3$;

$D_k(0)$ – годовая прибыль компании от перевозки грузов k -го типа в доходе;

β_k – доля грузов k -го типа в общем объеме;

γ_k – доля грузов k -го типа в общем доходе компании.

Тогда общий объем грузоперевозок составит

$$V(0) = V_1(0) + V_2(0) + V_3(0), \quad V_k(0) = \beta_k V(0), \quad k = 1, 2, 3, \quad (1)$$

а общий доход

$$D(0) = D_1(0) + D_2(0) + D_3(0), \quad D_k(0) = \gamma_k D(0), \quad k = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Структура объемов и доходов по группам грузов отражена в табл. 1 и может быть записана в виде векторов

$$\beta = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3\} = \{0,63; 0,25; 0,12\}, \quad \gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\} = \{0,23; 0,54; 0,23\}. \quad (3)$$

Обозначим $V_k(U_i)$ и $D_k(U_i)$ объем перевозок и доход компании от предоставления услуг клиентам k -й группы после выбора управленческого решения по привлечению клиентов U_i .

Результат выбранного управленческого решения (U_i) для k -й группы грузоотправителей будем описывать парой нечетких чисел $\{v_{ik}, d_{ik}\}$, которые отражают изменение объема и дохода соответственно для каждой стратегии и каждой группы грузоотправителей, т.е.

$$V_k(U_i) = v_{ik} V_k(0), \quad D_k(U_i) = d_{ik} D_k(0), \quad k = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Коэффициенты увеличения объемов и доходов для каждой группы грузоотправителей будем описывать с помощью нечеткой логики. Развивая подход, предложенный в [9], будем предполагать, что эти изменения описываются одним из трех термов $\{A, B, C\}$, где

A = «практически не изменится»,

B = «увеличится несущественно»,

C = «увеличится существенно».

Прогноз реакции грузоотправителей, который был сделан на основании экспертных оценок, опросов и анализа статистических данных, представлен в табл. 2 [9].

Таблица 2

Реакция грузоотправителей различных грузов на решения железнодорожного перевозчика по привлечению грузовой базы

Стратегии	1-й класс грузов		2-й класс грузов		3-й класс грузов	
	Изменение объема (v_{i1})	Изменение дохода (d_{i1})	Изменение объема (v_{i2})	Изменение дохода (d_{i2})	Изменение объема (v_{i3})	Изменение дохода (d_{i3})
Развитие ЛС услуг (U_1)	A	A	B	C	B	C
Единый дисконт на все классы груза (U_2)	B	B	B	B	B	B
Много-уровневый дисконт от расстояния перевозки (U_3)	B	B	C	C	B	B

С целью получения оценок для изменений объемов перевозок и дохода компании в целом конкретизируем представление термов **A**, **B**, **C** в форме нечетких чисел. Так как информации недостаточно, будем использовать треугольные нечеткие числа.

Действия над нечеткими числами треугольного вида

Треугольные нечеткие числа широко используются при описании различных прикладных задач [5, 11]. Функция принадлежности нечеткого треугольного числа **A** определяется тремя параметрами: минимальным A_L и максимальным A_R возможными значениями и наиболее вероятным A_M значением нечеткого числа **A**.

Определение 1. Треугольная функция $\mu_A(x)$ принадлежности нечеткого числа **A** задается тремя числами $\{A_L, A_M, A_R\}$ и записывается как [12]

$$\mu_A(x) = \mu(x; A_L, A_M, A_R) = \begin{cases} 0, & x < A_L, \quad x \geq A_R; \\ \frac{x - A_L}{A_M - A_L}, & A_L \leq x < A_M; \\ \frac{A_R - x}{A_R - A_M}, & A_M \leq x < A_R. \end{cases}$$

График функции принадлежности приведен на рис. 1.

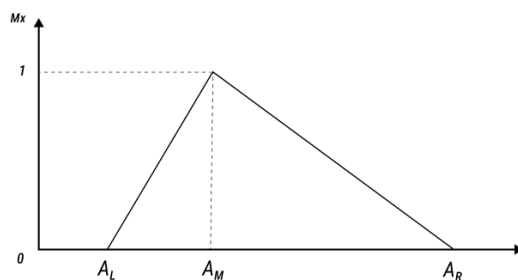


Рис. 1. Функция принадлежности нечеткого треугольного числа

Определение 2. Нечеткое треугольное число A будем называть симметричным, если

$$A_M = 0,5A_L + 0,5A_R.$$

Для нахождения суммы треугольных нечетких чисел и их умножения на число будем использовать действия с нечеткими числами [12, 13].

Утверждение 1. Пусть A и B нечеткие треугольные числа с заданными параметрами $\{A_L, A_M, A_R\}$ и $\{B_L, B_M, B_R\}$ соответственно, $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$ обычные числа, тогда $D = \lambda_1 A + \lambda_2 B$ – нечеткое треугольное число с параметрами $\{D_L, D_M, D_R\}$, которые находятся по формулам

$$\begin{aligned} D_L &= \lambda_1 A_L + \lambda_2 B_L; \\ D_M &= \lambda_1 A_M + \lambda_2 B_M; \\ D_R &= \lambda_1 A_R + \lambda_2 B_R. \end{aligned} \quad (5)$$

Следствие. Пусть выполняются условия утверждения 1 и нечеткие числа являются симметричными, тогда $D = \lambda_1 A + \lambda_2 B$ также симметричное треугольное число.

Отметим, что при умножении треугольных чисел результат не является треугольным числом, однако он является приближенно треугольным.

Будем рассматривать деление нечеткого треугольного числа A на нечеткое треугольное число B в условиях, когда $B_L > 0$. В этом случае результат также можно представить в виде нечеткого числа. Из правил действий с нечеткими числами [11, 12] получаем следующее утверждение.

Утверждение 2. Пусть A и B нечеткие треугольные числа с заданными параметрами $\{A_L, A_M, A_R\}$ и $\{B_L, B_M, B_R\}$ соответственно, причем $B_L > 0$, тогда их частное $C = A/B$ является также нечетким числом, функция $\tilde{\mu}(x; C_L, C_M, C_R)$ принадлежности которого имеет вид

$$\tilde{\mu}_C(x) = \tilde{\mu}(x; C_L, C_M, C_R) = \begin{cases} 0, & x < C_L, \quad x \geq C_R; \\ f_L(x), & C_L \leq x < C_M; \\ f_R(x), & C_M \leq x < C_R. \end{cases}$$

где постоянные C_L, C_M, C_R определяются по формулам

$$C_L = \frac{A_L}{B_R}, \quad C_M = \frac{A_M}{B_M}, \quad C_R = \frac{A_R}{B_L}, \quad (6)$$

функции $f_L(x)$ и $f_R(x)$ монотонно возрастающая и монотонно убывающая неотрицательные функции и

$$f_L(C_L) = f_R(C_R) = 0, \quad f_L(C_M) = f_R(C_M) = 1.$$

При анализе управленческих решений функцию принадлежности общего вида будем заменять треугольной функцией принадлежности $\mu(x; C_L, C_M, C_R)$ с теми же параметрами.

Анализ результата управленческих решений

Основным показателем оптимальности решения выберем увеличение эффективности вложений (ef) после внедрения стратегии. Под эффективностью здесь будем понимать отношение дохода компании к объему перевозок. Обозначим эффективность после выбора управляющего решения U_i через $E(U_i)$, а исходную эффективность через $E(0)$. Тогда

$$ef(U_i) = \frac{E(U_i)}{E(0)}, \quad (7)$$

где

$$E(0) = \frac{D(0)}{V(0)}, \quad E(U_i) = \frac{D(U_i)}{V(U_i)}.$$

Объем перевозок $V(U_i)$ и доход компании $D(U_i)$ после внедрения U_i стратегии зависят от влияния каждой из стратегий на перевозчиков различных видов грузов и могут быть записаны в виде

$$V(U_i) = \sum_{k=1}^3 v_{ik} V_k(0) = V(0) \sum_{k=1}^3 v_{ik}(U_i) \beta_k; \quad (8)$$

$$D(U_i) = \sum_{k=1}^3 d_{ik} D_k(0) = D(0) \sum_{k=1}^3 d_{ik}(U_i) \gamma_k. \quad (9)$$

Каждый уровень (терм) («практически не изменится», «увеличится несущественно», «увеличится существенно») на основе опроса экспертов запишем в виде треугольного нечеткого числа A с параметрами $\{A_L, A_M, A_R\}$:

$$\begin{aligned} A &= \text{«практически не изменится»} = \{1,00; 1,025; 1,05\}; \\ B &= \text{«увеличится несущественно»} = \{1,05; 1,075; 1,10\}; \\ C &= \text{«увеличится существенно»} = \{1,10; 1,15; 1,20\}. \end{aligned}$$

Используя формулы (5), (8), (9) и данные о структуре доходов и расходов (3), рассчитаем оценки для изменения объемов перевозок и доходов железнодорожного перевозчика для каждой стратегии в виде треугольных чисел. Изменение эффективности рассчитываем по следующей формуле:

$$ef(U_i) = \frac{\sum_{k=1}^3 d_{ik}(U_i) \gamma_k}{\sum_{k=1}^3 v_{ik}(U_i) \beta_k}. \quad (10)$$

Учитываем, что и числитель, и знаменатель в формуле (10) – нечеткие числа, и используем соотношения (6) для расчета параметров нечетких оценок эффективности. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Оценка результатов применения управленческих решений с использованием нечеткой логики

Стратегии	Изменение общего объема V			Изменение суммарного дохода D			Изменение эффективности		
	V_L	V_M	V_R	D_L	D_M	D_R	C_L	C_M	C_R
Развитие ЛС услуг (U_1)	1,019	1,044	1,069	1,077	1,12	1,67	1,008	1,075	1,144
Единый дисконт на все классы груза (U_2)	1,05	1,075	1,1	1,05	1,075	1,1	0,955	1	1,048
Многоуровневый дисконт от расстояния перевозки (U_3)	1,019	1,044	1,069	1,077;	1,12	1,15;	0,96	1,02	1,09

На рис. 2 приведены графики оценок изменения эффективности для всех трех управленческих решений с использованием нечеткого анализа. Здесь желтым цветом обозначена функция $ef(U_1)$, синим – $ef(U_2)$, зеленым – $ef(U_3)$.

Несмотря на то что все рассмотренные решения приводят к увеличению доходов компании (нижняя граница функции принадлежности доходов после применения решения больше 1 для всех U_i), решения U_2 и U_3 несут значительный риск снижения эффективности, причем для решения U_2 риск выше чем 50 %.

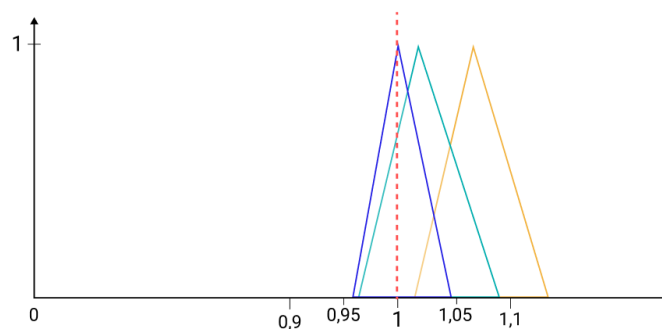


Рис. 2. Функции принадлежности для изменения эффективности перевозок для различных управленческих решений

На основе проведенных расчетов можно сделать вывод о предпочтительности стратегии U_1 – развитие комплекса транспортно-логистических услуг.

Стратегию U_1 сложно назвать стандартным решением, поскольку его основной целью является не увеличение объемов погрузки железнодорожного транспорта, а развитие спектра транспортно-логистических услуг, сопутствующих процессу транспортировки. Такое решение способствует диверсификации бизнеса железнодорожного перевозчика и позволит создать на базе ОАО «РЖД» рыночного игрока, который способен полноценно организовать принцип «одного окна». Более того, расширение спектра услуг, повышение качества транспортного обслуживания, снижение барьеров входа на железнодорожный транспорт косвенно все равно приведут к увеличению объемов погрузки.

Выводы

В статье предложена методика оценки управляющих решений компании-перевозчика по привлечению клиентов и расширению бизнеса с учетом дифференциации клиентов по типу груза и с использованием нечеткого представления о реакции клиентов на решения компании. Показано, что в настоящее время наиболее эффективной среди рассмотренных является стратегия, предусматривающая расширение транспортно-логистических услуг.

Список литературы

1 Верескун, В. Д. Оценка перспектив роста грузооборота международного транспортного коридора «Север – Юг» в современных условиях / В. Д. Верескун, Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3 (91). – С. 45–56. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_45.

2 Транспортно-логистические системы в условиях системных изменений в экономике / Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда, В. А. Финоченко, К. А. Годованый // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.

3 Развитие узловой терминально-складской инфраструктуры : модификация методов исследования и прогнозы / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. В. Трапенев [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 3. – С. 46–57. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-3-46-57.

References

1 Vereskun, V. D. The assessment of prospects for growth of cargo turnover of the international transport corridor «north – south» in modern conditions / V. D. Vereskun, E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3 (91). – P. 45–56. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_45.

2 Transport and logistics systems in the context of systemic changes in the economy/ E. A. Mamaev, A. N. Guda, V. A. Finochenko, K. A. Godovany // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.

3 Development of hub terminal and warehouse infrastructure : modification of research methods and forecasts / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. V. Trapenov [et al.] // Bulletin of scientific research result. – 2023. – No 3. – P. 46–57. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-3-46-57.

- 4 **Заде, Л. А.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – Москва : Мир, 1976. – 165 с.
- 5 **Вакулина, Г. М.** Нечетко-множественный подход в анализе рисков инвестиционных проектов / Г. М. Вакулина // Экономика и менеджмент систем управления. – 2012. – № 4–3 (6). – С. 406–411. – EDN PVQMCX.
- 6 **Недосекин, А. О.** Нечетко-множественный анализ риска фондовых инвестиций : монография / А. О. Недосекин. – Санкт-Петербург, 2002. – 181 с.
- 7 **Нейро-нечеткое моделирование транспортно-логистических процессов / О. Н. Числов, Н. Н. Лябах, М. В. Бакалов [и др.] // Транспорт : наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2022. – № 10. – С. 23–27. – DOI 10.36535/0236-1914-2022-10-4.**
- 8 **Тимофеева, Г. А.** Вероятностное моделирование поведения грузоотправителей при оценке программ лояльности на железнодорожном транспорте / Г. А. Тимофеева, А. Д. Хазимуллин // Транспорт Урала. – 2023. – № 4 (79). – С. 34–40. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-4-34-40.
- 9 **Тимофеева, Г. А.** Анализ стратегий по привлечению клиентов транспортно-логистических услуг холдинга «РЖД» с учетом дифференциации клиентов / Г. А. Тимофеева, А. Д. Хазимуллин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (57). – С. 64–72. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-1-64-72.
- 10 **Российские железные дороги. Годовой отчет 2022. – URL: https://ar2022.rzd.ru/download/full-reports/ar_ru_annual-report_spreads_rzd_2022.pdf (дата обращения: 10.12.2022).**
- 11 **Чернов, В. Г.** Основы теории нечетких множеств. Решение задач многокритериального выбора альтернатив / В. Г. Чернов : учебное пособие. – Владимир, 2005. – ISBN 5-89368-612-8.
- 12 **Ухоботов, В. И.** Сравнение нечетких чисел треугольного вида / В. И. Ухоботов, И. С. Стабулит, К. Н. Кудрявцев // Вестник удмуртского университета. Математика, механика, компьютерные науки. – 2019. – Том 29. – № 2. – С. 197–210. – DOI 10.20537/vm190205.
- 13 **Галлямов, Е. Р.** Компьютерная реализация операций с нечеткими числами / Е. Р. Галлямов, В. И. Ухоботов // Вестник ЮУрГУ. Серия : Вычислительная математика и информатика. – 2014. – Том 3. – № 3. – С. 97–108. – EDN SMCHQJ.
- 4 **Zadeh, L. A.** The Concept of Linguistic Variable and Its Application to Approximate Decision Making / L. A. Zadeh. – Moscow : Mir, 1976. – 165 p.
- 5 **Vakulina, G. M.** Fuzzy-set approach in risk analysis of investment projects / G. M. Vakulina // Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya. – 2012. – No 4–3 (6). – P. 406–411. – EDN PVQMCX.
- 6 **Nedosekin, A. O.** Fuzzy-multiple risk analysis of stock investments : monograph / A. O. Nedosekin. – St. Petersburg, 2002. – 181 p.
- 7 **Neuro-fuzzy modeling of transport and logistics processes / O. N. Chislov, N. N. Lyabakh, M. V. Bakalov [et al.] // Transport : science, technology, management. Scientific information collection. – 2022. – No. 10. – P. 23–27. – DOI 10.36535/0236-1914-2022-10-4.**
- 8 **Timofeeva, G. A.** Probabilistic modeling of shipper behavior when assessing loyalty programs on railway transport/ G. A. Timofeeva, A. D. Khazimullin // Transport of the Urals. – 2023. – No. 4 (79). – P. 34–40. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-4-34-40.
- 9 **Timofeeva, G. A.** Analysis of strategies to attract customers of transport and logistics services of "Russian Railways" holding taking into account customer differentiation / G. A. Timofeeva, A. D. Khazimullin // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2023. – No 1 (57). – P. 64–72. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-1-64-72.
- 10 **Russian Railways. Annual report 2022. – URL: https://ar2022.rzd.ru/download/full-reports/ar_ru_annual_report_spreads_rzd_2022.pdf (date of access: 12/10/2022).**
- 11 **Chernov, V. G.** Fundamentals of the theory of fuzzy sets. Solving problems of multicriteria selection of alternatives / V. G. Chernov : Textbook. – Vladimir, 2005. – ISBN 5-89368-612-8.
- 12 **Ukhobotov, V. I.** Comparison of triangular fuzzy numbers/ V. I. Ukhobotov, I. S. Stabulit, K. N. Kudryavtsev // Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki. – 2019. – Vol. 29. – No 2. – P. 197–210. – DOI 10.20537/vm190205.
- 13 **Gallyamov, E. R.** Computer implementation of operations with fuzzy numbers / E. R. Gallyamov, V. I. Ukhobotov // Bulletin of the South Ural State University. Series : Computational Mathematics and Software Engineering. – 2014. – Vol. 3. – No. 3. – P. 97–108. – EDN SMCHQJ.

G. A. Timofeeva, A. D. Khazimullin

SELECTING OPTIMAL MANAGEMENT DECISIONS FOR A RAILWAY CARRIER USING FUZZY LOGIC

Abstract. The paper proposed a methodology for assessing management decisions of a railway carrier company to attract a freight base and diversify business areas using the differentiation of shippers. The approach is based on the use of fuzzy logic in analyzing changes in transportation volumes and company income to describe the incompleteness of information about customer reactions. The efficiency of investments is used as a criterion, the approach takes into account the different reactions of customers to the choice of management decisions depending on the type of cargo, the change in transportation volumes and income is described by triangular fuzzy numbers. It is shown that at present, a more effective strategy is one that provides for the expansion of associated transportation and logistics services compared to solutions aimed at discounting the railway tariff.

Keywords: management decisions, cargo transportation, customer acquisition, fuzzy logic, efficiency.

For citation: Timofeeva, G. A. Selecting optimal management decisions for a railway carrier using fuzzy logic / G. A. Timofeeva, A. D. Khazimullin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 173–180. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_2_173.

Сведения об авторах

Тимофеева Галина Адольфовна

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Естественнонаучные дисциплины»,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующая кафедрой,
e-mail: Gtimofeeva@usurt.ru

Хазимуллин Артем Дамирович

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Естественнонаучные дисциплины»,
аспирант,
e-mail: hazimullinad@mail.ru

Information about the authors

Timofeeva Galina Adolfovna

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Doctor of Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Professor, Head of the Chair,
Chair «Natural Sciences»,
e-mail: Gtimofeeva@usurt.ru

Khazimullin Artem Damirovich

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair «Natural Sciences»,
Postgraduate Student,
e-mail: hazimullinad@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.42.004.69 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_181

*И. С. Морозкин, Г. В. Даровской***ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СВАРКИ КОРОТКОЙ ДУГОЙ ПРИ РЕМОНТЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Аннотация. Оптимизирована работа схемы зажигания дуги на этапах начала сварки и формирования капли малых размеров с целью повышения производительности и качества ремонта деталей подвижного состава железных дорог. В работе представлен анализ технологических характеристик процессов сварки длинной и короткой дугой, систем управления плавлением и переносом металла, установлены взаимовлияния различных стадий процесса. Экспериментально установлено, что глубина проплавления основного металла с уменьшением диаметра электрода увеличивается ввиду увеличения плотности тока. Представлены системы управления плавлением и переносом металла, позволяющие оптимизировать процесс сварки короткой дугой. Обобщены материалы по системам управления и даны рекомендации по оптимизации процесса сварки.

Ключевые слова: сварочная дуга, короткое замыкание, плавящийся электрод, сварка короткой дугой, оптимизация процесса.

Для цитирования: Морозкин, И. С. Оптимизация процесса сварки короткой дугой при ремонте подвижного состава железных дорог / И. С. Морозкин, Г. В. Даровской // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 181–187. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_181.

Введение

В настоящее время при ремонте железнодорожного транспорта широко применяются различные способы восстановления деталей, среди которых большое распространение получила наплавка тел вращения. Номенклатура восстанавливаемых тел вращения достаточно широкая и насчитывает только для тягового подвижного состава порядка сорока различных наименований.

Большинство тел вращения имеют сравнительно небольшие диаметры, что требует применения дуговой наплавки с небольшими диаметрами электродной проволоки и сварочного тока с целью уменьшения тепловложений. Одним из таких методов является сварка короткой дугой.

Целью работы является анализ технологических характеристик процесса и установление взаимовлияния различных его стадий.

Объектом исследования является процесс дуговой сварки короткой дугой.

В работе проведен анализ технологических характеристик указанного процесса, систем управления плавлением и переносом металла, установлены взаимовлияния различных стадий процесса.

Даны рекомендации по оптимизации процесса сварки короткой дугой для деталей подвижного состава железных дорог.

Анализ процесса сварки в углекислом газе

Отличительной чертой применения электродной проволоки сплошного сечения является содержание кремния и марганца, т.е. элементов-раскислителей (например, Св-10ХГ2СМФ). Условно процесс механизированной сварки (наплавки) в среде защитных газов можно разделить на сварку (наплавку) короткой и длинной дугой (рис. 1, 2).

В первом случае характерны диаметры проволоки $d_s = 0,8 \dots 1,2$ мм и небольшие величины сварочного тока $I_{св} = 80 \dots 150$ А, что ведет к малым потерям электродного металла при разбрызгивании и уменьшению расходования электроэнергии. Во втором случае, $d_s = 1,6 \dots 3,0$ мм, что характеризуется большими значениями величины сварочного тока $I_{св} = 160 \dots 250$ А и недостаточно хорошим формированием шва [1].

Улучшение внешнего вида шва достигают уменьшением разбрызгивания и оптимизацией режима сварки, а также формированием оптимальной формы кривой тока, созданием более периодичного процесса с постоянным временем цикла, применением смеси газов и порошковой проволоки.

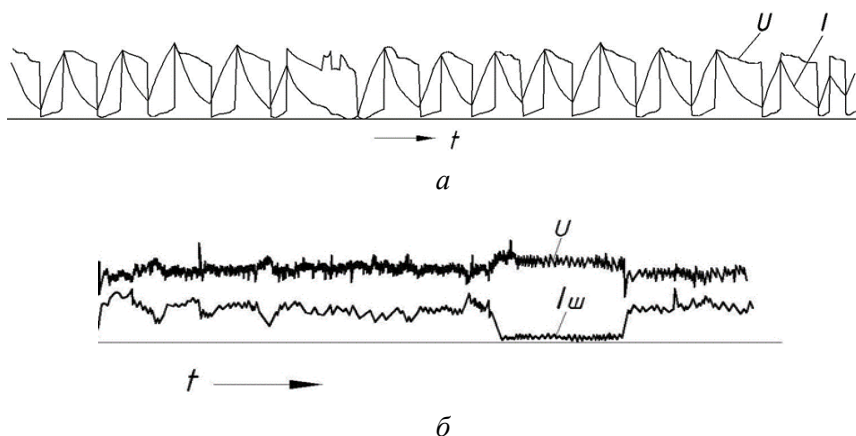


Рис. 1. Осциллограммы сварки длинной и короткой дугой:
a – короткой дугой; *б* – длинной дугой;
U – напряжение на дуге; *I* – сварочный ток

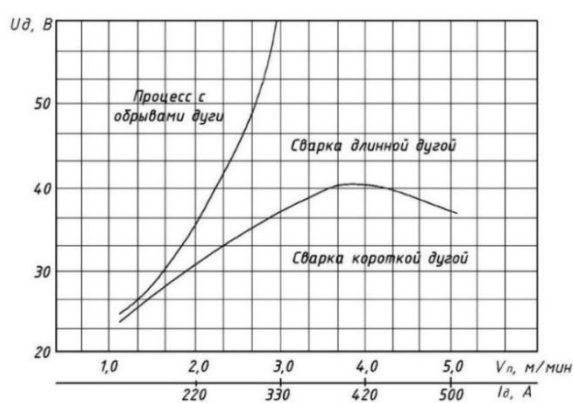


Рис. 2. График процессов при сварке (наплавке) в CO_2 (Св-10ХГ2СМФ, $d_3 = 1,6$ мм), полярность обратная

Стадии и разновидности процесса сварки

Процесс сварки можно разделить на три стадии:

1-я стадия – установление стабильного процесса сварки или зажигания дуги (начало сварки);

2-я стадия – стабильное течение процесса сварки – формируется сварочный шов (собственно сварочный процесс);

3-я стадия – прекращение процесса сварки – переход от стабильного течения процесса до обрыва дуги, процесс может программироваться для заварки кратера, формирование капли на конце электрода (окончание сварки).

Сварка в углекислом газе плавящимся электродом производится постоянным током чаще всего на обратной полярности.

Возможны две основные разновидности процесса: сварка с частыми периодическими замыканиями дугового промежутка и сварка без замыканий дугового промежутка.

Первая разновидность процесса характерна для тонкой электродной проволоки на низких режимах (сварка короткой дугой). Вторая разновидность процесса характерна для проволоки большего диаметра на форсированных режимах (сварка длинной дугой).

Для первой разновидности процесса необходимы определенные статические характеристики и динамические свойства сварочного выпрямителя. Сварочная цепь должна иметь определенную индуктивность в зависимости от диаметра электрода, а статические характеристики должны быть жесткими или пологопадающими.

Для второй разновидности процесса статические и динамические характеристики сварочного выпрямителя на технологические характеристики процесса сварки существенного влияния не оказывают.

Сварка короткой дугой (первая разновидность процесса) является естественным импульсным процессом плавления и переноса электродного металла с периодическими замыканиями дугового промежутка. Реализация данного процесса возможна при величине скорости коротких замыканий, достигающих 70 кА/с, что определяется циклограммой сварочного процесса и включает следующие стадии:

- замыкание дугового промежутка и «взрывообразное» перегорание перемычки;
 - отбрасывание жидкого металла сварочной ванны и дугового промежутка;
 - зажигание дуги при повторном замыкании расплавленного конца электрода и основного металла.
- Это способствует контактному зажиганию дуги при механизированных видах сварки и наплавки.

Процесс сварки в углекислом газе короткой дугой плавящимся электродом получил широкое промышленное применение благодаря таким технологическим преимуществам, как малое разбрызгивание и возможность ведения процесса на низких режимах сварки во всех пространственных положениях. Однако полная реализация технологических преимуществ этого процесса возможна только в узком диапазоне режимов.

Проведен анализ требований к различным стадиям процесса сварки.

При составлении технологического задания на разработку устройства для оптимизации процесса сварки короткой дугой необходимо учитывать эти требования.

Сравним требования к началу процесса и к режиму собственно процесса сварки. Во многом эти требования взаимно противоположны [3].

Так, улучшение начала процесса сварки и связанные с ним потери металла на разбрызгивание и непровары в начале шва требуют уменьшения индуктивности сварочной цепи и повышения напряжения. В этом случае число касаний концов электродной проволоки изделия и ее выбросы уменьшаются, разрывная длина дуги увеличивается, а потери времени и электродной проволоки при зажигании дуги уменьшаются.

Для улучшения технологических характеристик собственно сварочного процесса с частыми короткими замыканиями дугового промежутка требуется сравнительно низкое напряжение сварочного выпрямителя. В сварочной цепи необходима определенная индуктивность для уменьшения разбрызгивания металла.

В индуктивности источника питания происходит накопление энергии при переходе капли жидкого металла в момент короткого замыкания электрода с изделием, а после разрыва перемычки и возбуждения дуги ее выделение в дуге. Мощность, необходимая для плавления электрода со скоростью его подачи, складывается из мощности сварочного выпрямителя и мощности, отдаваемой индуктивностью сварочного дросселя в момент разрыва перемычки. Введение в сварочную цепь индуктивности при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка энергетически необходимо.

Таким образом, для оптимизации процесса сварки короткой дугой необходимо преодолеть противоречивость требований к процессу начального зажигания дуги и собственно сварочному процессу начального зажигания дуги и собственно сварочному процессу с короткими замыканиями дугового промежутка.

Другим важным различием в требованиях к 1-й и 2-й стадиям процесса является то, что 2-й стадии необходимо в процессе сварки обеспечить минимальное отклонение от заданных параметров режима, например, требуемое напряжение дуги из технологических соображений необходимо поддерживать постоянным с точностью $\pm 0,5$ В.

Примером реализации такой стабилизации процесса сварки короткой дугой является сварка труб на автоматах 0Б-1227 М сварочными головками А-1167, позволившая снизить разбрызгивание, повысить надежность начального зажигания дуги и уменьшить количество подварок, выполняемых ручной дуговой сваркой для исправления дефектов. Преимущества такого решения в простоте одновременной оптимизации процесса зажигания дуги и процесса сварки без применения каких-либо устройств для управления процессов сварки [4].

Рассмотрим различия в требованиях между 1-й, 2-й и 3-й стадиями процесса сварки.

В процессах сварки короткой дугой 3-я стадия процесса может осуществляться двумя путями. Первый путь – окончание сварки на режимах 2-й стадии. Вторым путем – окончание сварки при программировании режима для заварки кратера в конце шва. Обычно программирование режима производят на токах, превышающих 200 А.

В первом случае параметры режима окончания процесса сварки такие же, как параметры собственно сварочного процесса.

Во втором случае параметры режима окончания процесса сварки отличаются от параметров собственно сварочного процесса.

Как в первом, так и во втором случае параметры режима 3-й стадии, т.е. окончания процесса сварки, должны «помогать» оптимизировать процесс на 1-й стадии процесса сварки путем формирования капли малых размеров на конце электрода в предыдущем процессе сварки для оптимизации зажигания дуги при последующем процессе сварки.

Анализ технологических характеристик процесса сварки тонкими электродными проволоками

Зависимость глубины проплавления от тока

Было установлено, что с увеличением тока глубина проплавления возрастает. Глубина проплавления основного металла с уменьшением диаметра электрода увеличивается ввиду увеличения плотности тока. Таким образом, для получения одинаковой глубины проплавления при более тонкой проволоке требуется меньшая плотность тока.

При сварке в стык с глубоким проплавлением необходимо применение электродной проволоки больших диаметров.

Таким образом наибольшую глубину проплавления получают при сварке короткой дугой. Однако при короткой дуге шов получается узким и высоким.

Рекомендуемые напряжения в зависимости от тока

При выборе оптимальных напряжений следует руководствоваться минимальным разбрызгиванием при оптимальной форме шва.

С увеличением тока напряжение возрастает и каждому диаметру электрода соответствует оптимальное напряжение.

При одинаковых токах меньшим диаметрам электродов соответствуют более высокие напряжения.

В табл. 1 приведены минимальные токи при стабильном процессе при скорости сварки 30 м/ч.

Рекомендуемые напряжения в зависимости от тока характеризуют 2-ю стадию, т.е. собственно процесс сварки, однако необходимо учитывать при этом характер протекания 1-й стадии, т.е. начальное зажигание дуги.

Опытами установлено, что начальное зажигание дуги при последующем стабильном ее горении при $d_s = 1,0$ мм на токе 220 А от аккумуляторной батареи при напряжении дуги 16 В происходит после пятого соприкосновения электрода с изделием, а при напряжении 24 В и выше – дуга зажигается после второго соприкосновения.

Зависимость массы расплавленной электродной проволоки от тока

В табл. 2 приведены значения сварочного тока и соответствующие им скорости плавления электродной проволоки различных диаметров. Скорость плавления электродной проволоки – важная характеристика, которая определяет производительность процесса сварки и параметры привода механизма подачи [5].

Таблица 1

Минимальные токи при стабильном процессе при скорости сварки 30 м/ч

Диаметр электрода, d_s , мм	Сварочный ток, I , А	Плотность тока, А/мм ²
0,5	30	153
0,8	50	100
1,0	80	102
1,2	120	106

Таблица 2

Сварочные токи и соответствующие им скорости плавления электродной проволоки различных диаметров

Диаметр электрода, d_s , мм	Сварочный ток, I , А	Скорость плавления, м/мин
0,8	50–180	3,2–15,2
1,0	80–215	3,3–14,2
1,2	120–350	3,3–12,9

Системы управления плавлением и переносом металла

Целью создания систем управления сваркой (наплавкой) короткой дугой является улучшение формирования сварного шва, уменьшение разбрызгивания металла со снижением сварочного тока.

Особенности этих систем следующие: во-первых, осуществляется воздействие на процесс в виде импульсов напряжения и тока, а во-вторых, эти системы снабжены различными приборами для контроля управления воздействия на сварочную дугу в определенный момент времени [6].

Для оптимизации процесса сварки короткой дугой по функциональному назначению применяют:

- устройство импульсно-дуговой сварки на малых режимах тонколистового металла в углекислом газе;
- устройство для сварки на средних режимах с принудительным переносом металла;
- устройство для сварки с подачей импульса во время короткого замыкания;
- устройство сварки с уменьшением мощности дуги в начальный момент ее возбуждения;
- устройство стабилизации переноса металла во время короткого замыкания с ограничением энергии взрыва перемычки;
- системы управления с обратными связями и постоянным временем цикла.

Выбор управляющей системы управления процессом сварки короткой дугой определяется в каждом конкретном случае отдельно.

Заключение

Для снижения разбрызгивания, расширения диапазона режимов, повышения стабильности процесса, уменьшения проплавления способности дуги для сварки металла малых толщин разработано большое количество разнообразных способов и устройств, направленных на совершенствование процесса сварки короткой дугой. Применение той или иной системы управления процессом должно быть определено в каждом конкретном случае, так как использование сложных систем управления не всегда оправдано.

В связи с тем, что при исследовании путей рационального решения оптимизации процесса сварки в углекислом газе короткой дугой необходимо учитывать тепловые, механические, электрические возмущения и другие воздействия на процесс, связанные со спецификой конкретных производственных условий, технологическими требованиями к изделию и имеющимся сварочным оборудованием, целесообразно выделить общие вопросы оптимизации процесса сварки, которые должны использоваться при составлении технического задания на разработку устройства:

- выбрать способ начального зажигания дуги;
- обосновать возможность применения оптимальных режимов сварки короткой дугой и электрических параметров сварочной дуги. При этом общие потери металла на угар и разбрызгивание могут уменьшаться до 4–6 % без применения специальных систем управления процессом;
- рассмотреть целесообразность применения системы управления процессом сварки;
- рассмотреть требования к различным стадиям процесса сварки: к началу процесса и режиму сварки, к режиму сварки и окончанию процесса сварки, к окончанию процесса (заварка кратера) и формированию капли на конце электрода.

Список литературы

- 1 Металлургические особенности влияния кремния на свойства металла при сварке под флюсом нержавеющих сталей аустенитного класса / Ю. С. Волобуев, Ю. В. Бобриков, С. Ю. Волобуев [и др.] // Сварочное производство. – 2022. – № 6. – С. 5–12. – DOI 10.34641/SP.2022.1051.6.038.
- 2 Копировальные системы управления наплавкой под флюсом : монография / Н. Г. Дюргеров, И. С. Морозкин, Г. В. Даровской, К. В. Шеховцов ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2018. – 77 с. – ISBN 978-5-88814-802-0.
- 3 Оценка стабильности геометрии шва при импульсных способах дуговой сварки / Н. Г. Дюргеров, Г. В. Даровской, К. В. Шеховцов, Л. А. Кармазина // Вестник Ростовского государственного

References

- 1 Metallurgical features of the effect of silicon on the properties of the metal during submerged arc welding of austenitic stainless steels / Yu. S. Volobuev, Yu. V. Bobrikov, S. Yu. Volobuev [et al.] // Welding Production. – 2022. – No. 6. – P. 5–12. – DOI 10.34641/SP.2022.1051.6.038.
- 2 Copier control systems for submerged arc surfacing : monograph / N. G. Dyurgerov, I. S. Morozkin, G. V. Darovskoy, K. V. Shekhovtsov // Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don : RSTU, 2018. – 77 p. – ISBN 978-5-88814-802-0.
- 3 Estimation of weld geometry stability in pulsed arc welding / N. G. Dyurgerov, G. V. Darovskoy, K. V. Shekhovtsov, L. A. Karmazina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta

университета путей сообщения. – 2018. – № 1 (69). – С. 8–11. – ISSN 0201-727X.

4 Настройка систем саморегулирования сварочной дуги / Н. Г. Дюргеров, Ю. В. Бобриков, Г. В. Даровской, К. В. Шеховцов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (74). – С. 22–28. – ISSN 0201-727X.

5 **Dyurgerov, N. G.** Integral self-regulation in arc welding processes / N. G. Dyurgerov, I. S. Morozkin, V. A. Lenivkin // *Welding International*. – 2017. – Vol. 31. – No. 9. – P. 713–716. – DOI 10.1080/09507116.2017.1315072.

6 **Ленивкин, В. А.** Зажигание сварочной дуги с помощью низковольтного импульсного разряда / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргеров, И. С. Морозкин // Сварка и диагностика. – 2016. – № 2. – С. 49–51. – ISSN 2071-5234.

7 Керамические флюсы для сварки и наплавки и опыт их применения в машиностроении и энергомашиностроении / О. С. Волобуев, К. А. Денисов, С. Ю. Волобуев [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2019. – № 11–12. – С. 29–34. – ISSN 1024-7106.

8 **Бобриков, Ю. В.** Новые принципы оптимизации химического состава электродного покрытия для сварки углеродистых сталей / Ю. В. Бобриков, С. Ю. Волобуев, Ю. С. Волобуев // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 6. – С. 11–15. – ISSN 1024-7106.

Putey Soobshcheniya. – 2018. – No. 1 (69). – P. 8–11. – ISSN 0201-727X.

4 Setting up welding arc self-regulation systems / N. G. Dyurgerov, Yu. V. Bobrikov, G. V. Darovskoy, K. V. Shekhovtsov // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2019. – No. 2 (74). – P. 22–28. – ISSN 0201-727X.

5 **Dyurgerov, N. G.** Integral self-regulation in arc welding processes / N. G. Dyurgerov, I. S. Morozkin, V. A. Lenivkin // *Welding International*. – 2017. – Vol. 31. – No. 9. – P. 713–716. – DOI 10.1080/09507116.2017.1315072.

6 **Lenivkin, V. A.** Ignition of a welding arc using a low-voltage pulsed discharge / V. A. Lenivkin, N. G. Dyurgerov, I. S. Morozkin // *Welding and diagnostics*. – 2016. – No. 2. – P. 49–51. – ISSN 2071-5234.

7 Ceramic fluxes for welding and surfacing and experience of their application in mechanical engineering and power engineering / O. S. Volobuev, K. A. Denisov, S. Yu. Volobuev [et al.] // *Heavy Engineering*. – 2019. – No. 11–12. – P. 29–34. – ISSN 1024-7106.

8 **Bobrikov, Yu. V.** New principles of optimizing the chemical composition of the electrode coating for welding carbon steels / Yu. V. Bobrikov, S. Yu. Volobuev, Yu. S. Volobuev // *Heavy Engineering*. – 2017. – No. 6. – P. 11–15. – ISSN 1024-7106.

I. S. Morozkin, G. V. Darovskoy

OPTIMIZATION OF SHORT ARC WELDING PROCESS DURING REPAIR OF RAILWAY ROLLING STOCK

Abstract. The operation of the arc ignition circuit at the welding and the formation start stages of small droplets has been optimized in order to increase the productivity and quality of the rolling stock parts repairing. The paper presents an analysis of the technological characteristics of long and short arc welding processes, control systems for melting and metal transfer. It is established the mutual influence of various process stages. It was experimentally proved that the depth of base metal penetration increased with decreasing electrode diameter due to widening in current density. Melting and metal transfer control systems are presented to optimize the short arc welding process. Materials on control systems are summarized and recommendations for optimizing the welding process are given.

Keywords: welding arc, short circuit, melting electrode, short arc welding, process optimization.

For citation: Morozkin, I. S. Optimization of short arc welding process during repair of railway rolling stock / I. S. Morozkin, G. V. Darovskoy // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2024. – No. 2. – P. 181–187. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_181.

Сведения об авторах

Морозкин Игорь Сергеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Технология металлов»,

Information about the authors

Morozkin Igor Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Metal Technology», Doctor of Engineering Sciences, Professor,

доктор технических наук, профессор,

e-mail: mis_tm@mail.ru

Даровской Геннадий Викторович

Ростовский государственный университет

путей сообщения (РГУПС),

кафедра «Технология металлов»,

кандидат технических наук, доцент,

e-mail: graffdarovskoi@yandex.ru

e-mail: mis_tm@mail.ru

Darovskoy Gennadiy Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU),

Chair «Metal Technology»,

Candidate of Engineering Sciences,

Associate Professor,

e-mail: graffdarovskoi@yandex.ru

В. Н. Поляков

ПАРАМЕТРЫ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ

Аннотация. Рассмотрен расчет определения параметров эксцентриситета подшипника скольжения, основанный на определении угловых координат в материально-агрегатной модели, испытываемой на машине трения ИИ5018. Анализ полученных данных позволяет установить уточненное положение эксцентриситета и среднего положения толщины слоя смазочного материала h_0 , а также определить значения и положения минимальной толщины пленки h_{\min} в контактной области сопрягаемых тел, не используя приблизительные или задаваемые значения угловой координаты эксцентриситета, тем самым повысить точность исследований в области трения. Представлены результаты параметров эксцентриситета с расчетными табулированными в виде сравнительных табличных значениях.

Ключевые слова: подшипник скольжения, машина трения, жидкостное трение, угловая координата, эксцентриситет, толщина смазочного слоя.

Для цитирования: Поляков, В. Н. Параметры эксцентриситета гидродинамического подшипника скольжения / В. Н. Поляков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 188–193. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_188.

Введение

Подшипники скольжения являются обязательными элементами практически любого агрегата современной машины. Следует отметить, что причиной выхода из строя эксплуатируемой машины в 90 % случаев является отказ работоспособности подшипника [1, 2]. Это позволяет считать высоко актуальными все вопросы, связанные с инженерным проектированием, технологией изготовления и эксплуатацией трибосистем.

Настоящая работа посвящена повышению точности инженерных расчетов радиальных подшипников скольжения, работающих в гидродинамическом режиме смазывания при ламинарном потоке жидкого смазочного материала.

В настоящее время методика расчетов стандартизирована [3, 4]. В процессе выполнения расчетов используется целый ряд допущений, которые упрощают расчет, но снижают его точность. К такому параметру относится в первую очередь угловая координата эксцентриситета вала относительно направления нагрузочной характеристики, величина эксцентриситета и толщина смазочного слоя.

Теоретические исследования

Основными эксплуатационными характеристиками подшипника является несущая способность, износостойкость, потери на трение, а также размерные параметры [1, 2, 5]. Эти данные должны быть определены при проектировании на основе расчетных моделей. Исходными элементами расчета является толщина смазочного слоя. Как известно, теоретически минимальную толщину смазочного слоя принято определять через абсолютные или через относительные величины:

$$h_{\min} = \frac{\Delta}{2} - e = r_1 \cdot \psi (1 - \varepsilon), \quad (1)$$

где $\psi = \frac{r_1 - r}{r_1}$ – относительный зазор;

$$\varepsilon = \frac{e}{\Delta/2} = 1 - \frac{h_{\min}}{\Delta/2} \text{ – относительный эксцентриситет;}$$

$$r_1 - r = \frac{\Delta}{2} \text{ – радиальный зазор.}$$

Выражение для определения абсолютной величины эксцентриситета имеет вид:

$$e = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}, \quad (2)$$

где $x_0 = r \sin \beta$ – смещение центра втулки по оси x ; r – радиус вала; β – угловая координата положения эксцентриситета;

$y_0 = r + h_0 - r_1 \cos \beta$ – смещение центра втулки по оси y ;

$r_1 = r + \frac{\Delta}{2}$ – радиус втулки, где Δ – величина диаметрального зазора.

В стандартизированном расчете используется только относительная величина эксцентриситета в виде диапазона величин при заданном положении вала относительно направления нагрузки. Кроме того, численно задана таблица с угловой координатой β , что требует интерполяции для вычисления промежуточных значений параметров [4].

В эксплуатационной практике величина и угловая координата эксцентриситета зависит от нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации подшипника. Повышение точности расчетов может быть выполнено на основе учета связи коэффициента трения смазочного материала в применяемых нагрузочно-скоростных режимах при угловой координате эксцентриситета вала относительно направления нагрузки.

Эта материально-агрегатная модель (рисунок) реализуется на испытательной машине трения ИИ 5018 в виде частичного вкладыша (колодки, втулки) и вала [6, 7]. Вал вращается против часовой стрелки с угловой скоростью ω . На втулку действует внешняя сила F .

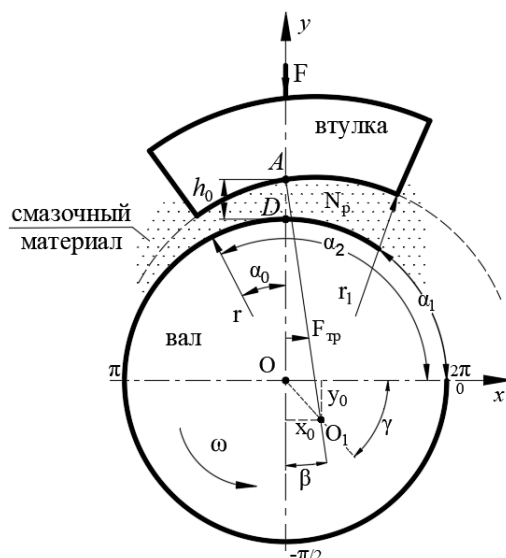


Схема параметров трибологической модели «вал-втулка»:

F – нагрузка; $F_{тр}$ – сила трения; ω – скорость вала; h_0 – толщина смазочной пленки в контакте;

α_0 – половина длины дуги контакта; α_1 – угол, определяющий начало границы нагружения;

α_2 – угол, определяющий конец границы нагружения;

γ – угол, определяющий зону нагружения колодки;

r – профиль вала; r_1 – профиль втулки; β – угловая координата положения эксцентриситета;

N_p – подъемная сила смазочного клина; $\angle OAO_1 = \beta$ – угловая координата эксцентриситета;

α_0 – длина дуги половины контакта

В результате присутствия жидкого смазочного материала в зазоре с начальным значением толщины смазочного слоя $AD = h_0$ и $\omega > 0$ в контакте появляется гидродинамическое давление, которое приводит к смещению центра втулки O_1 относительно центра вала O , определяемое эксцентриситетом e .

Определим положение угловой координаты эксцентриситета с помощью реакции гидродинамического давления на вал и на втулку подшипника скольжения относительно направления нагрузки, связанной с коэффициентом жидкостного трения смазочного материала.

Для этого найдем подъемную силу смазочного клина [8], действующую в контактной зоне:

$$N_p = N - N_0, \quad (3)$$

где N – сила реакции на область трения вала; N_0 – сила реакции на область трения втулки.

Силу реакции на область трения вала найдем по формуле:

$$N = P_{\max} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot s, \quad (4)$$

где P_{\max} – максимальное давление в области контакта сопрягаемых тел; s – ширина контактной поверхности.

Также найдем и силу реакции на область трения втулки по формуле:

$$N_0 = P_{\max} \cdot (l_2 - l_1) \cdot s. \quad (5)$$

Для учета жидкостного трения доказано, что всегда имеет место совместно реализуемое граничное и смешанное трение [9], учитывая это, запишем выражение для сил реакции как:

$$Nf_{\text{см}} = N_0f_0 - N_p f_{\text{жид}}, \quad (6)$$

где $f_{\text{см}}$ – коэффициент смешанного трения; f_0 – коэффициент граничного трения; $f_{\text{жид}}$ – коэффициент жидкостного трения.

Если P_{\max} – максимальное внешнее давление на контакт, то силу трения можно вычислить по формуле:

$$F_{\text{см}} = Nf_{\text{см}} = P_{\max} A, \quad (7)$$

где $A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot s$ – площадь смачиваемой поверхности вала.

$$F_{\text{гран}} = N_0f_0 = P_{\max} A_1, \quad (8)$$

где $A_1 = l \cdot s$ – площадь смачиваемой поверхности втулки; l – длина дуги контактной поверхности относительно втулки.

Как известно, длина дуги $l = r \cdot \alpha$, где угол α указан в радианах, тогда получим начальное положение входной зоны нагружения α_1 (рисунок):

$$l_1 = \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{a}{r}\right) \right] \cdot r. \quad (9)$$

Конечное положение выходной зоны нагружения α_2 (рисунок):

$$l_2 = \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{a}{r}\right) \right] \cdot r, \quad (10)$$

где a – является длиной дуги контакта проекции втулки на ось x на участке α_0 , тогда:

$$l = l_2 - l_1. \quad (11)$$

Силу жидкостного трения находим по формуле:

$$F_{\text{жид}} = N_p f_{\text{жид}}. \quad (12)$$

Используя формулы (3)–(12), находим коэффициент трения для расчетов:

$$f_{\text{жид}} = \frac{(N_0f_0 - Nf_{\text{см}})}{(N - N_0)}. \quad (13)$$

Равнодействующая всех давлений в контакте направлена по линии, соединяющей их центры (линия эксцентриситета). Эта линия образует с вертикальной осью системы координат, используя формулу (14), угловая координата γ примет вид:

$$\gamma = -\frac{\pi}{2} - \arctg(f_{\text{жид}}), \text{ рад.} \quad (14)$$

Так как коэффициент трения $f_{\text{жид}}$ – это тангенс угла (см. рисунок), таким образом, искомый угол β может быть найден из уравнения:

$$\beta = \frac{y_0}{x_0} = \text{tg}\left(-\frac{\pi}{2} - \arctg(f_{\text{жид}})\right), \text{ рад.} \quad (15)$$

Используя формулы для определения угловых координат (14, 15), подставив полученные выражения в (1, 2), найдем параметры эксцентриситета и толщины смазочной пленки (табл. 1).

Рекомендуемая величина коэффициента трения [9] в зависимости от вклада смешанного трения при превалировании гидродинамического трения не превышает 0,05.

Таблица 1

Теоретические исследования модели

Параметры модели: $r = 0.02$ м; $a = 0.01$ м; $s = 0.01$ м; $\Delta = 100$ мкм; $f_0 = 0.1$; $f_{\text{см}} = 0.05$; $l_1 = 0.020944$ м, $l_2 = 0.041888$ м,												
h_0 , мкм	1	10	20	30	1	10	20	30	1	10	20	30
$f_{\text{жид}}$	0.05				0.04				0.03			
$\beta \cdot 10^{-3}$, °	7.01	5.72	4.29	2.86	5.61	4.58	3.437	2.29	4.21	3.437	2.578	1.718
ε	0.981	0.8	0.6	0.4	0.981	0.8	0.6	0.4	0.98	0.8	0.6	0.4
$f_{\text{жид}}$	0.02				0.01				0.001			
$\beta \cdot 10^{-3}$, °	2.807	2.29	1.718	1.14	1.403	1.145	0.859	0.572	0.14	0.114	0.085	0.057
ε	0.98	0.8	0.6	0.4	0.98	0.8	0.6	0.4	0.98	0.8	0.6	0.4

Новая методика позволила установить, что оперирование относительным эксцентриситетом при расчетах по стандартизированной методике дает разные результаты (табл. 1). При постоянной величине относительного эксцентриситета $\varepsilon = 0,8$ величина угловой координаты эксцентриситета изменяется в диапазоне от $0,114 \cdot 10^{-3}$ до $5,72 \cdot 10^{-3}$ градуса, при изменении коэффициента трения от 0,001 до 0,05.

Данные экспериментальных исследований

Экспериментальная часть трибологических исследований определения угловых координат β и γ , связанных с толщиной смазочного материала, проводилась на машине трения ИИ 5018 по аналогии [6, 7, 10, 11, 12], экспериментальные результаты практических исследований и теоретических расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Трибологические исследования материально-агрегатной модели подшипника скольжения

Экспериментальные данные (I)	Теоретический расчет		Погрешность %		
	Новая методика (II)	по ГОСТ (III)	I–II	I–III	II–III
$h_{\text{min}} = 5.49 \cdot 10^{-6}$, м $P_{\text{max}} = 5 \cdot 10^6$ Па $U = 0.5$ м/с $f_{\text{жид}} = 0.04$ $\beta = 0.0051$ °	$h_{\text{min}} = 5.93 \cdot 10^{-6}$, м $\varepsilon = 0.907$	$h_{\text{min}} = 4.7 \cdot 10^{-6}$, м $\varepsilon = 0.927$	8,01	14,38	20,74

Выводы

На основе анализа разработанной новой методики расчета основных параметров гидродинамического трения в радиальных подшипниках скольжения делаем вывод, что новая методика в сравнении

с экспериментальными данными вносит погрешность 8,01 %, стандартизированная методика в сравнении с экспериментальными данными вносит погрешность 14,38 %. Результаты, рассчитанные по новой методике, обеспечивают уточнение на 20,74 %.

Список литературы

1 Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2 кн. Кн. 2. Т. 66 / под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. – Москва : Машиностроение, 1979. – 358 с.

2 **Мышкин, Н. К.** Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин. – Москва : Физматлит, 2007. – 368 с. – ISBN 978-5-9221-0824-9.

3 **ГОСТ ИСО 7902-1-2001.** Гидродинамические радиальные подшипники скольжения, работающие в стационарном режиме. Круглоцилиндрические подшипники. Часть 1. Метод расчета. Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 19 февраля 2002 г. № 67-ст межгосударственный стандарт введен в действие непосредственно в качестве государственного стандарта Российской Федерации с 1 июля 2002 г.

4 **ГОСТ ИСО 7902-2-2001.** Гидродинамические радиальные подшипники скольжения, работающие в стационарном режиме. Круглоцилиндрические подшипники. Часть 2. Функции, используемые для расчета. Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 19 февраля 2002 г. № 67-ст межгосударственный стандарт введен в действие непосредственно в качестве государственного стандарта Российской Федерации с 1 июля 2002 г.

5 **Горячева, И. Г.** Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – Москва : Наука, 2001. – 478 с. – ISBN 5-02-002567-4.

6 **Кохановский, В. А.** Опорный профиль трибосистем скольжения / В. А. Кохановский, В. Н. Поляков // Вестник машиностроения. – 2021. – № 3. – С. 53–56. – DOI 10.36652/0042-4633-2021-3-53-56.

7 Новая методика исследования трибологических свойств смазываемых пар трения по методу «колодка-ролик» / В. Н. Поляков, И. М. Елманов, Г. В. Даровской [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 8. – С. 40–42. – ISSN 1819-2092.

8 Справочник по триботехнике / под. общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе // В 3 т. Т. 1. Теоретические основы. – Москва : Машиностроение, 1989. – 400 с.

9 **Зоммер, Э. Ф.** Исследование положения шипа во вкладыше стадвадцатиградусного подшипника жидкостного трения при постоянной и зна-

References

1 Friction, wear and lubrication. Directory. In 2 books. Book 2. Vol. 66 / Ed. I. V. Kragelsky and V. V. Alisina. – Moscow : Mechanical Engineering, 1979. – 358 p.

2 **Myshkin, N. K.** Friction, lubrication, wear. Physical foundations and technical applications of tribology / N. K. Myshkin. – Moscow : Fizmatlit, 2007. – 368 p. – ISBN 978-5-9221-0824-9.

3 **GOST ISO 7902-1-2001.** Hydrodynamic radial sleeve bearings operating in stationary mode. Round cylindrical bearings. Part 1. Calculation method. By Decree of the State Committee of the Russian Federation for Standardization and Metrology dated February 19, 2002 No. 67-st, the interstate standard was put into effect directly as a state standard of the Russian Federation on July 1, 2002.

4 **GOST ISO 7902-2-2001.** Hydrodynamic radial sleeve bearings operating in stationary mode. Round cylindrical bearings. Part 2. Functions used for calculation. By Decree of the State Committee of the Russian Federation for Standardization and Metrology dated February 19, 2002 No. 67-st, the interstate standard was put into effect directly as a state standard of the Russian Federation on July 1, 2002.

5 **Goryacheva, I. G.** Mechanics of frictional interaction. – Moscow : Science, 2001. – 478 p. – ISBN 5-02-002567-4.

6 **Kokhanovsky, V. A.** Supporting surface of slipping frictional systems / V. A. Kokhanovsky, V. N. Polyakov // Bulletin of mechanical engineering. – 2021. – No. 3. – P. 53–56. – DOI 10.36652/0042-4633-2021-3-53-56.

7 New methodology for studying the tribological properties of lubricated friction pairs using the “shaft-bush” method / V. N. Polyakov, I. M. Elmanov, G. V. Darovskoy [et al.] // Friction and lubrication in machines and mechanisms. – 2015. – No. 8. – P. 40–42. – ISSN 1819-2092.

8 Handbook of tribological engineering / edited by M. Hebby, A. V. Chichinadze // In 3 volumes. Vol. 1. Theoretical basis. – Moscow : Mechanical Engineering, 1989. – 400 p.

9 **Sommer, E. F.** Study of the position of the spike in the liner of a one hundred twenty-degree fluid friction bearing under constant and alternating loads / E. F. Sommer // Friction and wear in machines,

копеременной нагрузках / Э. Ф. Зоммер // Трение и износ в машинах, сборник 13. – Москва : АН СССР, 1959.

10 **Даровской, Г. В.** Методика измерения толщины смазочной пленки емкостным методом на машинах трения типа «Амслер» / Г. В. Даровской, В. Н. Поляков, А. Н. Опацких // Трибология – машиностроению. Труды XIII Международной научно-технической конференции. – 2020. – С. 100–104. – ISBN 978-5-904282-10-3.

11 **ГОСТ 23.204-78.** Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки истирающей способности поверхностей при трении. Межгосударственный стандарт, № 3283. – Москва, 1980.

12 **РД 50-339-82.** Методические указания. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний на изнашивание абразивно-масляной прослойкой. – № 4659. – Москва, 1982.

collection 13. – Moscow : USSR Academy of Sciences, 1959.

10 **Darovskoy, G. V.** Procedures for measuring thickness of lubricating film using capacitive method on Amsler-type friction machines / G. V. Darovskoy, V. N. Polyakov, A. N. Opatskikh // Tribology – mechanical engineering. Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference. – 2020. – P. 100–104. – ISBN 978-5-904282-10-3.

11 **GOST 23.204-78.** Ensuring wear resistance of products. Method for assessing the abrasive ability of surfaces during friction. Interstate standard, No. 3283. – Moscow, 1980.

12 **RD 50-339-82.** Ensuring wear resistance of products. Test method for wear using an abrasive-oil layer. – No. 4659. – Moscow, 1982.

V. N. Polyakov

ECCENTRICITY PARAMETERS OF HYDRODYNAMIC PLAIN BEARING

Abstract. The paper considers the calculation of determining the eccentricity parameters of the plain bearing based on the determination of angular coordinates in a material-aggregate model tested on an И5018 friction machine. Analysis of the obtained data makes it possible to establish the specified position of the eccentricity and the average position of the thickness of the lubricant layer h_0 , as well as to determine the values and positions of the minimum film thickness h_{\min} in the contact area of the mating bodies without using approximate or specified values of the angular coordinate of the eccentricity, thereby increasing the research accuracy in the field of friction. The results of eccentricity parameters are presented with calculated tabulated values in the form of comparative tabular values.

Keywords: plain bearing, friction machine, fluid friction, angular coordinate, eccentricity, lubricant layer thickness.

For citation: Polyakov, V. N. Eccentricity parameters of hydrodynamic plain bearing / V. N. Polyakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 188–193. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_180.

Сведения об авторах

Поляков Владимир Николаевич
Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
строительный факультет,
инженер,
e-mail : vovapolyakov@mail.ru

Information about the authors

Polyakov Vladimir Nikolaevich
Rostov State Transport University (RSTU),
Faculty of Civil Engineering,
Engineer,
e-mail : vovapolyakov@mail.ru

И. А. Яицков, П. А. Поляков, Е. С. Федотов, Р. С. Тагиев, Р. Н. Дедусенко

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ТОРМОЖЕНИЯ СИЛОВЫХ УСТРОЙСТВ БАРАБАННО-КОЛОДОЧНОГО ТИПА

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования развиваемого тормозного момента тормоза на основе дифференциации тормозных колодок по моменту включения и продолжительности взаимодействия с рабочей поверхностью диска. Исследована взаимосвязь между поперечным перемещением тормозной колодки и развиваемым тормозным моментом силового устройства барабанно-колодочного типа, являющегося двухмассовой колебательной системой (тормозная колодка – прижимающий элемент). На основании стендовых испытаний тормозных устройств барабанно-колодочного типа с разным количеством сегментных тормозных колодок доказан рост силовых факторов и показателей стабильности у силовых устройств с шестью прижимающими элементами относительно серийной конструкции тормоза: коэффициент стабилизации тормозного момента силового устройства с шестью сегментными колодками увеличился на 9,4 % относительно серийного тормозного устройства; коэффициент колебаний тормозного момента силового устройства с шестью сегментными накладками увеличился на 45,1 % относительно серийного тормозного устройства.

Ключевые слова: торможение, сегментные колодки, прижимающий элемент, поперечное перемещение, тормозной момент.

Для цитирования: Обеспечение стабильности торможения силовых устройств барабанно-колодочного типа / И. А. Яицков, П. А. Поляков, Е. С. Федотов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 194–199. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_194.

Введение

Целью исследования [1] являлась оценка точности расчетов и эффективности основанного на искусственной нейронной сети метода важной выборки (*ANN-IS*) надежности конструкций, таких как барабанные тормоза. В данном исследовании использовались два типа *ANN* – нейронная сеть с радиальной базисной функцией (*RBF*) и нейронная сеть обратного распространения (*BP*). Методы *RBF-IS* и *BP-IS* использовались для проведения анализа надежности на обучающих выборках трех различных размеров, и результаты сравнивались с несколькими методами анализа надежности, основанными на *ANN*. Результаты, полученные при использовании метода *RBF-IS*, показали достаточную сходимость с результатами моделирования, выполненного с помощью метода Монте-Карло. Кроме того, метод *RBF-IS* обладал лучшей эффективностью расчетов, чем другие методы, рассмотренные в этом исследовании. В диссертации [2] рассматривались две многомерные модели, в которых величина коэффициента демпфирования, как и местоположение демпфирующих элементов, определены в качестве ключевых факторов стабильности. Кроме того, воспроизводился дестабилизирующий эффект демпфирования задней пластины тормоза, который сравним с действием прокладок. В работах [3, 4] предлагается рассматривать нагружение в паре взаимодействия колодочного тормоза согласно синусоидальному ($q = 1 + k\sin\Theta$) и косинусоидальному ($q = k\cos\Theta$) законам распределения нагрузки по длине колодки. Данная классификация не совсем точно подходит к различным конструктивным схемам устройств барабанно-колодочного типа. Согласно процессам износа, протекающим в период эксплуатации, неравномерность по длине накладки наблюдается во всех без исключения компоновках тормоза. Исследования [5], проводимые опытным путем, показали, что по мере эксплуатации тормозных устройств зоны повышенного износа могут смещаться относительно оси симметрии в сторону набегающей или сбегающей частей колодок. Таким образом, методы проектирования упрощают расчеты параметров узла, заменяя распределенную нагрузку по длинам колодок на сосредоточенные силы и искажая значение тормозного момента. Полученное значение тормозного момента не является средним, – это значение находится в некотором диапазоне. В работе [6] представлено влияние неравномерностей износа по площади колодки фрикционного узла на развиваемый тормозной момент. Полученные значения показали значительные колебания тормозного момента при наличии изменения по площади колодки. В работе [7] приводится методика проектирования тормозных устройств барабанно-колодочного типа на основе методов определения поло-

жения центра давления и структурно-параметрического синтеза. Взаимосвязь между поперечным перемещением тормозной колодки и развиваемым тормозным моментом силового устройства дисково-колодочного типа была рассмотрена в исследовании [8]. Изменение кривых поперечного перемещения колодки показало, что переход перемещения относительно оси абсцисс, представляющей рабочую поверхность диска в стационарном положении, в отрицательную область приводит к максимизации тормозного момента. Тогда как отскоки тормозной колодки от рабочей поверхности диска, попадание значений кривой в положительную область над осью абсцисс приводят к просадке тормозного момента.

Исходя из проанализированных исследований, необходимо рассмотреть влияние поперечных перемещений тормозных колодок на параметры эффективности и стабильности торможения при эксплуатации на тормозных устройствах других типов.

Основная часть

В качестве объекта исследований будет выступать тормозное устройство барабанно-колодочного типа с сегментными тормозными колодками под каждый прижимающий элемент. Отличием его от дисково-колодочного типа с сегментными тормозными колодками является двухмассовая колебательная система, состоящая из вращающихся относительно опор тормозных колодок и прижимающих элементов, встроенных в тела тормозных колодок, совершающих возвратно-поступательные перемещения (рис. 1).

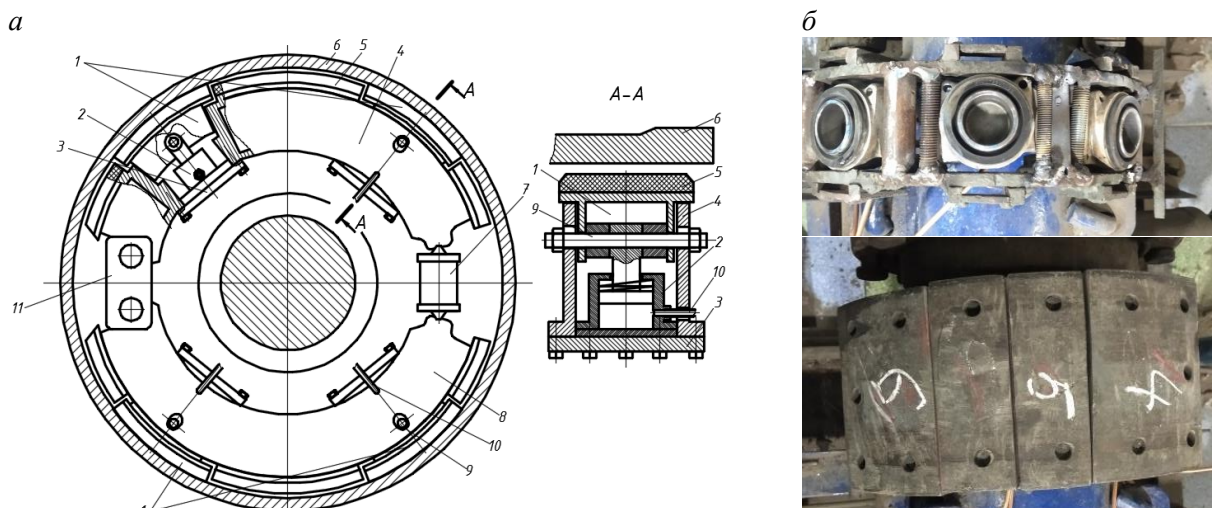


Рис. 1. Тормозное устройство барабанно-колодочного типа с сегментными колодками под каждый прижимающий элемент с гидравлическим приводом:

а – схема; *б* – испытательный образец; 1 – прижимающий элемент; 2 – гидроцилиндр привода прижимающих элементов; 3 – основание; 4 – самоприжимная колодка; 5 – накладка; 6 – обод барабана; 7 – гидроцилиндр привода колодок; 8 – самоотжимная колодка; 9 – ограничитель прижимающего элемента; 10 – трубопровод; 11 – опора колодок

Торможение обеспечивало взаимодействие рабочих поверхностей тормозного барабана *б* с колодками 4 и 8, которые приводятся в движение гидроцилиндром 7. В каждую из колодок встроены прижимающие элементы 1 с индивидуальными накладками 5. Приводом прижимающих элементов являлись гидроцилиндры 2, установленные на основаниях 3. Основания фиксировались в конструкции тормозных колодок с помощью резьбовых соединений. Для предотвращения радиального перемещения прижимающих элементов на каждом из них был установлен ограничитель 9, дающий возможность перемещаться прижимающему элементу параллельно ребрам тормозных колодок 4 и 8. Подача рабочего тела в гидроцилиндры обеспечивалась по трубопроводам 10. Параллельно рабочему гидроцилиндру 7 давление подавалось в гидроцилиндры прижимающих элементов 2.

Для моделирования результирующего тормозного момента были проведены замеры поперечного перемещения одной тормозной колодки и прижимающего элемента, и изменений тормозного момента при кратковременном взаимодействии (до 5 с). В результате наибольшее значение величины тормозного момента достигалось в конце кратковременного режима торможения при перемещении тормозной колодки и прижимающего элемента к поверхности тормозного барабана. Моделируя процессы перемеще-

ния тормозных колодок с индивидуальными прижимающими элементами, получили диаграммы суммарных перемещений силовых устройств барабанно-колодочного типа с четырьмя, пятью и шестью прижимающими элементами при циклическом взаимодействии (рис. 2).

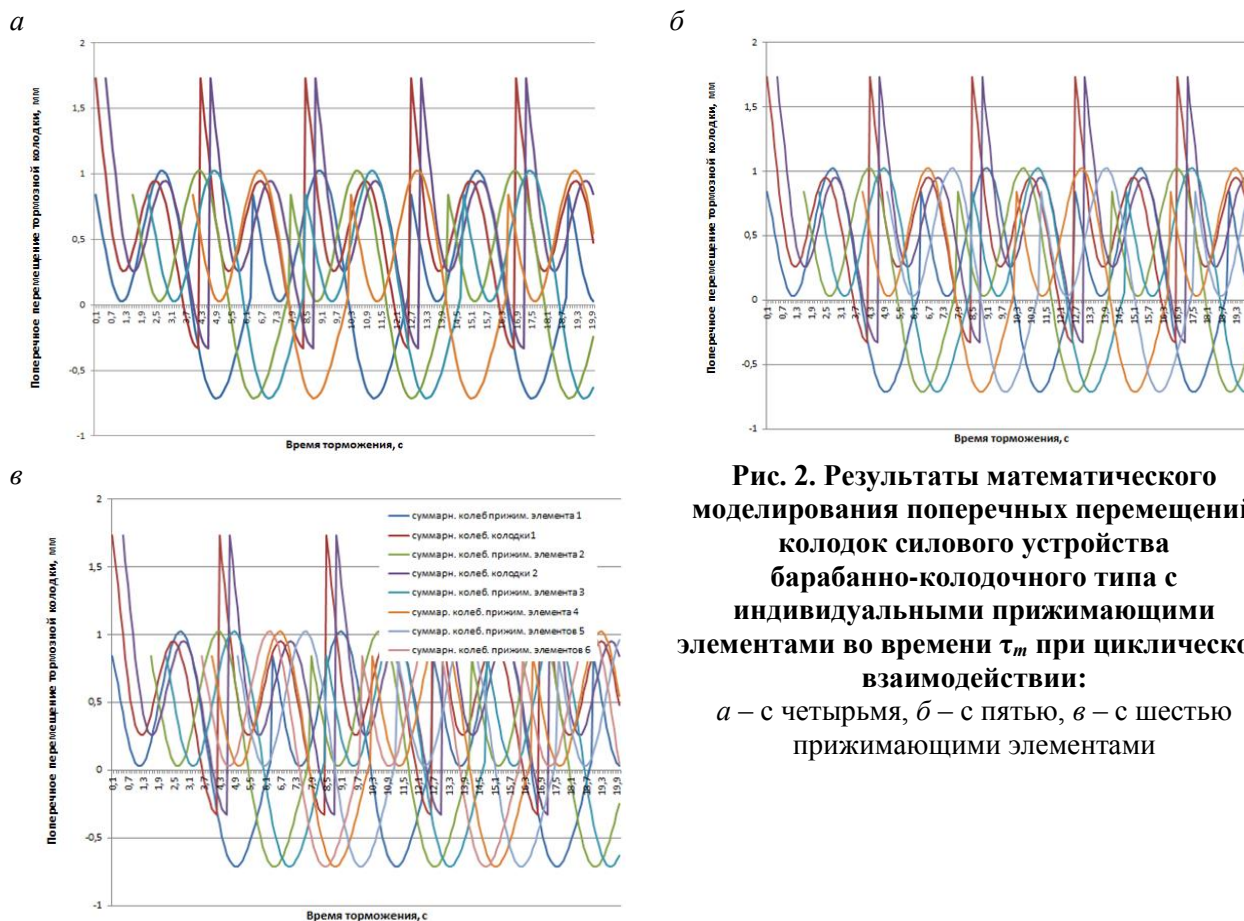


Рис. 2. Результаты математического моделирования поперечных перемещений колодок силового устройства барабанно-колодочного типа с индивидуальными прижимающими элементами во времени τ_m при циклическом взаимодействии:
 а – с четырьмя, б – с пятью, в – с шестью прижимающими элементами

Аналогичным образом были смоделированы кривые тормозного момента при циклическом взаимодействии n -го количества прижимающих элементов в заданной последовательности. В результате были построены диаграммы тормозного момента для каждой из двух тормозных колодок и n -го количества прижимающих элементов во времени торможения, ограниченного диапазоном 20 с. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Контур вершин тормозного момента двух тормозных колодок и n -го количества прижимающих элементов во времени торможения являлся результирующим тормозным моментом, развиваемым силовым устройством барабанно-колодочного типа (рис. 4).

Для оценки параметров стабильности торможения силового устройства, были использованы коэффициенты стабильности K_{CTi} и колебания тормозного момента $K_{КТМi}$. Индекс « i » обозначает количество прижимающих элементов тормоза.

Для апробации были проведены испытания тормозного момента силовых устройств барабанно-колодочного типа с разным количеством прижимающих элементов (рис. 5).

Полученные результаты стендовых испытаний силовых устройств барабанно-колодочного типа с сегментными колодками показали, что наилучшие значения тормозного момента и параметров его стабильности достигались при эксплуатации прижимающего механизма, оснащенного шестью элементами.

Для силового устройства барабанно-колодочного типа с шестью прижимающими элементами увеличение K_{CT} составило 9,4 % в сравнении с серийным устройством; в сравнении с силовым устройством с четырьмя сегментными колодками – 2,9 %; в сравнении силовым устройством с пятью сегментными колодками – 0,32 %. $K_{КТМ}$ силового устройства барабанно-колодочного типа с шестью прижимающими элементами увеличился в сравнении с серийным устройством на 45,1 %; в сравнении силовым устройством с четырьмя сегментными колодками – на 2,3 %; в сравнении с силовым устройством с пятью сегментными колодками – на 2,2 %. Отклонение по K_{CT} в среднем для трех вариантов силовых устройств относительно расчетного метода составило 4,9 %, а по $K_{КТМ}$ – 2,1 %.

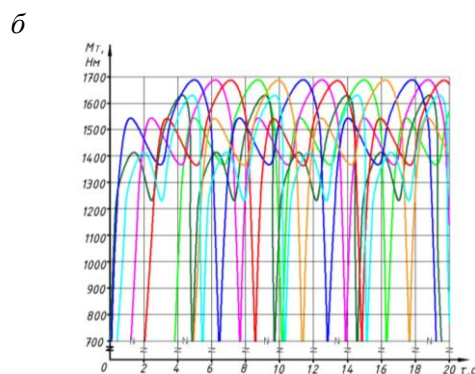
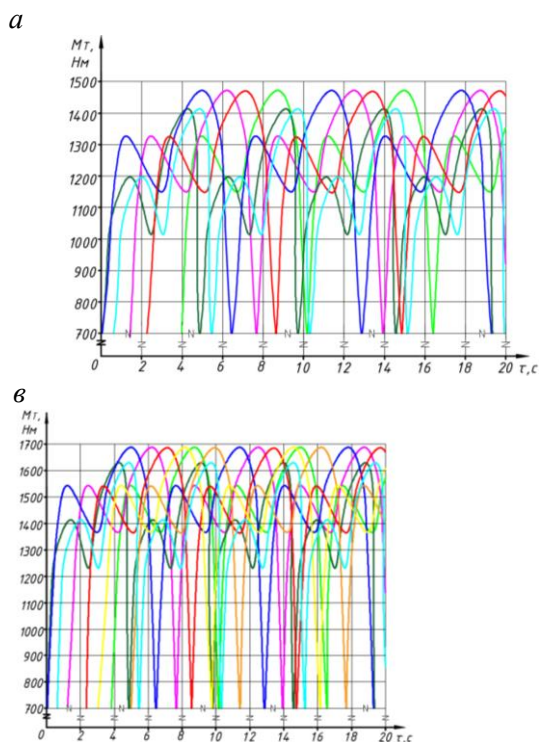


Рис. 3. Моделируемые диаграммы тормозного момента силовых устройств барабанно-колодочного типа во времени τ при циклическом взаимодействии: а – с четырьмя, б – с пятью, в – с шестью прижимающими элементами

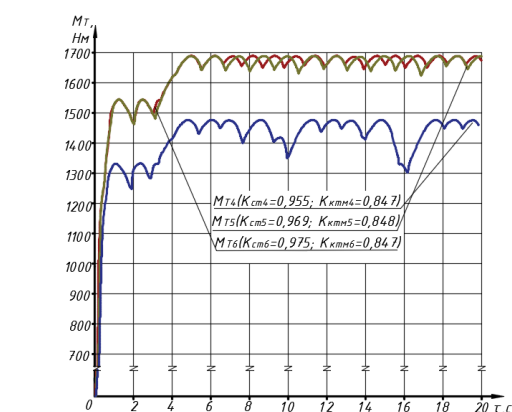


Рис. 4. Моделируемые диаграммы результирующего тормозного момента силовых устройств барабанно-колодочного типа во времени τ при циклическом взаимодействии:

а – с четырьмя, б – с пятью, в – с шестью прижимающими элементами

Заключение

На основе взаимосвязи перемещений колодок и тормозного момента был предложен способ обеспечения стабильности торможения двухмассовой системы на примере тормозных устройств барабанно-колодочного типа с различным количеством прижимающих элементов и сегментных тормозных колодок. На основе концепции тормозных устройств с сегментными тормозными колодками были построены диаграммы результирующего тормозного момента для тормозных устройств барабанно-колодочного типа с четырьмя, пятью и шестью прижимающими элементами, последние показали наилучшие характеристики стабильности и эффективности в сравнении с другими аналогами тормозных устройств. На основании стендовых испытаний тормозных устройств барабанно-колодочного типа с разным количеством сегментных тормозных колодок доказан рост силовых факторов и показателей стабильности у силовых устройств с шестью прижимающими элементами относительно серийной конструкции тормоза:

– коэффициент стабилизации тормозного момента силового устройства с шестью сегментными колодками увеличился на 9,4 % относительно серийного тормозного устройства;

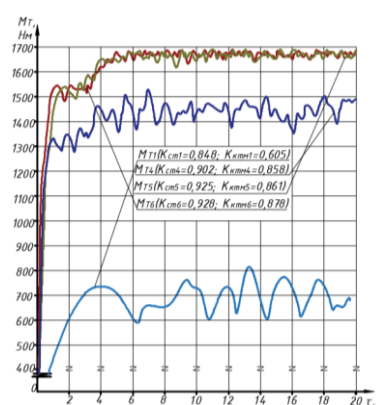


Рис. 5. Диаграммы развиваемого тормозного момента силовых устройств с сегментными колодками в зависимости от количества прижимающих элементов и серийных устройств барабанно-колодочного типа

– коэффициент колебаний тормозного момента силового устройства с шестью сегментными накладками увеличился на 45,1 % относительно серийного тормозного устройства.

Список литературы

1 **Yang, Z.** Vibration reliability analysis of drum brake using the artificial neural network and important sampling method / Z. Yang, U. Pak, C. Kwon // Complexity. – 2021. – 14 p. – DOI 10.1155/2021/5517634.

2 **Jekel, D.** Optimization of Damping in Self-Excited Mechanical Systems : dissertation of the Doctor of Engineering Sciences. – Darmstadt, 2018. – 140 p.

3 Барабанно-колодочные тормозные устройства : монография. Т. 1. / А. А. Петрик [и др.]. – Краснодар : КубГТУ, 2006. – 264 с. – ISBN 5-8339-0257-9.

4 **Велизаде, Э. С.** Оптимальное проектирование фрикционной пары тормозного механизма с равномерным давлением / Э. С. Велизаде // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2020. – № 3 (45). – С. 80–88.

5 **Пятаков, В. Г.** Исследование влияния радиального биения барабана на работу автомобильного колодочного тормоза : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пятаков Владимир Георгиевич. – Омск, 1974. – 154 с.

6 **Поляков, П. А.** Влияние амплитуд поперечных перемещений тормозных колодок на развиваемый дисково-колодочным тормозом тормозной момент / П. А. Поляков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (87). – С. 55–63. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_55.

7 **Поляков, П. А.** Методика проектирования тормозного механизма барабанно-колодочного типа / П. А. Поляков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 8. – С. 334–342. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-8-334-343.

8 **Поляков, П. А.** Разработка способа обеспечения стабильности процесса торможения путем совершенствования конструкции тормозных механизмов / П. А. Поляков // iPolytech Journal. – 2023. – Т. 27, № 4. – С. 682–693. – DOI 10.21285/1814-3520-2023-4-682-693.

References

1 **Yang, Z.** Vibration reliability analysis of drum brake using the artificial neural network and important sampling method / Z. Yang, U. Pak, C. Kwon // Complexity. – 2021. – 14 p. – DOI 10.1155/2021/5517634.

2 **Jekel, D.** Optimization of Damping in Self-Excited Mechanical Systems : dissertation of the Doctor of Engineering Sciences. – Darmstadt, 2018. – 140 p.

3 Drum-pad brake devices : monograph. Vol. 1. / A. A. Petrik [et al.]. – Krasnodar : KubSTU, 2006. – 264 p. – ISBN 5-8339-0257-9.

4 **Velizade, E. S.** Optimal design of a friction pair of a brake mechanism with uniform pressure / E. S. Velizade // I. Ya. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University Bulletin. – 2020. – No. 3 (45). – P. 80–88.

5 **Pyatakov, V. G.** Investigation of the effect of radial drum beating on the operation of an automobile shoe brake : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Pyatakov Vladimir Georgievich. – Omsk, 1974. – 154 p.

6 **Polyakov, P. A.** The influence of the amplitudes of transverse movements of brake pads on the braking torque developed by a disc brake / P. A. Polyakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 3 (87). – P. 55–63. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_55.

7 **Polyakov, P. A.** Method of designing a drum-and-pad type brake mechanism / P. A. Polyakov // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. – 2022. – No. 8. – P. 334–342. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-8-334-343.

8 **Polyakov, P. A.** Determination of the position of the pressure center in the system “clamping element – brake pad – brake disc” / P. A. Polyakov // iPolytech Journal. – 2023. – Vol. 27, No. 4. – P. 682–693. – DOI 10.21285/1814-3520-2023-4-682-693.

I. A. Yaitsov, P. A. Polyakov, E. S. Fedotov, R. S. Tagiev, R. N. Dedusenko

ENSURING THE STABILITY OF BRAKING POWER DEVICES DRUM AND SHOE TYPE

Abstract. The paper presents the results of modeling the developed braking torque of the brake based on the differentiation of brake pads by the moment of activation and the duration of interaction with the disc working surface. The relationship between the transverse movement of the brake pad and the developed braking torque of a drum-and-pad type power device, which is a two-mass oscillatory system (brake pad is a clamping element), is investigated.

Based on bench tests of drum-and-pad type braking devices with a different number of segment brake pads, an increase in power factors and stability indicators for power devices with six clamping elements relative to the serial brake design was proved: the coefficient of stabilization of the braking torque of a power device with six segment pads increased by 9.4 % relative to the serial brake device; the coefficient of vibration of the braking torque of the power device with six segment pads increased by 45.1 % relative to the serial braking device.

Keywords: braking, segment pads, clamping element, transverse displacement, braking torque.

For citation: Ensuring the stability of braking power devices drum and shoe type / I. A. Yaitskov, P. A. Polyakov, E. S. Fedotov [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 194–199. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_2_194.

Сведения об авторах

Яицков Иван Анатольевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
декан электромеханического факультета,
e-mail: yia@rgups.ru

Поляков Павел Александрович

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),
кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Федотов Евгений Сергеевич

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),
кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы»,
старший преподаватель,
e-mail: avtoru2009@mail.ru

Тагиев Руслан Суфудинович

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),
кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы»,
аспирант,
e-mail: usytagiev@mail.ru

Дедусенко Роман Николаевич

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),
кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы»,
магистрант,
e-mail: roma.dedusenko@mail.ru

Information about the authors

Yaitskov Ivan Anatolievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Car and Car Facilities»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Dean of the Electromechanical Faculty,
e-mail: yia@rgups.ru

Polyakov Pavel Alexandrovich

Kuban State Technological University (KubSTU),
Chair «Transport Processes and Technological Complexes»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Fedotov Evgeny Sergeevich

Kuban State Technological University (KubSTU),
Chair «Transport Processes and Technological Complexes»,
Senior Lecturer,
e-mail: avtoru2009@mail.ru

Tagiev Ruslan Sufudinovich

Kuban State Technological University (KubSTU),
Chair «Transport Processes and Technological Complexes»,
Postgraduate Student,
e-mail: usytagiev@mail.ru

Dedusenko Roman Nikolayevich

Kuban State Technological University (KubSTU),
Chair «Transport Processes and Technological Complexes»,
Master`s Degree Student,
e-mail: roma.dedusenko@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК РГУПС»

1 **Материалы статей** представляют в виде текстов, отформатированных и распечатанных на лазерном или струйном принтере (пригодных для сканирования) на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) в одном экземпляре. Рекомендуемый объем статьи – 5–15 страниц.

Одновременно представляют электронную версию статьи, выполненной в текстовом редакторе Word for Windows, шрифт Times New Roman, 11 pt, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание по ширине, абзацный отступ – 1,25 см, все поля – 2 см.

2 На первой странице должны быть указаны:

- **УДК** – в левом верхнем углу;
- интервал;
- **инициалы и фамилии авторов** – по центру, курсивом;
- интервал;
- **название статьи** – заглавными буквами, полужирным шрифтом, по центру, без переносов;
- интервал;
- **аннотация** (80–150 слов);
- **ключевые слова** (5–10 слов);
- интервал;
- **текст статьи** – печатается с переносами.
- интервал;
- **список литературы** на русском и английском языках (не менее 10 источников).

3 **Статья** должна содержать вводную часть, цель научной разработки, основную часть и выводы. Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и готов для макетирования и верстки журнала на компьютере.

4 **Буквы** латинского алфавита набирают курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max и т.д. набирают прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

5 **Формулы.** Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

6 **Рисунки и фотографии**, выполненные четко и контрастно в формате *.tif, *.jpg, *.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подрисовочная подпись обязательны.

7 **Таблицы** следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

8 **Список литературы** приводят общим списком в конце статьи и составляют в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначают арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно.

Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

9 **Материалы, прилагаемые к статье**, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):

- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Ученая степень, ученое звание, должность.
- E-mail.
- Аннотация (краткое содержание статьи, включающее 3–4 предложения).
- Ключевые слова.

Условия и порядок публикации статей в журнале

- 1** Статья должна быть оформлена по прилагаемым требованиям.
- 2** Автор имеет право опубликовать в номере одну статью.
- 3** Автор может прислать статью в адрес редакции:
 - по почте;
 - по электронной почте;
 - принести в редакцию и передать ответственному секретарю (гл. корпус, ком. Д 107).
- 4** Статья, представляемая в редакцию, должна соответствовать тематике издания.

Тематика журнала охватывает основные проблемы транспорта, а также энергетики, машиностроения и управления. Публикуются статьи по следующим секциям:

- машиностроение;
- подвижной состав, безопасность движения и экология;
- информационные технологии, автоматика и телекоммуникации;
- управление и логистика на транспорте;
- железнодорожный путь и транспортное строительство;
- транспортная энергетика;
- моделирование систем и процессов.

5 Редакционная коллегия принимает для публикации статьи после тщательной научной экспертизы.

Для публикации отбирают статьи, которые представляют научный интерес и являются новой ступенью в разработке данной проблемы. Статьи публицистического плана не принимаются.

6 На заседании редколлегии принимают решение о возможности публикации статьи только при наличии положительной рецензии.

7 Все расходы по подготовке к публикации и изданию журнала оплачивает университет, в том числе и почтовые расходы при пересылке журнала авторам.

Краткая информация о журнале

Научно-технический журнал «Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения» («Вестник РГУПС») зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г. Журнал имеет международный стандартный сериальный номер (ISSN 0201-727X), присвоенный Книжной палатой Российской Федерации.

Учредителем и издателем является Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Главный редактор журнала – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В. И. Колесников.

В состав редакционной коллегии входят ведущие ученые РГУПС, а также других транспортных и академических университетов Северо-Кавказского региона, Москвы, Санкт-Петербурга, Республики Беларусь, Чешской Республики, Польши, Франции.

Журнал выходит с периодичностью 4 номера в год, т.е. каждый квартал.

С апреля 2004 года «Вестник РГУПС» включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук» (решение Президиума ВАК № 6/4 от 06.02.2004 г.). Журнал вошел во все последующие редакции Перечня.

«Вестник РГУПС» – подписное издание. С 2004 года журнал был включен в каталог подписных изданий агентства «Роспечать». Также включен в каталог подписных изданий Объединённого каталога «Пресса России» (www.pressa-rg.ru под индексом 53720).

Подписаться на журнал можно через агентство подписки «Урал-Пресс» и агентство «АРЗИ», распространяется журнал на территории Российской Федерации. Подписку можно оформить на квартал, на полгода или на год.

Журнал «Вестник РГУПС» бесплатно рассылается всем отраслевым вузам, в ряд вузов Министерства образования и науки России, центральным и зональным научно-техническим библиотекам, НИИ информации.

Почтовый адрес редакции:

344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2.

Ростовский государственный университет путей сообщения.

Редакция журнала «Вестник РГУПС».

Телефон: +7 (863) 272-62-74. Факс: +7 (863) 255-37-85.

E-mail: pmv_nis@rgups.ru ; nis@rgups.ru (дополнительный).

Архив журнала и требования по оформлению статей размещены на сайте <http://vestnik.rgups.ru>.

Научное издание

**ВЕСТНИК
Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

**№ 2 (94)
2024**

Уважаемые читатели!
Вы можете подписаться на наш журнал на сайте www.pressa-rgf.ru.
Индекс журнала по каталогу 53720

**Полнотекстовая версия статей находится в открытом доступе на сайте
Российской научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
Журнал обрабатывается в системах индексов научного цитирования
РИНЦ и Science Index**

**Требования к оформлению статей размещены на сайте
<http://vestnik.rgups.ru>**

Редакторы: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,
Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова, К.И. Паханова,
А.П. Кононенко (английский текст)

Корректоры: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,
Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова, К.И. Паханова,
А.П. Кононенко (английский текст)

Оригинал-макет журнала подготовлен А.О. Полуниной

Подписано в печать 27.06.2024.
Дата выхода в свет 28.06.2024.
Печать офсетная.
Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 33,95.
Тираж 510 экз.
Цена свободная.

Бумага офсетная.
Изд. № 30.
Заказ .

Учредитель:

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)**

**Адрес университета, издателя, редакции:
344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2.
Телефон редакции +7 (863) 272-62-74; факс +7 (863) 255-37-85.
E-mail: pmv_nis@sci.rgups.ru; nis@rgups.ru**

**Адрес типографии :
«Издательство «D&V». Св-во № 003679887.
344037, г. Ростов-на-Дону, ул. 20 линия, 54.
E-mail: divprint@mail.ru. Телефон +7 (918) 543-75-63.**