

ISSN 0201-727X



ВЕСТНИК

РОСТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

№ 1
2025

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

№ 1 (97)

Ростов-на-Дону
2025

ВЕСТНИК
Ростовского государственного университета путей сообщения

2025
№ 1 (97)

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

М.П. Бадёр, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО Московский государственный университет путей сообщения (РУТ МИИТ), 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., Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), г. Москва

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

О.А. Ворон, д-р техн. наук, доц., 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

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

П.Г. Ивановкин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, 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

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

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

В.А. Осипов, к-т техн. наук, доц., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

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

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.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., Донской государственный технический университет (ДГТУ), 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. Куделина, 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
- M.P. Bader**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow State Transport University (RUT MIIT), 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, Research and Design Institute of Information, Automation and Communication in Railway Transport (NIIAS), Moscow
- V.D. Vereskun**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- O.A. Voron**, Doctor of Engineering Sciences, Associate 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
- 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
- P.G. Ivanochkin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, 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
- M.A. Mukutadze**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.I. Novakovich**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.A. Osipov**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.D. Petrushin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- 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.N. Taran**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU),
- 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, Don State Technical University (DSTU),
- 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. Yaitskov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.O. Kudelina**, executive secretary, RSTU, Rostov-on-Don

СОДЕРЖАНИЕ

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Разуваев Д.А., Печенкин Р.С., Ланис А.Л. Оптимизация составов инъекционных растворов для стабилизации слабого основания эксплуатируемого земляного полотна в криолитозоне	8
--	---

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Антошин И.А., Ярьсько С.И. Лазерная постобработка керамических и карбидовольфрамовых HVOF-покрытий.....	17
Балалаев А.Н., Жебанов А.В., Коркина С.В. Распределение расчетной температуры обода колеса грузового вагона в процессе торможения.....	26
Сазонова С.А., Чукарин А.Н., Финоченко Т.А. Теоретическое обоснование акустических моделей плоскошлифовальных станков	38
Шмойлов А.Н. Автоматизированная система управления колесотокарным станком при восстановлении профиля катания колесных пар грузовых вагонов.....	44

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Ал-Хафаджи И.М.А., Панов А.В. Улучшение передвижения шестиколесного наземного робота по различным типам местности с использованием алгоритма A* и нейронных сетей..	51
Долгий А.И., Хатламаджиян А.Е., Ольгейзер И.А., Суханов А.В. Классификация режимов работы железнодорожной станции на основе реальных данных «от колеса».....	58

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

Выскребенцев И.С., Петров М.Б. Прогнозирование грузовых перевозок региона в условиях дефицита транспортной инфраструктуры.....	69
Никитин Д.В., Соловьев Н.В. Модель управления многоуровневыми логистическими транспортными экосистемами.....	77
Нувович В.Е., Тулина Т.В. Алгоритмическое обеспечение и концептуальные модели логистического навигатора в части определения условий перевозок грузов различными видами транспорта.....	86
Псеровская Е.Д., Желдак К.В., Овчинников Р.А. Алгоритм подбора подвижного состава для транспортировки мелкодисперсных сыпучих грузов.....	94
Четчуев М.В., Иванков А.Н., Винник А.Д. Предложения по проектированию путевого развития станций и парков для временного отстоя вагонов.....	106
Юргин И.В. О подходе к оценке достоверности имитационной модели доставки грузов с использованием контейнеров-трансформеров.....	112

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Будаев А.А., Третьяков Е.А. Компьютерное моделирование возможных неисправностей в электрической части электровоза на основе технологии Цифрового двойника.....	121
Лябах Н.Н., Инухова Д.М. Идентификация признаков пространства погружения ЛППР – основа субъектно ориентированного подхода к исследованию сложных объектов....	133

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Воронова Н.П. Принципы конструирования сильноточных полупроводниковых терморезисторов.....	141
Кубкина О.В. Оценка протяженности зон функционального диагностирования релейной защиты тяговой сети 25 кВ.....	151
Осипова А.И. Моделирование процесса нагрева оптоволоконного кабеля, вмонтированного в грозозащитный трос, токами короткого замыкания.....	159
Осипов В.А. Альтернативный подход к сооружению волоконно-оптических линии связи железных дорог переменного тока.....	167
Петрушин А.Д., Меликов А.И. Пуск и торможение асинхронных двигателей при параметрическом управлении.....	174
Смердин А.Н., Тарасенко А.В., Чертков И.Е., Голубков А.С. Совершенствование методики оценки риска ущерба от гололедообразования на проводах контактной сети ввиду отсутствия устройств удаления гололеда.....	182

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Легкая В.И., Пудовиков О.Е. Совершенствование структуры системы автоматического управления скоростью электропоезда.....	190
Харченко П.А. Совершенствование системы и технологии эксплуатации подвижного состава на основе анализа информации средств регистрации параметров движения, диагностики и мониторинга технического состояния локомотива.....	201
Цыганская Л.В., Чернов В.А., Бейн Д.Г. Оценка трещиностойкости боковых рам тележек грузовых вагонов при проектировании.....	211
Яицков И.А., Федотов Е.С., Назаретов А.А. Эффективность теплоотвода поверхностей тормозного диска тормозной системы подвижного состава при различных режимах работы вентиляционного аппарата.....	219

CONTENTS

RAIL TRACK AND TRANSPORT CONSTRUCTION

- Razuvaev D.A., Pechenkin R.S., Lanis A.L.** Optimization of injection mortars for stabilization of soft base of operating subgrade in permafrost region 8

MECHANICAL ENGINEERING

- Antoshin I.A., Yaresko S.I.** Laser postprocessing of ceramic and tungsten carbide HVOF coatings..... 17
- Balalaev A.N., Zhebanov A.V., Korkina S.V.** Distribution of the calculated temperature of the rim of a freight wagon wheel during braking..... 26
- Sazonova S.A., Chukarin A.N., Finochenko T.A.** Theoretical substantiation of acoustic models of surface grinding machines..... 38
- Shmoilov A.N.** Automated control system for a wheel lathe for restoring the rolling profile of wheel sets of freight wagons..... 44

INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION
AND TELECOMMUNICATIONS

- Al-Khafaji I.M.A., Panov A.V.** Improving the locomotion of a six-wheeled ground robot on different types of terrain using A* algorithm and neural networks..... 51
- Dolgiy A.I., Khatlamadzhiyan A.E., Olgeizer I.A., Sukhanov A.V.** Classification of railway station operation modes based on real data "from the wheel" 58

OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

- Vyskrebentsev I.S., Petrov M.B.** Freight transportation forecasting in the region in conditions of transport infrastructure shortage..... 69
- Nikitin D.V., Solovyov N.V.** A management model for multi-level logistics transport ecosystems..... 77
- Nutovich V.E., Tulina T.V.** Algorithmic support and conceptual models of the logistics navigator in terms of determining the conditions for transporting cargo by various modes of transport..... 86
- Pserovskaya E.D., Zheldak K.V., Ovchinnikov R.A.** Selection algorithm of rolling stock for finely dispersed bulk cargo transportation..... 94
- Chetchuev M.V., Ivankov A.N., Vinnik A.D.** Proposals for designing track development of stations and fleets for temporary wagon storage..... 106
- Yurgin I.V.** About an approach to assessing the reliability of a simulation model of cargo delivery using transformer containers..... 112

MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

- Budaev A.A., Tretyakov E.A.** Computer modeling of possible malfunctions in the electric part of an electric locomotive on the basis of digital twin technology..... 121
- Lyabakh N.N., Inukhova D.M.** Identification of the feature space of immersion of the decision-maker – the basis of the subject-oriented approach to the study of complex objects..... 133

POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

Voronova N.P. Principles of designing high-current semiconductor thermistors.....	141
Kubkina O.V. Assessment of the extension of functional diagnostics zones of relay protection of 25 kV traction network.....	151
Osipova A.I. Modeling of the heating process of the fiber-optic cable embedded into the lightning protection cable by short-circuit currents.....	159
Osipov V.A. An alternative approach to the construction of fiber-optic communication lines of AC railways.....	167
Petrushin A.D., Melikov A.I. Starting and braking of asynchronous motors with parametric control.....	174
Smerdin A.N., Tarasenko A.V., Chertkov I.E., Golubkov A.S. Improvement of the methodology for assessing the risk of damage from ice formation on contact network wires due to the absence of ice removal devices.....	182

ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY

Legkaya V.I., Pudovikov O.E. Improving the structure of the automatic speed control system of an electric train.....	190
Kharchenko P.A. Improvement of the system and technology of rolling stock operation based on the analysis of information from motion parameter registration, diagnostics and monitoring of the technical condition of the locomotive.....	201
Tsyganskaya L.V., Chernov V.A., Bein D.G. Assessment of crack resistance of side frames of freight car bogies during design.....	211
Yaitskov I.A., Fedotov E.S., Nazaretov A.A. Efficiency of heat removal of the brake disc surfaces of rolling stock braking system in various operating modes of ventilation apparatus.....	219

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 625.12 : 624.139

DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_8

*Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин, А. Л. Ланис***ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ ИНЪЕКЦИОННЫХ РАСТВОРОВ
ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СЛАБОГО ОСНОВАНИЯ
ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА В КРИОЛИТОЗОНЕ ***

Аннотация. Рассмотрены проблемы строительства и эксплуатации объектов дорожной инфраструктуры в криолитозоне, связанные с деградацией многолетнемерзлых грунтов и формированием слабых грунтов в основании сооружений. Для стабилизации слабых оснований в рассматриваемых условиях предложено использовать способ напорной инъекции грунтоцементных растворов в режиме гидроразрывов, преодолев его основные недостатки за счет оптимизации составов используемых смесей. Обосновано основное направление оптимизации – снижение количества применяемого в растворах цемента, что позволит снизить их стоимость, а также объемы сопутствующего тепловыделения, дополнительно растепляющего ММГ в основании.

Поставлены и проведены лабораторные испытания, позволившие установить зависимости основных характеристик грунтоцементных инъекционных растворов от количества цемента (в минимально возможном диапазоне значений), а также определить минимальное содержание вяжущего, обеспечивающего стабильность смеси и затвердевшего раствора.

Предложен алгоритм оптимизации составов инъекционных растворов для стабилизации слабых оснований участков эксплуатируемого земляного полотна в рассматриваемых условиях.

Ключевые слова: железная дорога, автомобильная дорога, земляное полотно, грунты основания, слабые грунты, инъектирование грунтов, инъекционные растворы.

Для цитирования: Разуваев, Д. А. Оптимизация составов инъекционных растворов для стабилизации слабого основания эксплуатируемого земляного полотна в криолитозоне / Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин, А. Л. Ланис // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 8–16. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_8.

Введение

Одной из основных задач в области дорожной инфраструктуры страны является повышение пространственной связанности и транспортной доступности территорий, что отражено в Транспортной стратегии¹. И в первую очередь речь идет о малоосвоенных перспективных минерально-сырьевых центрах в районах с суровыми природно-климатическими условиями, освоение которых обеспечивает долгосрочный экономический рост и национальную безопасность. В данном направлении активно развивается существующая транспортная сеть железных и автомобильных дорог Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), а также рассматриваются перспективные проекты развития дорожной инфраструктуры.

При этом имеется ряд проблем, из-за которых строительство и эксплуатация объектов дорожной инфраструктуры в АЗРФ существенно затруднены, и основная из них – повсеместное распространение многолетнемерзлых грунтов (ММГ) в основании сооружений. В настоящее время практически вся территория АЗРФ расположена в криолитозоне [1]. Несмотря на особый подход к проектно-исследовательским работам и строительству транспортной инфраструктуры на таких территориях, зачастую в процессе эксплуатации сооружений возникают криогенные деформации [2–3]. Эти деформации, в первую очередь, объясняются деградацией многолетнемерзлых грунтов основания из-за нарушения

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20036 (<https://rscf.ru/project/24-19-20036/>) и финансовой поддержки Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа.

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. – URL: <https://rosavtdor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda>

водно-теплого режима, вызванного строительством, а также глобального потепления. Деградация ММГ, как правило, сопровождается не только термопросадками, но и формированием слабых грунтов в основании сооружений. И если термопросадки проявляются только в процессе деградации ММГ, а в ряде случаев затухают при выравнивании теплового баланса между основанием сооружения и атмосферой, то осадки элементов земляного полотна на слабом основании продолжают достаточно длительное время и интенсифицируются при увеличении транспортной нагрузки.

Одним из эффективных способов повышения физико-механических характеристик грунтов, в том числе стабилизации слабых оснований, является способ напорной инъекции грунтоцементных растворов в режиме гидроразрывов [4–6]. Данный способ позволяет не только стабилизировать слабые основания после деградации ММГ, но и в комбинации с термостабилизирующими конструкциями [7] исключить дальнейшие термопросадки. Основными преимуществами способа напорной инъекции грунтоцементных растворов в режиме гидроразрывов являются возможность выполнения работ без перерывов в движении по деформируемому участку дороги, а также относительная простота и доступность технологии производства работ и применяемого оборудования. К недостаткам способа стоит отнести относительно высокую стоимость его применения для земляного полотна протяженных линейных объектов, а также тепловыделение инъекционных растворов за счёт экзотермии цемента [8], негативно влияющее на состояние еще сохранившихся в основании ММГ.

Основная идея работы заключается в возможности значительного снижения количества применяемого в инъекционных растворах цемента при обеспечении требуемой подвижности смеси. Снижение количества вяжущего в растворах позволит снизить их стоимость, а также объемы сопутствующего тепловыделения, дополнительно растепляющего ММГ в основании. Идея реализуема, поскольку у широко применяемых в настоящее время растворов, разработанных и подбираемых для оснований зданий, и других точечных сооружений на фундаментах, есть избыточный потенциал по прочностным и деформационным характеристикам. Для основания земляного полотна, воспринимающего в несколько раз меньшие дополнительные напряжения, за счет перераспределения транспортных и собственных нагрузок через верхнее строение пути (дорожную одежду) и тело насыпи, для стабилизации слабых грунтов возможно использовать менее прочные грунтоцементные растворы.

Для практической реализации предложенного подхода необходимо установить зависимости основных характеристик грунтоцементных инъекционных растворов от количества цемента (в минимально возможном диапазоне значений), а также определить минимальное содержание вяжущего, обеспечивающего стабильность смеси и затвердевшего раствора. Кроме того, необходимо разработать алгоритм оптимизации составов инъекционных растворов для стабилизации слабых оснований участков эксплуатируемого земляного полотна в рассматриваемых условиях.

Постановка задачи

Основной целью данной работы является установление зависимости модуля деформации (E_{stb}) и предела прочности на одноосное сжатие (R_{stb}) грунтоцементных инъекционных растворов с требуемой подвижностью смеси от количества портландцемента (в диапазоне возможных значений менее 0,3 кг/л) и используемого грунта.

В качестве требуемой подвижности смеси принят диапазон от 18 до 20 см по конусу растекаемости, что соответствует минимально допустимым значениям параметра для грунтоцементных растворов по ГОСТ Р 59538. Принятый диапазон, с одной стороны, обеспечивает лучшие физико-механические характеристики затвердевшего раствора и минимизирует его усадку при твердении, а с другой, обеспечивает беспрепятственный проход раствора по подводящим магистралям растворонасоса и трубам инъекторов.

В качестве инертного материала использовались различные виды глинистых грунтов с числом пластичности в интервале от 0,05 до 0,10, которые обеспечивают соотношение глинистых и песчаных частиц, близкое к оптимальному, и наиболее часто применяются в практике инъектирования. Использование глинистых грунтов с $I_p > 0,10$ в качестве инертного материала грунтоцементного раствора сопряжено со сложностью приготовления однородной смеси, а увеличение процентного содержания глинистых частиц в составе раствора, существенно снижает его прочность [9]. В свою очередь использование песков и супесей с числом пластичности $I_p < 0,05$ повышает вероятность расслоения раствора в инъекционных магистралях, а абразивные свойства таких растворов снижают срок службы инъекционного оборудования.

В качестве вяжущего использовался широко распространенный клинкерный портландцемент ЦЕМ II 42,5Н по ГОСТ 31108. За минимально возможный диапазон содержания вяжущего в растворе принят диапазон от 300 грамм на литр смеси и менее, с шагом варьирования 50 г/л. Дополнительно испытаны составы с диапазоном 300–500 г/л, исследуемые по параметрам тепловыделения в работе [7].

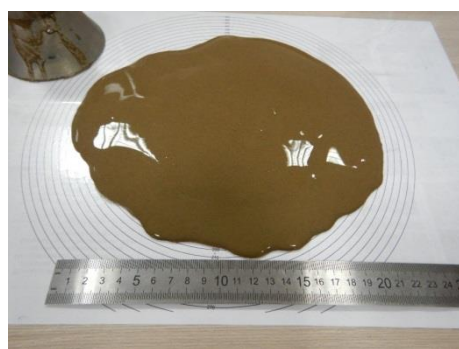
Прочностные и деформационные характеристики затвердевших грунтоцементных инъекционных растворов исследовались после полного водонасыщения, что соответствует реальным условиям эксплуатации в рассматриваемых условиях.

Методика испытаний

Для приготовления грунтоцементных растворов исследуемых рецептур навески подготовленных грунтов и вяжущего смешивались в воздушно-сухом состоянии с последующим добавлением воды и перемешиванием механизированным способом. Водоцементное отношение подбиралось опытным путем до достижения требуемой подвижности смеси. Определение подвижности раствора (рис. 1, а) выполнялось при помощи конуса растекаемости по ГОСТ 34532.

На следующем этапе изготавливались испытательные образцы (кубы) размером 70,7×70,7×70,7 мм (рис. 1, б) для дальнейших исследований. Изготовление образцов выполнено по методике ГОСТ 5802. Хранение образцов выполнялось в камере нормального твердения, способной автоматически поддерживать заданный тепловлажностный режим. По истечении 28 суток образцы извлекались из камеры и помещались в емкость с водой для полного водонасыщения, которое контролировалось по изменению массы.

Определение модуля деформации (E_{stb}) и предела прочности на одноосное сжатие (R_{stb}) образцов из грунтоцементного раствора выполнено на прессе (рис. 2), позволяющем фиксировать силу нагружения и деформацию. Для более точного определения характеристик каждого из исследуемых составов испытания проводились партиями из трех образцов одинакового состава и возраста.



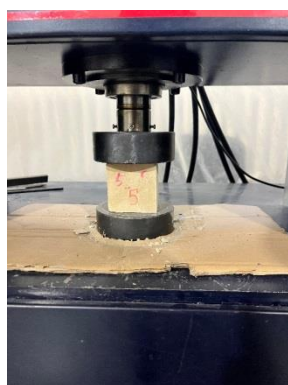
а



б

Рис. 1. Этапы подготовки к испытаниям:

а – определение подвижности смеси; б – испытательные образцы из грунтоцементного раствора



а



б

Рис. 2. Испытание грунтоцемента на прессе:

а – установленный образец до испытания; б – разрушенный образец

Очевидно, что свойства грунтоцементных растворов напрямую зависят от гранулометрического состава используемых в качестве инертного материала глинистых грунтов [10]. Поэтому в рамках проведения испытаний и для обработки их результатов предложен к использованию коэффициент $k_{s/c}$, равный отношению содержания в глинистом грунте песчаных частиц D_s (%) к сумме пылеватых и глинистых частиц D_c (%). Данный коэффициент, в отличие от числа пластичности, в большей степени характеризует используемый в качестве инертного материала для инъекционного раствора глинистый грунт по гранулометрическому составу. Результаты анализа имеющихся в распоряжении авторов данных о гранулометрическом составе глинистых грунтов основания дорожных сооружений полуострова Ямал, как типичного региона АЗРФ, показали, что в рассматриваемом диапазоне числа пластичности значения коэффициента $k_{s/c}$ варьируются от 0,17 до 3,12. Поэтому в рамках выполняемых испытаний приняты грунты (табл. 1) с коэффициентами $k_{s/c}$, обеспечивающими репрезентативность исследования.

Таблица 1

Гранулометрические составы используемых грунтов

Диаметр фракции, мм	Гранулометрический состав, %, для используемых грунтов с числом пластичности		
	0,05 (супесь песчаная)	0,07 (суглинок песчаный)	0,10 (суглинок пылеватый)
2–1	0,25	9,21	0,03
1–0,5	1,54	7,51	0,23
0,5–0,25	8,77	13,86	1,03
0,25–0,10	32,99	17,65	4,25
0,10–0,05	28,70	11,31	12,69
0,05–0,01	14,03	16,26	53,33
0,01–0,002	3,92	13,12	7,90
< 0,002	9,80	11,08	20,54
$k_{s/c} = \frac{D_s}{D_c}$ д.е.	2,60	1,47	0,22

Матрица выполненных испытаний для установления зависимости характеристик грунтоцементных инъекционных растворов от количества портландцемента и используемого грунта представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица выполненных испытаний

Состав, г/л ¹		Количество образцов, шт., для $k_{s/c}$			Возраст, сут.	Определяемые характеристики
Цемент	Грунт	2,60	1,47	0,22		
500	1450	3	3	3	28	Предел прочности на одноосное сжатие (R_{stb}), МПа; Модуль деформации (E_{stb}), МПа.
450	1500	3	3	3		
400	1550	3	3	3		
350	1600	3	3	3		
300	1650	3	3	3		
250	1700	3	3	3		
200	1750	3	3	3		
150	1800	3	3	3		
100	1850	3	3	3 ²		
50	1900	3 ²	3 ²	3 ²		

Примечания: 1 – водоцементное отношение подбиралось опытным путем до достижения подвижности смеси от 18 до 20 см по конусу растекаемости; 2 – образцы затвердевшего раствора разрушались после этапа водонасыщения.

Результаты испытаний

По результатам испытаний получены зависимости модуля деформации E_{stb} (рис. 3, а) и предела прочности на одноосное сжатие R_{stb} (рис. 3, б) грунтоцементных инъекционных растворов от количества портландцемента Π (г/л) и гранулометрического состава исходных глинистых грунтов. Установлены предельные значения количества вяжущего, обеспечивающего стабильность смеси и затвердевшего раствора. Так, минимальное количество вяжущего Π_{\min} для обеспечения пригодности грунтоцементных растворов для инъектирования в слабые грунты основания составляет 150 г/л смеси при использовании глинистых грунтов с $k_{s/c} < 1,5$ и 100 г/л смеси при использовании глинистых грунтов с $k_{s/c} \geq 1,5$. Указанные пределы являются граничными условиями использования полученных зависимостей.

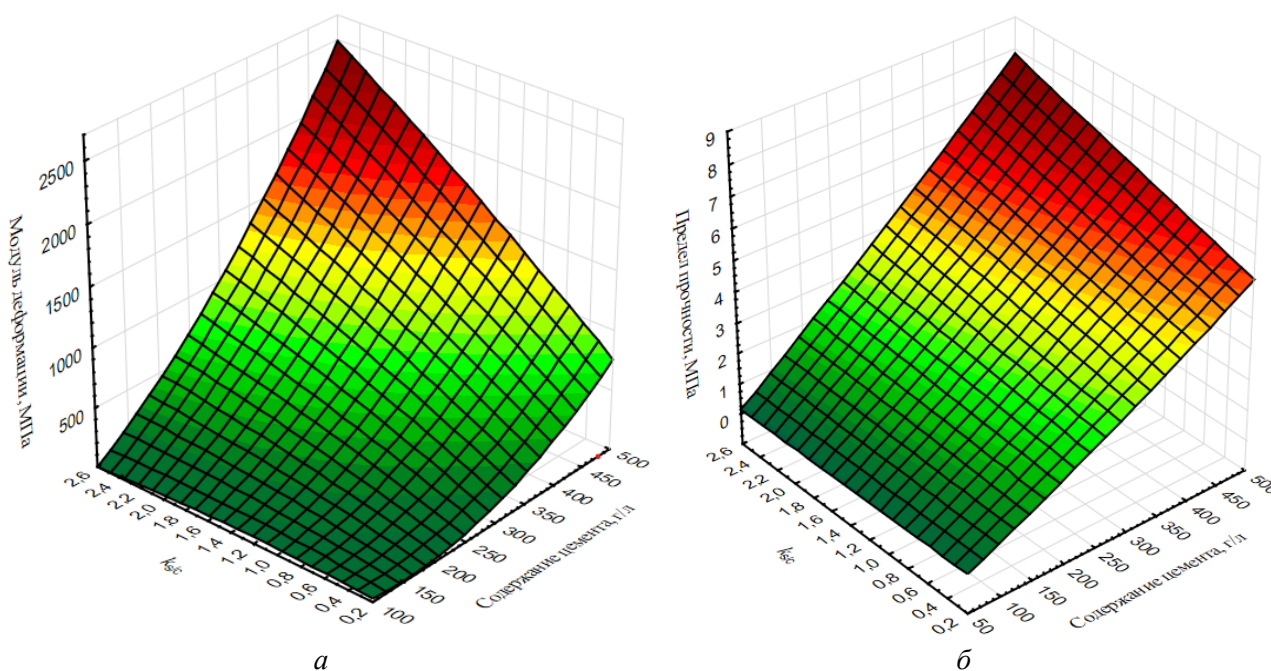


Рис. 3. Зависимости параметров исследуемых растворов от количества портландцемента и гранулометрического состава грунтов $k_{s/c}$:

а – модуля деформации; *б* – предела прочности на одноосное сжатие

В результате аппроксимации данных получено уравнение зависимости модуля деформации E_{stb} инъекционных растворов от количества портландцемента Π и коэффициента гранулометрического состава $k_{s/c}$, которое имеет вид

$$E_{stb} = 28,2439k_{s/c}^2 + 0,0062\Pi^2 + 1,8351k_{s/c}\Pi - 118,2528k_{s/c} - 2,2343\Pi + 181,2479. \quad (1)$$

Уравнение зависимости предела прочности R_{stb} инъекционных растворов от количества портландцемента Π и коэффициента гранулометрического состава $k_{s/c}$, имеет вид:

$$R_{stb} = 0,0011k_{s/c}^2 + 0,0026k_{s/c}\Pi + 2,9843 \cdot 10^{-6}\Pi^2 - 0,1806k_{s/c} + 0,0088\Pi - 0,1696. \quad (2)$$

Коэффициенты достоверности аппроксимации для полученных уравнений (1) и (2) составили 0,87 и 0,96 соответственно. Уравнения (1) и (2) рекомендуется использовать (в пределах граничных условий проведенных испытаний) для решения практических задач подбора составов грунтоцементных инъекционных растворов и их объемов под конкретный проект стабилизации слабых оснований.

На основании полученных зависимостей возможно не только назначать составы инъекционных растворов с минимальным количеством вяжущего, но и оптимизировать состав под конкретные условия по наилучшему соотношению стоимости раствора и объема закачки.

Оптимизация составов инъекционных растворов

Для решения задачи оптимизации составов инъекционных растворов в проектах стабилизации слабых оснований эксплуатируемого земляного полотна в криолитозоне предложен алгоритм, представленный на рис. 4.

Ключевой особенностью предложенного алгоритма является возможность назначения вариантов составов инъекционных растворов C_i под доступный инертный материал (глинистый грунт) с различным содержанием цемента, и определения их параметров по установленным зависимостям (1) и (2). При этом, рекомендуется назначать не менее трех вариантов состава из минимального, среднего и максимального интервалов исследованного диапазона значений содержания цемента в растворе.

Определение требуемых объемов инъектирования V_i по каждому из составов рекомендуется выполнять без учета уплотнения грунтовых массивов между включениями инъектированного раствора для водонасыщенных и не дренирующих оснований (по критериям коэффициента водонасыщения $S_r > 0,8$ и коэффициента фильтрации $k_\phi < 0,3$ м/сут соответственно). Для остальных оснований, расчет объемов инъектирования необходимо выполнять с учетом возможности уплотнения грунтовых массивов между включениями инъектированного раствора.

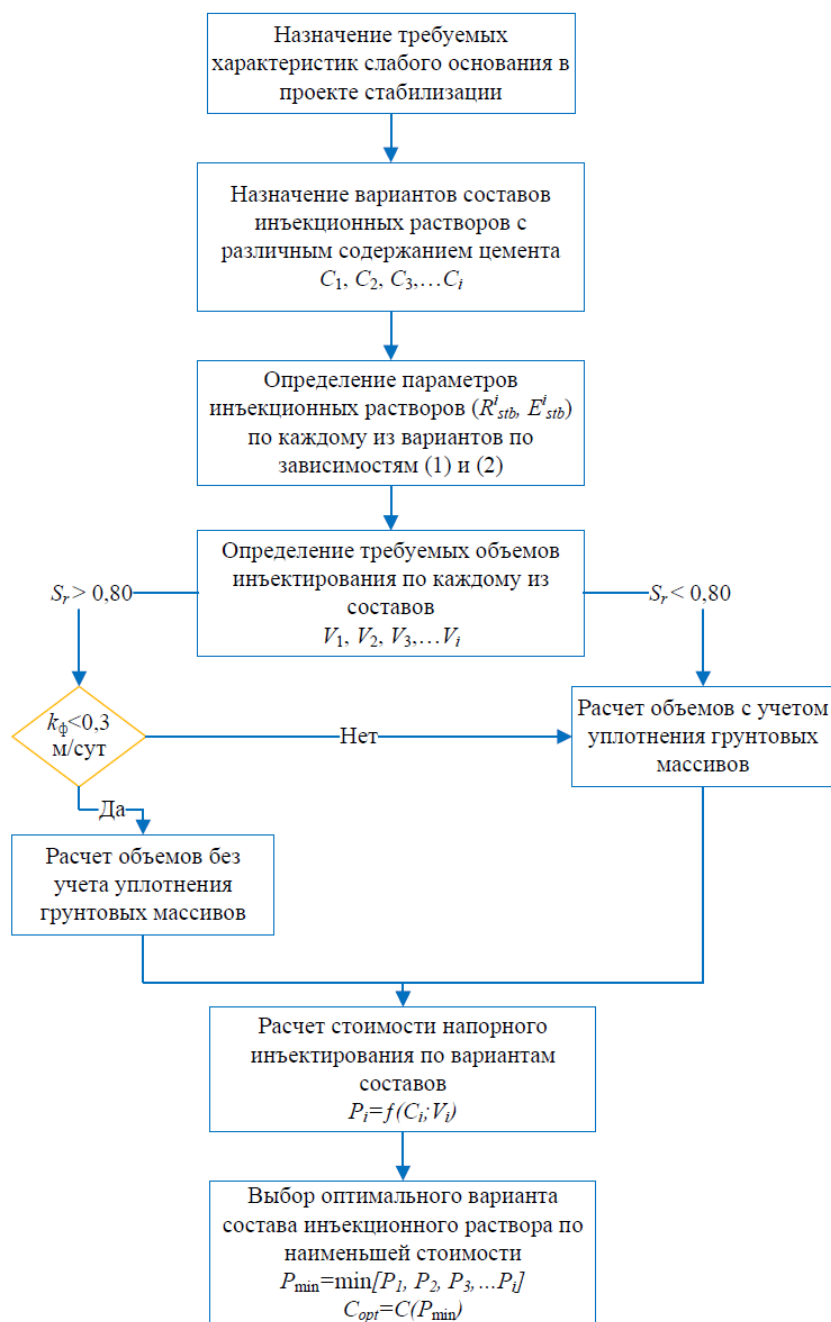


Рис. 4. Алгоритм оптимизации составов инъекционных растворов в проектах стабилизации слабых оснований в криолитозоне

Для расчета объемов инъектирования без учета уплотнения грунтового массива возможно использовать методику СП 22.13330, которая основана на применении коэффициента, характеризующего объемную долю армирующих элементов из раствора в массиве грунта. Расчеты, учитывающие возможность уплотнения грунтовых массивов между включениями инъектированного раствора, рекомендуется выполнять по методике, описанной в [11]. Данная методика учитывает увеличение плотности грунта, достигаемое за счет снижения его коэффициента пористости, а также учитывает армирующий эффект, получаемый за счет твердения закаченного в массив раствора.

Зная состав и требуемый для достижения проектных характеристик основания после стабилизации объем инъектирования, возможно рассчитать стоимость работ P_i по различным вариантам состава. Очевидно, что снижение количества, вяжущего в растворе, будет снижать удельную стоимость материала, но увеличивать его объем и объем инъектирования, и наоборот.

Выбор оптимального варианта состава инъекционного раствора C_{opt} следует выполнять по наименьшей стоимости работ, но с учетом возможных дополнительных затрат, связанных с растеплением ММГ при высоких значениях содержания цемента в материале [7]. При относительно равной стоимости работ, следует отдавать предпочтение вариантам составов с наименьшим количеством вяжущего.

Заключение

По результатам выполненных исследований показана возможность оптимизации составов грунтоцементных инъекционных растворов для стабилизации слабых оснований эксплуатируемого земляного полотна в криолитозоне. В определенных условиях возможно снижение количества вяжущего в растворах, что позволит снизить их стоимость, а также объемы сопутствующего тепловыделения, дополнительно растепляющего ММГ в основании.

Для решения практических задач подбора составов грунтоцементных инъекционных растворов и их объемов под конкретный проект стабилизации слабых оснований установлены зависимости модуля деформации E_{stb} и предела прочности R_{stb} инъекционных растворов от количества портландцемента и введенного коэффициента гранулометрического состава $k_{s/c}$, которые описываются уравнениями (1) и (2). Определены предельные (минимальные) значения количества цемента, обеспечивающего стабильность смеси и затвердевшего раствора при инъектировании в слабые грунты основания в исследованных граничных условиях.

На основе полученных результатов предложен алгоритм оптимизации составов инъекционных растворов, позволяющий под доступный инертный материал (глинистый грунт) назначать варианты составов с различным содержанием цемента, а также с применением критериального подхода к расчету объемов инъектирования выбирать наиболее оптимальный из них по наилучшему соотношению стоимости материала и объема работ.

Список литературы

- 1 Елисеев, Д. О. Транспортная инфраструктура арктических регионов России в условиях деградации вечной мерзлоты / Д. О. Елисеев, Ю. В. Наумова // Экономика и бизнес : теория и практика. – 2019. – № 10–1 (56). – С. 113–118. – DOI 10.24411/2411-0450-2019-11226.
- 2 Российская Арктика : современная парадигма развития / А. И. Татаркин, Н. Я. Петраков, В. А. Цветков [и др.]. – Санкт-Петербург : Нестор-История, 2014. – 844 с. – ISBN 978-5-4469-0372-6.
- 3 Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the Arctic zone in conditions of global warming / I. Sakharov, S. Kudryavtsev, V. Paramonov [et al.] // X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022, Novosibirsk, March 02–05, 2022. – Novosibirsk : B. V. Elsevier, 2022. – P. 2506–2514. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.288.
- 4 Ланис, А. Л. Применение метода напорной инъекции для усиления насыпей / А. Л. Ланис //

References

- 1 Eliseev, D. O. Transport infrastructure of the Arctic regions of Russia in the context of permafrost degradation / D. O. Eliseev, Yu. V. Naumova // Economy and business : theory and practice. – 2019. – No. 10–1 (56). – P. 113–118. – DOI 10.24411/2411-0450-2019-11226.
- 2 Russian Arctic : modern development paradigm / A. I. Tatarkin, N. Ya. Petrakov, V. A. Tsvetkov [et al.]. – Saint Petersburg : Nestor-History, 2014. – 844 p. – ISBN 978-5-4469-0372-6.
- 3 Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the Arctic zone in conditions of global warming / I. Sakharov, S. Kudryavtsev, V. Paramonov [et al.] // X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022, Novosibirsk, March 02–05, 2022. – Novosibirsk : B. V. Elsevier, 2022. – P. 2506–2514. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.288.
- 4 Lanis, A. L. Application of pressure injection method for embankment reinforcement /

Путь и путевое хозяйство. – 2009. – № 6. – С. 33–35. – ISSN 0131-5765.

5 СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* : свод правил : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 970/пр и введен в действие с 17 июня 2017 г. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 228 с.

6 Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions. Sciences in Cold and Arid Regions / P. O. Lomov, A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, M. G. Kavardakov. – 2021. – Vol. 13. – Iss. 5. – P. 357–365. – DOI 10.3724/SP.J.1226.2021.21040.

7 Разуваев, Д. А. Стабилизация основания земляного полотна инъекционным способом при деградации многолетнемерзлых грунтов / Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин // Мир транспорта. – 2024. – Т. 22, № 1 (110). – С. 6–16. – DOI 10.30932/1992-3252-2024-22-1-1.

8 Сахаров, И. И. Опыт высоконапорной инъекции в пластично-мерзлые грунты / И. И. Сахаров, А. Е. Захаров // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2004. – № 8. – URL: <http://georeconstruction.net/journals/08/files/pdf/0508021.pdf> (дата обращения: 16.01.2025).

9 Ибрагимов, М. Н. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов : монография / М. Н. Ибрагимов, В. В. Семкин. – Москва : АСВ, 2012. – 256 с. – ISBN 978-5-93093-863-0.

10 Geotechnical engineering handbook / ed. by Braja M. Das. – Fort Lauderdale, FL : J. Ross Publishing, 2012. – 800 p. – ISBN 978-1-932159-83-7.

11 Ланис, А. Л. Метод напорной инъекции для усиления насыпей / А. Л. Ланис // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – № 2. – С. 32–34. – ISSN 0131-5765.

A. L. Lanis // Track and track facilities. – 2009. – No. 6. – P. 33–35. – ISSN 0131-5765.

5 SP 22.13330.2016. Foundations of buildings and structures. Updated edition of SNiP 2.02.01-83* : set of rules : official edition : approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 16, 2016. N 970/pr and put into effect from June 17, 2017. – Moscow : Standartinform, 2016. – 228 p.

6 Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions. Sciences in Cold and Arid Regions / P. O. Lomov, A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, M. G. Kavardakov. – 2021. – Vol. 13. – Iss. 5. – P. 357–365. – DOI 10.3724/SP.J.1226.2021.21040.

7 Razuvaev, D. A. Stabilization of the roadbed base by the injection method during degradation of permafrost soils / D. A. Razuvaev, R. S. Pechenkin // World of Transport. – 2024. – Vol. 22, No. 1 (110). – P. 6–16. – DOI 10.30932/1992-3252-2024-22-1-1.

8 Sakharov, I. I. Experience of high-pressure injection into plastic-frozen soils / I. I. Sakharov, A. E. Zakharov // Reconstruction of cities and geotechnical construction. – 2004. – No. 8. – URL: <http://georeconstruction.net/journals/08/files/pdf/0508021.pdf> (date of access: 01/16/2025).

9 Ibragimov, M. N. Soil stabilization by injection of cement mortars : monograph / M. N. Ibragimov, V. V. Semkin. – Moscow : ASV, 2012. – 256 p. – ISBN 978-5-93093-863-0.

10 Geotechnical engineering handbook / ed. by Braja M. Das. – Fort Lauderdale, FL : J. Ross Publishing, 2012. – 800 p. – ISBN 978-1-932159-83-7.

11 Lanis, A. L. Method of pressure injection for strengthening embankments / A. L. Lanis // Track and track facilities. – 2009. – No. 2. – P. 32–34. – ISSN 0131-5765.

D. A. Razuvaev, R. S. Pechenkin, A. L. Lanis

OPTIMIZATION OF INJECTION MORTARS FOR STABILIZATION OF SOFT BASE OF OPERATING SUBGRADE IN PERMAFROST REGION

Abstract. The article considers the problems of construction and maintenance of road facilities in the permafrost region related to the degradation of permafrost soils and the formation of soft soils at the base of structures. For stabilization of soft soils in the considered conditions it is proposed to use the method of pressure injection of soil-cement mortars in the mode of hydraulic fractures, overcoming its main disadvantages by optimizing the compositions of the mixtures used. The main direction of optimization is substantiated – reduction of the amount of cement used in mortars, which will reduce their cost, as well as the amount of associated heat generation, additionally thawing permafrost soils in the base.

Laboratory tests were supplied and carried out, which allowed to determine the dependence of the main characteristics of soil-cement injection mortars on the amount of cement (in the

minimum possible range of values), as well as to determine the minimum binder concentration that provides the stability of the mixture and hardened mortar.

An algorithm for optimizing the compositions of injection mortars for stabilizing soft bases of the operating subgrade sections under the considered conditions is proposed.

Keywords: railway, highway, subgrade, foundation soils, soft soils, soil injection, injection mortars.

For citation: Razuvaev, D. A. Optimization of injection mortars for stabilization of soft base of operating subgrade in permafrost region / D. A. Razuvaev, R. S. Pechenkin, A. L. Lanis // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 8–16. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_1_8.

Сведения об авторах

Разуваев Денис Алексеевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: razdenis@mail.ru

Печенкин Роман Сергеевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
аспирант,
e-mail: pechenkinrs@gmail.com

Ланис Алексей Леонидович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: alangeo@bk.ru

Information about the authors

Razuvaev Denis Alekseevich

Siberian State Transport University (STU),
Chair “Research, Design and Construction of Railways and Highways”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: razdenis@mail.ru

Pechenkin Roman Sergeevich

Siberian State Transport University (STU),
Chair “Railway and Railroad Facilities”,
Postgraduate Student,
e-mail: pechenkinrs@gmail.com

Lanis Alexey Leonidovich

Siberian State Transport University (STU),
Chair “Railway and Railroad Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of Chair,
e-mail: alangeo@bk.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.793 + 621.373.826 : 621.78

DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_17

*И. А. Антошин, С. И. Ярьсько***ЛАЗЕРНАЯ ПОСТОБРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ И КАРБИДОВОЛЬФРАМОВЫХ HVOF-ПОКРЫТИЙ***

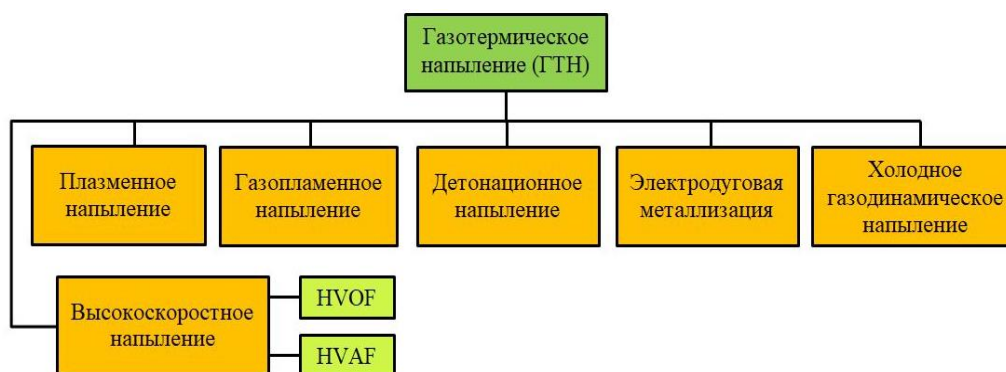
Аннотация. Проведен анализ современного состояния исследований в области лазерной постобработки керамических и карбидовольфрамowych покрытий, наносимых с помощью технологий газотермического напыления (ГТН). Показано, что наиболее целесообразна лазерная обработка с оплавлением поверхности. Лазерный переплав позволяет получать покрытия с улучшенными прочностными свойствами. Установлено значительное изменение структуры газотермических покрытий (ГТП), снижение дисперсности и порообразования, повышение их эксплуатационных характеристик, таких как износостойкость, твердость, коррозионная стойкость. Указаны причины наблюдаемых изменений структурных и прочностных характеристик покрытий после лазерной термообработки (ЛТО) HVOF-покрытий с переплавом, даны рекомендации по выбору режимов обработки.

Ключевые слова: лазерная обработка (ЛО), газотермическое покрытие, износостойкость, микротвердость, структура, эксплуатационные характеристики.

Для цитирования: Антошин, И. А. Лазерная постобработка керамических и карбидовольфрамowych HVOF-покрытий / И. А. Антошин, С. И. Ярьсько // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 17–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_17.

Введение

Технологии ГТН получили широкое распространение в области машиностроения. Данный вид технологии применяется как для защиты изделий или придания им более высоких эксплуатационных свойств, так и для восстановления рабочих поверхностей деталей и узлов [1]. К методам ГТН, как известно [2, 3], относятся высокоскоростные методы напыления HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) и HVAF (High Velocity Air Fuel), которые наиболее актуальны для нанесения порошковых ГТП, а также газопламенное и газоплазменное, детонационное и холодное газодинамическое напыление, электродуговая металлизация (рис. 1).

**Рис. 1. Методы ГТН**

* Статья рекомендована к публикации оргкомитетом по результатам 16-й юбилейной Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава».

Напыление газотермических покрытий на металлическую подложку рабочего узла машины или конструкции оказывает значительное влияние на ресурс работы этого узла. Керамические покрытия обладают рядом существенных технологических достоинств, к которым прежде всего можно отнести хорошую адгезионную прочность и коррозионную стойкость. К наиболее распространенным композициям относятся порошки на основе $ZrO_2-7\% Y_2O_3$, Cr_3C_2-NiCr , Al_2O_3 . Порошковые покрытия на основе карбида вольфрама WC показывают высокую твердость и износостойкость. К наиболее распространенным композициям относятся порошки на основе WC-Co, WC-CoCr, WC-(W,Cr)₂C-Ni [4].

Несмотря на значительные преимущества напыляемых покрытий, такие как не превышающая 2–5 % пористость, хорошая адгезия между основой и покрытием, покрытия, созданные высокоскоростными методами напыления, обладают рядом недостатков. Основным из них, хотя и редко упоминаемым, является образование оксидных пленок в процессе напыления порошковых материалов. За счет кислородосодержащей атмосферы пламени на частицах порошка затруднено восстановление оксидов железа, никеля, кобальта, вольфрама, а на поверхности подложки совершенно невозможно. Окисленные поверхности напыляемых гранул порошка препятствуют образованию металлургической связи между подложкой и гранулами порошка, между ними образуется тонкая оксидная пленка.

Для повышения эксплуатационных характеристик газотермических покрытий целесообразно применять дополнительную термическую обработку нанесенного покрытия [5–9], в том числе и лазерную постобработку. Покрытия, полученные таким образом, могут значительно продлить срок службы деталей машин, для которых он ограничен.

К числу приоритетных работ в этом направлении относятся работы по уменьшению пористости покрытий, увеличению адгезии покрытия и материала подложки, а также по изучению влияния лазерного излучения (ЛИ) на свойства и структуру покрытий. Разработка способов повышения антифрикционных и защитных свойств деталей машин и рекомендаций по применению дополнительной ЛТО таких покрытий является перспективным направлением исследований. К настоящему времени в этой области достигнуты определенные успехи.

Цель работы – анализ современного состояния исследований в области лазерной постобработки ГТП, получаемых методами ГТН, основных свойств таких покрытий и перспектив их применения.

Лазерное оборудование для обработки ГТП

Для проведения дополнительной ЛТО с целью увеличения основных эксплуатационных свойств покрытий преимущественно используются CO₂-лазеры с фиксированной длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм [10, 11], имеется опыт применения CO₂-лазера с перестраиваемой длиной волны $\lambda = 9-12$ мкм [12]. При использовании данных типов лазеров актуальны режимы постобработки покрытий при мощности излучения до 3,8 кВт и скоростях сканирования до 10 мм/с. Для ЛТО HVOF-покрытий известно применение мощных непрерывных диодных лазеров с максимальной мощностью до 1,5 кВт [13, 14]. При ЛТО керамических покрытий нашли применение импульсные [15] и непрерывные [16] Nd:YAG-лазеры, мощность которых варьируется в пределах 0,4–3,0 кВт, скорость сканирования – от 0,5 до 5 м/мин, энергия в импульсе – до 55 Дж.

Влияние лазерной постобработки на основные эксплуатационные свойства ГТП

В настоящее время накоплен значительный опыт по лазерной модификации керамических покрытий на основе $ZrO_2-7\% Y_2O_3$, Cr_3C_2-NiCr , Al_2O_3 , покрытий системы Ni-Cr-B-Si, а также покрытий на основе WC, нанесенных с помощью технологий газотермического напыления. Лазерная модификация ГТП при использовании различных типов лазеров, режимов обработки и методов нанесения покрытий способна оказывать положительное влияние на их основные эксплуатационные свойства, а именно: микроструктуру, коррозионную стойкость, микротвердость, износостойкость, коэффициент трения, остаточные напряжения и некоторые другие.

Изменение структуры [13, 15–18]. Использование Nd:YAG-лазера при обработке керамических покрытий при мощности лазерного излучения 0,4–3,0 кВт обеспечивает более высокую плотность покрытий, снижает дисперсность их структуры, в этом случае устраняются такие недостатки, как высокая степень порообразования, количество пор снижается с 14,3 % до 2,5 % [15, 16]. ЛО керамических покрытий (Al_2O_3 , ПН 85-Ю-15) с использованием CO₂-лазера также приводит к уменьшению порообразования примерно в 1,5 раза (рис. 2) [17].

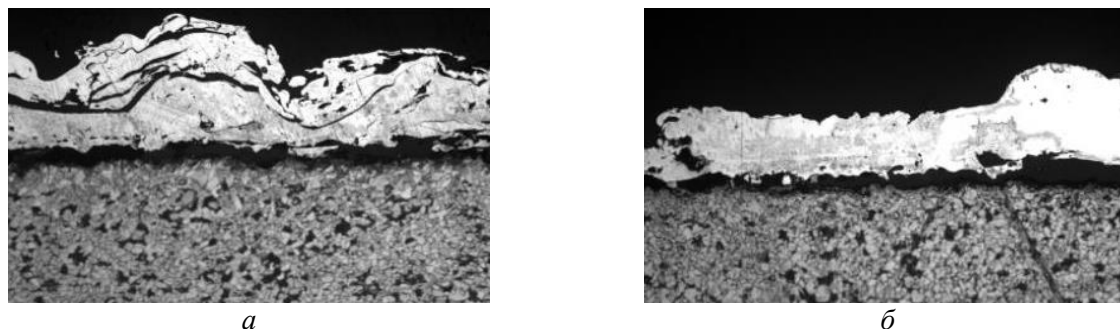


Рис. 2. Изменение структуры плазменного покрытия на основе сплава ПН 85-Ю-15 [17]:
a – покрытие в исходном состоянии; *б* – покрытие после ЛО

Эффект уменьшения пористости наблюдается при ЛО покрытия на основе карбида вольфрама [13]. Покрытие, нанесенное на цилиндрическую поверхность и обработанное ЛИ со скоростью (1,5 об/с) и мощностью 600–800 Вт, становится более плотным (рис. 3, *в*), подобный результат наблюдался и в работе [18], где говорится о практически нулевой пористости после лазерного переплава.

Уменьшение скорости сканирования, как и увеличение мощности ЛИ, приводит к грубой морфологии покрытия, что связано с попаданием окружающей среды (воздуха/частиц газа) в повторно расплавленный материал покрытия во время лазерной постобработки, в результате чего внутри покрытия образуются крупные газовые полости (рис. 3, *б*). Подобные изменения в микроструктуре покрытия наблюдаются за счет повторного быстрого нагрева и переплава материала с последующим быстрым охлаждением.

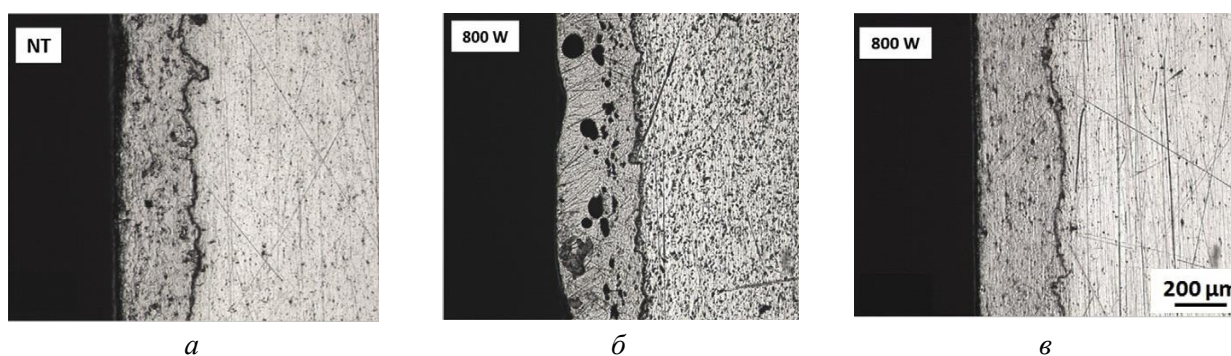


Рис. 3. Поперечный шлиф покрытия WC-Co/NiCr на подложке из алюминиевого сплава АА 6082 Т6 [13]:
a – без ЛО; *б, в* – после ЛО (скорость сканирования: *б* – 0,3 об/с; *в* – 1,5 об/с)

Коррозионная стойкость [19–22]. Лазерная постобработка покрытий вносит существенные изменения в их коррозионные свойства. На поведение покрытий в агрессивных средах оказывает влияние множество факторов, к ним относятся химический состав, микроструктура, наличие дефектов (пористость и включения) в покрытии [19, 21]. Коррозионный потенциал определяется фазовой структурой покрытия и окружающей его агрессивной средой. Уменьшение размера и количества пор, улучшение адгезии поверхности раздела являются важными мерами для предотвращения полного разрушения покрытия [20].

Для HVOF-покрытия WC-24%Cr₃C₂-6%Ni на подложке из сплава Inconel 718 [20] после лазерной постобработки потенциал разомкнутой цепи в результате испытаний в 3,5 %-ном растворе NaCl сдвигается в положительную сторону, т.е. покрытие после ЛО, имея более плотную структуру, эффективно защищает материал подложки от коррозии. Согласно данным потенциодинамической поляризации плотность тока коррозии для покрытия после лазерной постобработки меньше и более стабильна, что позволяет говорить о повышении стойкости такого покрытия к поверхностной коррозии.

Для покрытия на основе композиции Inconel 625 + 12 % WC потенциодинамические испытания в 0,5М растворе NaCl показывают, что коррозионная стойкость покрытия после лазерной постобработки выше, чем у необработанного покрытия. Это объясняется минимизацией количества пор [22]. Коррозионные

свойства HVOF-покрытий на основе порошка сплава T800 (CoMoCrSi) и WC до и после ЛО ($P = 450\text{--}550$ Вт, $V = 3$ мм/с) были оценены с помощью электрохимической импедансной спектроскопии в 0,5M растворе H_2SO_4 и иммерсионных испытаний в 3M растворе H_2SO_4 в течение 72 ч [20]. Коррозионная стойкость HVOF-покрытий в результате лазерной постобработки улучшена за счет устранения/уменьшения микроструктурных дефектов покрытий. Для покрытия T800 + 21 % WC удельное переходное сопротивление контакта покрытие/подложка после ЛО возросло с 3750 до 15100 Ом·см², что говорит о значительном повышении его коррозионной стойкости.

Микротвердость [13, 19, 20, 23–27]. Лазерная постобработка оказывает заметное влияние на микротвердость HVOF-покрытий. Увеличение твердости фиксируется для покрытий WC-10Co-4Cr, обработанных с помощью ЛИ как в импульсном [23], так и в непрерывном режиме [19, 23]. После непрерывной ЛО твердость покрытия равная 1780–1860 HV_{0,3}, на 45–47 % выше твердости необработанных покрытий [23], а для покрытий WC-24%Cr₃C₂-6%Ni – на 37,2 % [20]. При этом после непрерывной ЛО существенно возрастает однородность покрытия. При импульсной обработке наблюдается повышение количества микротрещин.

За счет повторного переплава поверхности примерно на 30 % возрастает микротвердость как HVOF-покрытия WC-10Co-4Cr на подложке из низкоуглеродистой стали [24], так и покрытия WC-Co/NiCr на подложке из алюминиевого сплава AA 6082 T6 [13]. При ЛО HVOF-покрытий WC-CrC-Ni на подложке из жаропрочного сплава Inconel 718 микротвердость покрытия увеличилась с 982,9 HV до 1277,0 HV [25], но неравномерно распределилась по глубине в отличие от результатов работ [23], что может быть связано с теплофизическими характеристиками материала покрытия и уменьшением зоны термического воздействия [25]. Между тем при увеличении скорости лазерного сканирования с 300 до 600 мм/мин микротвердость HVOF-покрытия снижается (рис. 4).

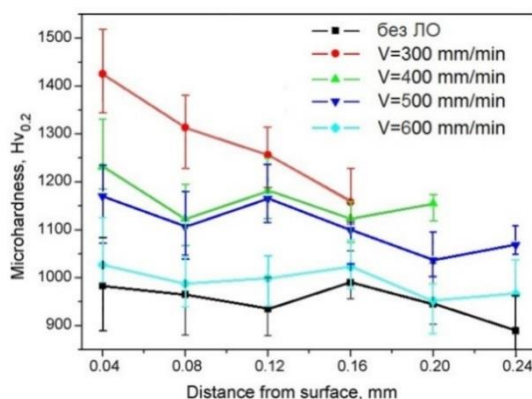


Рис. 4. Зависимость микротвердости от скорости сканирования [25]

ЛО покрытий из порошковых композиций промышленного производства (на основе Ni, Cr, Fe, порошков ПР-Х18Р9, ПН 85-Ю-15, самофлюсующихся сплавов ПГ-10Н-01 и РГ-12Н-1, Al_2O_3) позволяет получать более высокую микротвердость данных покрытий. Так, например, при ЛО с использованием непрерывного CO_2 -лазера (мощность излучения 400 Вт, скорость сканирования 6,5 мм/с) в режиме без оплавления наблюдалось повышение микротвердости по глубине покрытия до HV 1400–1800 при исходной микротвердости HV 1100–1250 [26]. При лазерной постобработке покрытия Cr₃C₂-25%NiCr с помощью диодного лазера с длиной волны 807 нм при вариации мощности от 100 до 200 Вт и скорости сканирования от 2 до 8 мм/с удалось добиться повышения микротвердости покрытия до HV 1032 при исходной микротвердости HV 800 [27].

Износостойкость [13, 18, 25, 28–30]. С использованием ЛТО удается повысить износостойкость покрытий на основе карбида вольфрама в определенных пределах в зависимости от режимов обработки. После постобработки с использованием CO_2 -лазера при трибоиспытаниях зафиксирован рост износостойкости HVOF-покрытий WC-Co/NiCr примерно на 30 % [13]. Оценка фрикционных свойств была выполнена с помощью линейного трибометра. Лазерная обработка ($P = 400$ Вт, $V = 400$ мм/мин) HVOF-покрытия WC-CrC-Ni на подложке из сплава Inconel 718 [28] после трибоиспытаний приводит к уменьшению коэффициента трения и глубины износа с 52 мкм для сплава Inconel 718 до 11 мкм для покрытия после ЛО (рис. 5).

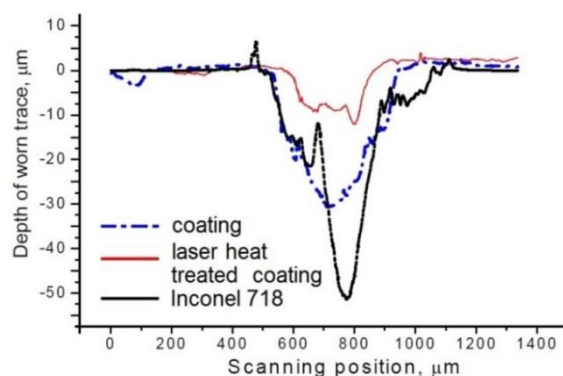


Рис. 5. Профиль трека износа [28]

Снижение коэффициента трения HVOF-покрытия WC-10Co-4Cr наблюдается и при использовании непрерывного волоконного лазера [29]. Здесь удалось добиться снижения износа на 10–20 % в условиях трения скольжения по схеме «диск – палец» при нагрузке 200 Н. В работе [30] было установлено большее снижение коэффициента трения для WC-10Co-4Cr HVOF-покрытия после лазерной постобработки ($P = 400$ Вт; $V = 10$ мм/с) с величины 0,44 до значения 0,11 при подобной схеме испытания. Повышению износостойкости покрытия способствовало образование фаз W_2C и Co_3W_3C .

Значительное увеличение износостойкости покрытий после лазерной постобработки, как и для покрытий на основе карбида вольфрама, наблюдается для керамических покрытий. Трибологические испытания по схеме «штифт – диск» без смазки показывают увеличение износостойкости керамического покрытия на основе ZrO_2 в 4–5 раз (рис. 6).

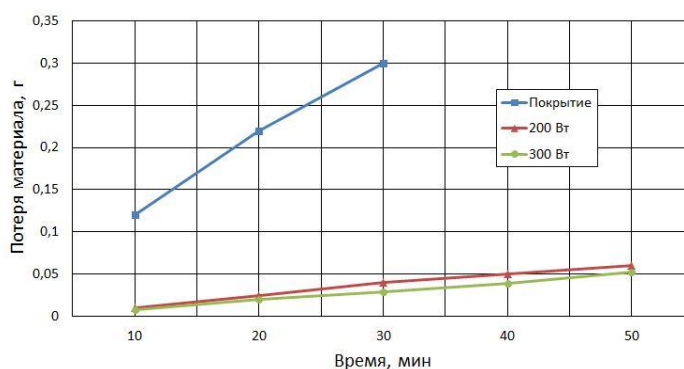


Рис. 6. Изменение износостойкости керамического покрытия [15]

Важно отметить, что повышение микротвердости рассматриваемых покрытий и уменьшение порообразования обуславливают рост их износостойкости.

Выводы

Анализ исследований в области лазерной постобработки ГТП свидетельствует о перспективности применения данного метода для повышения эксплуатационных характеристик функциональных покрытий. Это подтверждают следующие результаты:

- наиболее целесообразна ЛО покрытий с оплавлением поверхности. Лазерный переплав позволяет получать структуры с улучшенными прочностными свойствами. Однако при ЛО покрытий следует избегать чрезмерного перегрева покрытия, поскольку такая обработка может вызвать повышенную дефектность и последующее разрушение покрытия;
- для ГТП предпочтительнее применять непрерывную ЛО, в этом случае достигается более равномерное распределение физико-механических свойств;
- ЛО покрытий позволяет уменьшить порообразование в 2–6 раз, увеличить адгезионную прочность покрытия и металлической основы, после лазерной постобработки микротвердость покрытий повышается на 20–50 %;
- увеличение микротвердости и снижение пористости имеют решающее значение для улучшения трибологических характеристик покрытий. Коэффициент трения снижается в среднем на 20–65 %, а ско-

рость износа – на 60 % и более. Повышению износостойкости покрытий способствуют структурно-фазовые изменения в зоне лазерного переплава;

– лазерная постобработка покрытий позволяет повысить их коррозионную стойкость более чем на 50 %. Улучшение коррозионной стойкости обусловлено гомогенизацией структуры, устранением дискретной точечной структуры, микротрещин и пористости.

Следует также отметить, что большое количество работ, опубликованных за последние годы в данной области исследования, свидетельствует о значительном росте интереса к теме лазерной модификации поверхности ГТП и перспективности данного способа модификации ГТП.

Список литературы

1 Газотермическое напыление : учебное пособие / Л. Х. Балдаев [и др.] ; под общ. ред. Л. Х. Балдаева. – Москва : Маркет ДС, 2007. – 344 с. – ISBN 978-5-7958-0146-9.

2 **Коробов, Ю. С.** Анализ свойств газотермических покрытий. Часть 1 : Основные методы и материалы газотермического напыления / Ю. С. Коробов, В. И. Панов, Н. М. Разиков. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2016. – 80 с. – ISBN 978-5-7996-1966-4.

3 **Kumar, R.** Thermal spray coating : a study / R. Kumar, S. Kumar // Int. J. Eng. Sci. Research Technol. – 2018. – Vol. 7 (3). – P. 610–617. – DOI 10.5281/ZENODO.1207004.

4 **Berger, L.–M.** Application of hardmetals as thermal spray coatings / L.–M. Berger // Int. J Refract. Hard Met. – 2015. – Vol. 49. – P. 350–364. – DOI 10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029.

5 **Prashar, G.** Influence of heat treatment on surface properties of HVOF deposited WC and Ni-based powder coatings : a review / G. Prashar, H. Vasudev, L. Thakur // Surf. Topogr. : Metrol. Prop. – 2021. – Vol. 9. – 043002. – DOI 10.1088/2051-672X/ac3a52.

6 **Ghadami, F.** Improvement of high velocity oxy-fuel spray coatings by thermal post treatments : A critical review / F. Ghadami, A. Sabour Rouh Aghdam // Thin Solid Films. – 2019. – Vol. 678 (6). – P. 42–52. – DOI 10.1016/j.tsf.2019.02.019.

7 **Panziera, R. C.** Study of the effects of the laser remelting process on the microstructure and properties of the WC-10Co-4Cr coating sprayed by HVOF / R. C. Panziera, A. C. C. de Oliveira, M. Pereira, F. Ratszunei // J Braz. Soc. Mech. Sci. – 2020. – Vol. 42 (3). – P. 1–8. – DOI 10.1007/s40430-020-2201-1.

8 Diagnostic of laser remelting of HVOF sprayed Stellite coatings using an infrared camera / M. Vostřák, J. Tesař, Š. Houdková [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2017. – Vol. 318. – P. 360–364. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2016.12.118.

References

1 Gas thermal spraying : textbook / L. Kh. Baldaev [et al.] ; under general ed. L. Kh. Baldaev. – Moscow : Market DS, 2007. – 344 p. – ISBN 978-5-7958-0146-9.

2 **Korobov, Yu. S.** Analysis of the properties of gas-thermal coatings. Part 1 : Basic methods and materials of thermal spraying / Yu. S. Korobov, V. I. Panov, N. M. Razikov. – Ekaterinburg : Ural University Publishing House, 2016. – 80 p. – ISBN 978-5-7996-1966-4.

3 **Kumar, R.** Thermal spray coating : a study / R. Kumar, S. Kumar // Int. J. Eng. Sci. Research Technol. – 2018. – Vol. 7 (3). – P. 610–617. – DOI 10.5281/ZENODO.1207004.

4 **Berger, L.–M.** Application of hardmetals as thermal spray coatings / L.–M. Berger // Int. J Refract. Hard Met. – 2015. – Vol. 49. – P. 350–364. – DOI 10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029.

5 **Prashar, G.** Influence of heat treatment on surface properties of HVOF deposited WC and Ni-based powder coatings : a review / G. Prashar, H. Vasudev, L. Thakur // Surf. Topogr. : Metrol. Prop. – 2021. – Vol. 9. – 043002. – DOI 10.1088/2051-672X/ac3a52.

6 **Ghadami, F.** Improvement of high velocity oxy-fuel spray coatings by thermal post treatments : A critical review / F. Ghadami, A. Sabour Rouh Aghdam // Thin Solid Films. – 2019. – Vol. 678 (6). – P. 42–52. – DOI 10.1016/j.tsf.2019.02.019.

7 **Panziera, R. C.** Study of the effects of the laser remelting process on the microstructure and properties of the WC-10Co-4Cr coating sprayed by HVOF / R. C. Panziera, A. C. C. de Oliveira, M. Pereira, F. Ratszunei // J Braz. Soc. Mech. Sci. – 2020. – Vol. 42 (3). – P. 1–8. – DOI 10.1007/s40430-020-2201-1.

8 Diagnostic of laser remelting of HVOF sprayed Stellite coatings using an infrared camera / M. Vostřák, J. Tesař, Š. Houdková [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2017. – Vol. 318. – P. 360–364. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2016.12.118.

9 Особенности процесса лазерного оплавления газотермических покрытий / Л. Х. Балдаев, Д. З. Ишмухаметов, М. В. Ершов, В. С. Шарыгин // Трубопроводная арматура и оборудование (ТПА). – 2014. – № 6 (75). – С. 40–42. – ISSN 2218-9203.

10 **Triantafyllidis, D.** Crack-free densification of ceramics by laser surface treatment / D. Triantafyllidis, L. Li, F. H. Stott // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 201. – No. 6. – P. 3163–3173. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2006.06.032.

11 Effect of laser remelting of plasma sprayed coating of Cr-Ni-Re / P. Śliwiński, M. S. Węglowski, J. Dworak [et al.] // *IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng.* – 2021. – Vol. 1140. – No. 1. – P. 012054. – DOI 10.1088/1757-899X/1140/1/012054.

12 Laser Surface Modification of Ceramic Coating Materials / N. Al Harbi, K. Y Benyounis, L. Looney, J. Stokes // In book : *Encyclopedia of Smart Materials*. – Publisher : Elsevier, 2018. – DOI 10.1016/B978-0-12-803581-8.11386-4.

13 Improvement of thermally sprayed WC-Co/NiCr coatings by surface laser processing / A. Gisario, M. Puopolo, S. Venettacci [et al.] // *Int. J Refract. Hard Met.* – 2015. – Vol. 52. – P. 123–130. – DOI 10.1016/j.ijrmhm.2015.06.001.

14 **Gisario, A.** Laser surface modification (LSM) of thermally-sprayed Diamalloy 2002 coating / A. Gisario, M. Barletta, F. Veniali / *Opt. Laser Technol.* – 2012. – Vol. 44. – No. 6. – P. 1942–1958. – DOI 10.1016/j.optlastec.2012.02.011.

15 Wear behavior of laser-treated plasma-sprayed ZrO₂ coatings / Y. Fu, A. W. Batchelor, H. Xing, Y. Gu // *Wear*. – 1997. – Vol. 210. – No. 1–2. – P. 157–164. – DOI 10.1016/S0043-1648(97)00058-6.

16 Лазерная модификация плазменнанесенных покрытий / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, А. П. Грищенко [и др.] // *Вісник двигунобудування*. – 2009. – № 2. – С. 69–72.

17 Модифицирование газотермических покрытий воздействием излучения CO₂-лазера / А. А. Митрофанов, Е. А. Чашин, С. А. Балашова, А. Х. Харахашев // *Advanced Engineering Research*. – 2014. – Т. 14. – № 3 (78). – С. 103–110. – ISSN 2687-1653.

18 Tribological properties of plasma sprayed and laser re-melted 75/25 Cr₃C₂/NiCr coatings / J. Mateos, J. M. Cuetos, E. Fernandez, R. Vijande // *Tribol. Int.* – 2001. – Vol. 34. – P. 345–351. – DOI 10.1016/S0301-679X(01)00023-8.

9 Features of the process of laser melting of gas-thermal coatings / L. Kh. Baldaev, D. Z. Ishmukhametov, M. V. Ershov, V. S. Sharygin // *Pipe fittings and equipment (TPA)*. – 2014. – No. 6 (75). – P. 40–42. – ISSN 2218-9203.

10 **Triantafyllidis, D.** Crack-free densification of ceramics by laser surface treatment / D. Triantafyllidis, L. Li, F. H. Stott // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 201. – No. 6. – P. 3163–3173. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2006.06.032.

11 Effect of laser remelting of plasma sprayed coating of Cr-Ni-Re / P. Śliwiński, M. S. Węglowski, J. Dworak [et al.] // *IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng.* – 2021. – Vol. 1140. – No. 1. – P. 012054. – DOI 10.1088/1757-899X/1140/1/012054.

12 Laser Surface Modification of Ceramic Coating Materials / N. Al Harbi, K. Y Benyounis, L. Looney, J. Stokes // In book : *Encyclopedia of Smart Materials*. – Publisher : Elsevier, 2018. – DOI 10.1016/B978-0-12-803581-8.11386-4.

13 Improvement of thermally sprayed WC-Co/NiCr coatings by surface laser processing / A. Gisario, M. Puopolo, S. Venettacci [et al.] // *Int. J Refract. Hard Met.* – 2015. – Vol. 52. – P. 123–130. – DOI 10.1016/j.ijrmhm.2015.06.001.

14 **Gisario, A.** Laser surface modification (LSM) of thermally-sprayed Diamalloy 2002 coating / A. Gisario, M. Barletta, F. Veniali / *Opt. Laser Technol.* – 2012. – Vol. 44. – No. 6. – P. 1942–1958. – DOI 10.1016/j.optlastec.2012.02.011.

15 Wear behavior of laser-treated plasma-sprayed ZrO₂ coatings / Y. Fu, A. W. Batchelor, H. Xing, Y. Gu // *Wear*. – 1997, V. 210. – No. 1–2. – P. 157–164. – DOI 10.1016/S0043-1648(97)00058-6.

16 Laser modification of plasma-applied coatings / V. D. Shelyagin, V. Yu. Khaskin, A. P. Grishchenko [et al.] // *News of Dvigunobuduvannya*. – 2009. – No. 2. – P. 69–72.

17 Modification of gas-thermal coatings by exposure to CO₂ laser radiation / A. A. Mitrofanov, E. A. Chashchin, S. A. Balashova, A. Kh. Kharakhashev // *Advanced Engineering Research*. – 2014. – Vol. 14. – No. 3 (78). – P. 103–110. – ISSN 2687-1653.

18 Tribological properties of plasma sprayed and laser re-melted 75/25 Cr₃C₂/NiCr coatings / J. Mateos, J. M. Cuetos, E. Fernandez, R. Vijande // *Tribol. Int.* – 2001. – Vol. 34. – P. 345–351. – DOI 10.1016/S0301-679X(01)00023-8.

19 Characterization of microstructure and surface properties of hybrid coatings of WC–CoCr prepared by laser heat treatment and high velocity oxygen fuel spraying / S. H. Zhang, T. Y. Cho, J. H. Yoon [et al.] // *Materials Characterization*. – 2008. – Vol. 59 (10). – P. 1412–1418. – DOI 10.1016/j.matchar.2008.01.003.

20 Influence of CO₂ laser heat treatment on surface properties, electrochemical and tribological performance of HVOF sprayed WC–24%Cr₃C₂–6%Ni coating / S. H. Zhang, J. H. Yoon, M. X. Li [et al.] // *Mater. Chem. Phys.* – 2010. – Vol. 119 (3). – P. 458–464. – DOI 10.1016/j.matchemphys.2009.09.025.

21 Corrosion resistance of HVOF-sprayed coatings for hard chrome replacement / G. Bolelli, R. Giovanardi, L. Lusvardi, T. Manfredini // *Corros. Sci.* – 2006. – Vol. 48 (11). – P. 3375–3397. – DOI 10.1016/j.corsci.2006.03.001.

22 **Yilbas, B.** Effects of laser re-melting on the corrosion properties of HVOF coatings / B. Yilbas, I. Toor, F. Patel // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2013. – Vol. 22 (5). – P. 1505–1511. – DOI 10.1007/s11665-012-0428-4.

23 Characterisation of Laser Modified WC-CoCr Coatings / E. Chikarakara, M. Punset, J.A. Picas [et al.] // *AIP Conf. Proc.* – 2011. – Vol. 1353. – No. 1. – P. 1087–1092. – DOI 10.1063/1.3589661.

24 Surface modification of HVOF thermal sprayed WC–CoCr coatings by laser treatment / E. Chikarakara, S. Aqida, D. Brabazon [et al.] // *Int J Mater Form.* – 2010. – Vol. 3. – P. 801–804. – DOI 10.1007/s12289-010-0891-0.

25 Investigation on microstructure, surface properties and anti-wear performance of HVOF sprayed WC–CrC–Ni coatings modified by laser heat treatment / S.-H. Zhang, T.-Y. Cho, J.-H. Yoon [et al.] // *Mater. Sci. Eng. B.* – 2009. – Vol. 162. – No. 2. – P. 127–134. – DOI 10.1016/j.mseb.2009.03.017.

26 Ceramic surface modifications induced by pulsed laser treatment / E. Cappelli, S. Orlando, D. Sciti [et al.] // *Applied Surface Science.* – 2000. – Vol. 154. – P. 682–688. – DOI 10.1016/S0169-4332(99)00422-5.

27 Surface modification of Cr₃C₂–NiCr cermet coatings by direct diode laser / J. Morimoto, Y. Sasaki, S. Fukuhara [et al.] // *Vacuum.* – 2006. – Vol. 80 (11–12). – P. 1400–1405. – DOI 10.1016/j.vacuum.2006.01.070.

28 Wear and Corrosion Resistances of Inconel718, HVOF coating of WC-metal Powder and Laser Heat-treated coating / H. G. Chun, Y. K. Joo, J. H. Yoon [et al.] // *Appl. Mech. Mater.* – 2013. – Vol. 419. – P. 381–387. –

19 Characterization of microstructure and surface properties of hybrid coatings of WC–CoCr prepared by laser heat treatment and high velocity oxygen fuel spraying / S. H. Zhang, T. Y. Cho, J. H. Yoon [et al.] // *Materials Characterization*. – 2008. – Vol. 59 (10). – P. 1412–1418. – DOI 10.1016/j.matchar.2008.01.003.

20 Influence of CO₂ laser heat treatment on surface properties, electrochemical and tribological performance of HVOF sprayed WC–24%Cr₃C₂–6%Ni coating / S. H. Zhang, J. H. Yoon, M. X. Li [et al.] // *Mater. Chem. Phys.* – 2010. – Vol. 119 (3). – P. 458–464. – DOI 10.1016/j.matchemphys.2009.09.025.

21 Corrosion resistance of HVOF-sprayed coatings for hard chrome replacement / G. Bolelli, R. Giovanardi, L. Lusvardi, T. Manfredini // *Corros. Sci.* – 2006. – Vol. 48 (11). – P. 3375–3397. – DOI 10.1016/j.corsci.2006.03.001.

22 **Yilbas, B.** Effects of laser re-melting on the corrosion properties of HVOF coatings / B. Yilbas, I. Toor, F. Patel // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2013. – Vol. 22 (5). – P. 1505–1511. – DOI 10.1007/s11665-012-0428-4.

23 Characterisation of Laser Modified WC-CoCr Coatings / E. Chikarakara, M. Punset, J.A. Picas [et al.] // *AIP Conf. Proc.* – 2011. – Vol. 1353. – No. 1. – P. 1087–1092. – DOI 10.1063/1.3589661.

24 Surface modification of HVOF thermal sprayed WC–CoCr coatings by laser treatment / E. Chikarakara, S. Aqida, D. Brabazon [et al.] // *Int J Mater Form.* – 2010. – Vol. 3. – P. 801–804. – DOI 10.1007/s12289-010-0891-0.

25 Investigation on microstructure, surface properties and anti-wear performance of HVOF sprayed WC–CrC–Ni coatings modified by laser heat treatment / S.-H. Zhang, T.-Y. Cho, J.-H. Yoon [et al.] // *Mater. Sci. Eng. B.* – 2009. – Vol. 162. – No. 2. – P. 127–134. – DOI 10.1016/j.mseb.2009.03.017.

26 Ceramic surface modifications induced by pulsed laser treatment / E. Cappelli, S. Orlando, D. Sciti [et al.] // *Applied Surface Science.* – 2000. – Vol. 154. – P. 682–688. – DOI 10.1016/S0169-4332(99)00422-5.

27 Surface modification of Cr₃C₂–NiCr cermet coatings by direct diode laser / J. Morimoto, Y. Sasaki, S. Fukuhara [et al.] // *Vacuum.* – 2006. – Vol. 80 (11–12). – P. 1400–1405. – DOI 10.1016/j.vacuum.2006.01.070.

28 Wear and Corrosion Resistances of Inconel718, HVOF coating of WC-metal Powder and Laser Heat-treated coating / H. G. Chun, Y. K. Joo, J. H. Yoon [et al.] // *Appl. Mech. Mater.* – 2013. – Vol. 419. – P. 381–387. –

DOI 10.4028/www.scie-tific.net/AMM.419.381.

29 **Ярьско, С. И.** Лазерная непрерывная обработка газотермических покрытий WC-10Co-4Cr / С. И. Ярьско, И. А. Антошин // Pulsed Lasers and Laser Applications. Materials of the 16th International Conference AMPL–2023, 10–15 September, 2023. – Tomsk : STT Publishing House, 2023. – С. 56–61.

30 Laser Remelting of WC-CoCr Surface Coated by HVOF : Effect on the Tribological Properties and Energy Efficiency / R. De Medeiros Castro, E. Curi, L. F. Feltrim Inacio [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2021. – No. 427 (4). – 127841. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2021.127841.

Y. K. Joo, J. H. Yoon [et al.] // Appl. Mech. Mater. – 2013. – Vol. 419. – P. 381–387. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.419.381.

29 **Yaresko, S. I.** Continuous laser processing of gas-thermal coatings WC-10Co-4Cr / S. I. Yaresko, I. A. Antoshin // Pulsed Lasers and Laser Applications. Materials of the 16th International Conference AMPL–2023, 10–15 September, 2023. – Tomsk : STT Publishing House, 2023. – P. 56–61.

30 Laser Remelting of WC-CoCr Surface Coated by HVOF : Effect on the Tribological Properties and Energy Efficiency / R. De Medeiros Castro, E. Curi, L. F. Feltrim Inacio [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2021. – No. 427 (4). – 127841. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2021.127841.

I. A. Antoshin, S. I. Yaresko

LASER POSTPROCESSING OF CERAMIC AND TUNGSTEN CARBIDE HVOF COATINGS

Abstract. The article analyzes the current state of research in the field of laser post-processing of ceramic and tungsten carbide coatings applied using thermal spraying (TS) technologies. It is shown that laser processing with surface melting is the most appropriate. Laser remelting makes it possible to obtain coatings with improved strength properties. It was found that the structure of thermal spray coatings (TSC) changed significantly, the dispersion and porosity decreased, and their performance characteristics, such as wear resistance, hardness, and corrosion resistance, increased. The reasons for the observed changes in the structural and strength characteristics of coatings after laser heat treatment (LHT) of HVOF coatings with remelting are indicated and recommendations for choosing processing modes are given.

Keywords: laser processing, thermal spray coating, wear resistance, microhardness, structure, performance characteristics.

For citation: Antoshin, I. A. Laser postprocessing of ceramic and tungsten carbide HVOF coatings / I. A. Antoshin, S. I. Yaresko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 17–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_17.

Сведения об авторах

Антошин Илья Александрович

Самарский государственный
технический университет (СГТУ),
аспирант,
e-mail: ilyaantoshin16@mail.ru

Ярьско Сергей Игоревич

Самарский филиал Физического
института им. П. Н. Лебедева РАН,
доктор технических наук, заведующий
лабораторией лазерно-индуцированных
процессов,
e-mail: yarsi54@gmail.com

Information about the authors

Antoshin Ilya Aleksandrovich

Samara State Technical University (SSTU),
Postgraduate Student,
e-mail: ilyaantoshin16@mail.ru

Yaresko Sergey Igorevich

Samara Branch of P. N. Lebedev Physical
Institute of the Russian Academy of Sciences,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Laboratory of Laser-Induced
Processes (LLIP),
e-mail: yarsi54@gmail.com

А. Н. Балалаев, А. В. Жебанов, С. В. Коркина

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБОДА КОЛЕСА ГРУЗОВОГО ВАГОНА В ПРОЦЕССЕ ТОРМОЖЕНИЯ

Аннотация. С целью соблюдения безопасности движения и контроля за параметрами вагонов в пути следования при походе к ПТО устанавливаются различные средства диагностики составных частей. В рамках реализации проектов по организации работы «безлюдных станций» на путях общего пользования размещается оборудование для контроля деталей и узлов грузового вагона (кузова, ходовых частей, тормозного оборудования). Выявление неисправностей тормозного оборудования заключается в обнаружении отсутствующих, волочащихся деталей и заклинивания колесных пар, например, при неправильной регулировке тормозной рычажной передачи. Рассматривается вопрос об использовании средств диагностики КТСМ-03 для выявления повышенного нагрева колесных пар при снижении скорости поезда на заданную величину в пределах контрольного участка. Определен температурный диапазон на ободе колеса грузового вагона, участвовавшего в процессе торможения, в зависимости от всех возможных соотношений параметров тормозного оборудования, находящихся в допустимых для эксплуатации пределах. Найденное расчетным путем значение максимального нагрева колеса от прижатия колодки к поверхности катания будет пороговым браковочным значением при контроле исправности тормозной системы средствами диагностики КТСМ-03.

Ключевые слова: грузовой вагон, процесс торможения, параметры тормозного оборудования, температура колеса, диагностика тормозов.

Для цитирования: Балалаев, А. Н. Распределение расчетной температуры обода колеса грузового вагона в процессе торможения / А. Н. Балалаев, А. В. Жебанов, С. В. Коркина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 26–37. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_1_26.

Введение

Тормозное оборудование грузового вагона по количеству отказов при эксплуатации подвижного состава постоянно занимает 3-е место среди всех остальных узлов. Процесс контроля исправного действия тормозов вагонов имеет большое значение в организации технического обслуживания на ПТО и представляет собой часто повторяющуюся операцию, обособленно проводимую без осмотра других составных частей вагона. Диагностика тормозного оборудования проводится на ПТО при помощи автоматизированных установок (АСДТ) или от локомотива, но в пути следования в настоящее время также имеется возможность выявления некорректной работы тормозов [1–3].

Одной из возможных систем диагностики тормозного оборудования является комплекс, способный дистанционно контролировать параметры тормозной системы вагона по величине температуры диска колеса после выполненной ступени торможения [4].

Возможность расчета температурных полей при взаимодействии тормозной колодки и железнодорожного колеса обосновывалась в работе [5].

На работу тормозного оборудования абсолютно исправного грузового вагона помимо параметров пути и погодных условий влияет ряд других показателей. Даже если они находятся в регламентирующих пределах (в соответствии с нормативно-технической литературой) их совокупность может привести как к увеличению, так и к уменьшению температуры колеса при торможении. Отмечалось влияние на тормозную силу наличия допустимых дефектов у тормозной колодки [6] и жесткости элементов тормозной колодки [7].

Параметры колесных пар грузовых вагонов и тормозного оборудования, такие как давление в тормозном цилиндре, толщина тормозной колодки, толщина обода колеса, размеры «А» и «а», а также передаточное число и КПД тормозной рычажной передачи, являются случайными величинами, допустимое изменение которых установлено нормативно-технической документацией [8–10].

Большое влияние на эффективность торможения и на температуру колеса при торможении оказывает коэффициент трения в системе «колесо – тормозная колодка». При этом величина коэффициента

трения тормозной колодки определяется следующими факторами [11]: химический состав и форма колодки; сила нажатия тормозной колодки на поверхность катания колеса; величина износа тормозной колодки; степень влажности; продолжительность действия силы трения; Уровень нагрева (температура) тормозной колодки и поверхности катания колеса. К сожалению, авторы [11] привели в своей работе экспериментальные данные, полученные в основном при исследовании чугунных тормозных колодок, однако выводы были сделаны о любых типах колодок.

В работе [12] отмечено влияние обледенения и увлажнения композиционной тормозной колодки на ее коэффициент трения, приведены данные об изменении коэффициента трения с течением времени, согласно которым у обледенелой тормозной колодки коэффициент трения за первые 6 с торможения повышается от 0,05 до 0,25, а затем в течение 24 с его значение повышается до 0,35. Автор делает вывод, что за первые 6 с происходят таяние льда и просушка колодки, а следующий процесс торможения осуществляется при использовании сухой колодки.

Некоторые параметры колесных пар и тормозной системы грузового вагона влияют на эффективность торможения и на температуру колеса при торможении совместно. Так в работе [13] дана оценка влияния износов колеса и тормозной колодки на эффективность работы тормозной рычажной передачи. В работе [14] анализировалось влияние зазоров в тормозной рычажной передаче на эффективность торможения. В работе [15] выполнен анализ эксплуатационных зазоров при расчете выхода штока тормозного цилиндра в тормозной системе грузового вагона.

Подробный анализ влияния параметров тормозной колодки на эффективность торможения приведен в работе [16]. В работе [17] показано влияние величины износа тормозной колодки на ее температуру в процессе торможения.

Таким образом, анализ процесса нагрева колеса от взаимодействия поверхности катания с колодкой во время процесса торможения позволяет сделать вывод: при соблюдении всех геометрических параметров тормозного оборудования в пределах значений исправного состояния их соотношение влияет на температуру колес (поверхности катания или обода) множества вагонов, делая ее для них случайной величиной.

Большое внимание многие исследователи уделяли вопросам расчета температуры различных частей колеса при взаимодействии колеса с тормозной колодкой и колеса с рельсом во время торможения. Теоретическое обоснование возможности диагностики тормозной системы грузовых вагонов по результатам измерения температуры колеса при снижении скорости движения поезда приводилось в работах [18, 19]. Если в работе [20] автор моделировал нестационарные тепловые процессы при взаимодействии колеса и рельса в процессе торможения, то в работе авторов [21] рассматривались процессы нагрева колеса и от взаимодействия с рельсом, и от взаимодействия с тормозной колодкой. В работе [22] авторы установили наиболее информативную поверхность колеса (обод) для реализации целей контроля температуры колеса в процессе торможения и диагностирования тормозов грузового поезда.

Чтобы установить возможность применения браковочного критерия для диагностики тормозов по температуре обода колеса, сначала следует определить расчетным или экспериментальным путем максимального диапазона изменения величины температуры обода колеса в процессе торможения, уточнить ее методику осреднения.

Целью настоящего исследования является определение влияния различных геометрических параметров тормозного оборудования, находящихся в пределах значений исправного состояния, на температуру обода колеса в процессе торможения.

Основная часть

В работе [21] исследовалось влияние массы вагона, начального уровня скорости поезда, величины снижения скорости поезда в процессе торможения, состояния атмосферы (температура воздуха), а также расположения вагона в поезде (в голове, середине или хвосте поезда) на нагрев обода колеса – значение средней температуры обода колеса после процесса торможения. Эта температура определялась решением задачи о теплопроводности в нестационарных условиях методом конечных элементов. В качестве начальных условий принималась тепловая мощность, которая выделяется в месте контакта пары «колесо – тормозная колодка». Тепловая мощность определялась для заданной массы вагона из допущения о равенстве изменения кинетической энергии и выделившейся в месте контакта колес и тормозных колодок тепловой энергии. В данной постановке было невозможно установить влияние на среднюю температуру обода колеса различных параметров тормозной системы конкретного вагона, так как снижение скорости при торможении рассчитывалось по основным и дополнительным удельным сопротивлениям поезда, которые отражают среднестатистические параметры тормозной системы множества вагонов.

В данной работе тепловая мощность, выделяющаяся при взаимодействии колеса с тормозной колодкой, определяется в соответствии с [8] в зависимости от величины давления в тормозном цилиндре, выхода штока тормозного цилиндра, величины сжатия пружины авторегулятора тормозной рычажной передачи, площади тормозной колодки, которые для конкретного вагона могут изменяться в некоторых пределах. Величина теплового потока находится при этом из выражения

$$Q_k = \varphi_k \cdot K_d \cdot v_{sri}, \quad (1)$$

где φ_k – действительный коэффициент трения колодки; K_d – действительная сила тормозного нажатия колодки на колесо, кН; $v_{sri} = 0,5(v_{0i} + v_k)$ – средняя скорость i -го вагона в поезде, м/с; v_{0i} – скорость вагона в момент прохождения через его тормозную магистраль тормозной волны, м/с; v_k – скорость поезда в конце процесса торможения, м/с.

Величина действительного коэффициента трения колодки, входящая в уравнение (1), согласно [8, с. 12], находится для композиционных колодок по формуле:

$$\varphi_k = 0,44 \cdot \frac{(0,1K_d + 20)}{(0,4K_d + 20)} \cdot \frac{(V_{sri} + 150)}{(2V_{sri} + 150)}, \quad (2)$$

где $V_{sri} = 0,5(V_{0i} + V_k)$ – средняя скорость i -го вагона в поезде, км/ч; V_{0i} – скорость вагона в момент прохождения через его тормозную магистраль тормозной волны, км/ч; V_k – скорость поезда в конце процесса торможения, км/ч.

Величина действительной силы тормозного нажатия, приходящаяся на одну колодку, входящая в уравнения (1) и (2), находится по рекомендациям [8, с. 10] из выражения:

$$K_d = \frac{1}{m} \cdot \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \cdot P_c \cdot \eta_c - F_1 - F_2 \right) \cdot n \cdot \eta_p, \quad (3)$$

где m – число колодок, приходящихся на один тормозной цилиндр; D_c – площадь поршня тормозного цилиндра, м²; P_c – давление в тормозном цилиндре, кПа; $\eta_c = 0,98$ – КПД тормозного цилиндра, согласно [8]; F_1 – сила сжатия отпускной пружины тормозного цилиндра, кН; F_2 – сила сжатия пружины авторегулятора тормозной рычажной передачи, кН; $n = 5,9$ – передаточное отношение тормозной рычажной передачи; $\eta_p = 0,95$ – КПД тормозной рычажной передачи, согласно [8].

Величина диаметра поршня тормозного цилиндра D_c связана с числом колодок, приходящихся на один тормозной цилиндр m , следующим образом: если у вагона один тормозной цилиндр, то $D_c = 0,356$ м, а $m = 8$, если у вагона по тележечное торможение и два тормозных цилиндра, то $D_c = 0,254$ м и $m = 4$.

Величина давления в тормозном цилиндре P_c на первой ступени торможения, входящая в уравнение (3), регламентирована документом [10, с. 17], в соответствии с которым минимальное значение P_c для порожнего вагона равно 80 кПа, значение P_c для груженого вагона без установки авторежима при включении воздухораспределителя на средний режим равно 90 кПа, максимальное значение P_c для груженого вагона равно 100 кПа.

Величина силы сжатия отпускной пружины тормозного цилиндра F_1 , входящая в уравнение (3), согласно [8, с. 11], находится из выражения:

$$F_1 = P_0 + G_c \cdot L_{sc}, \quad (4)$$

где P_0 – сила предварительного сжатия отпускной пружины тормозного цилиндра, для тормозного цилиндра $D_c = 0,356$ м $P_0 = 1,56$ кН, для тормозного цилиндра $D_c = 0,254$ м $P_0 = 0,883$ кН [8, с. 20]; G_c – жесткость отпускной пружины тормозного цилиндра для тормозного цилиндра $D_c = 0,356$ м $G_c = 6,45$ кН/м, для тормозного цилиндра $D_c = 0,254$ м $G_c = 2,3$ кН/м [8, с. 20]; L_{sc} – выход штока тормозного цилиндра, для тормозного цилиндра $D_c = 0,356$ м при выполнении ступени торможения при использовании композиционных тормозных колодок $L_{sc} = 0,04 \dots 0,08$ м [9, с. 63], для тормозного цилиндра $D_c = 0,254$ м с максимальным выходом штока 125 мм $L_{sc} = 0,025 \dots 0,065$ м [8, с. 19].

Величина силы сжатия пружины авторегулятора тормозной рычажной передачи F_2 , входящая в уравнение (3), согласно [8, с. 11] находится из выражения

$$F_2 = (P_r + G_r \cdot L_r) \cdot n, \quad (5)$$

где $P_r = 0,883$ кН – сила предварительного сжатия пружины авторегулятора; $G_r = 20,3$ кН/м – жесткость пружины авторегулятора; $L_r = 0,01 \dots 0,0131$ м – величина сжатия пружины авторегулятора; $n_r = 0,47$ – передаточное отношение привода (рычажного) авторегулятора тормозной рычажной передачи [8, с. 21].

Величина средней скорости i -го вагона в поезде V_{sri} (v_{sri}), входящая в уравнения (1) и (2), определяется длиной и массой состава, скоростью прохождения тормозной волны, расстоянием от вагона в поезде до локомотива, а также зависит от скоростей начала V_0 и конца V_k торможения поезда. Если принять значение начальной скорости торможения поезда $V_0 = 60$ км/ч, значение конечной скорости $V_k = 40$ км/ч, то скорость вагона в момент прохождения через его тормозную магистраль тормозной волны V_{0i} может быть найдена из выражения, приведенного в [21, с. 11], полученного из тормозных расчетов по рекомендациям [10] для массы состава 1800 т и длины состава 812 м:

$$V_{0i} = 60,126 - 1,916 \cdot \tau + 0,016 \cdot \tau, \quad (6)$$

где τ – время, определяемое, как частное от деления расстояния вагона в поезде до локомотива на скорость тормозной волны, с. Так, при скорости тормозной волны 180 м/с для вагона в хвосте поезда (расстояние до локомотива 800 м) скорость вагона в момент прохождения через его тормозную магистраль тормозной волны по формуле (6) $V_{0i} = 52,8$ км/ч или $v_{0i} = 14,66$ м/с.

Анализ величин, входящих в выражения (1)–(6) и заданных диапазонами их изменения, показал, что вариативность величины теплового потока Q_k , входящего в колесо при торможении, зависит от таких параметров тормозной системы, как выход штока тормозного цилиндра L_{sc} , сжатие пружины регулятора тормозной рычажной передачи L_r , количество тормозных цилиндров на вагоне, давление воздуха в тормозном цилиндре, а также от средней скорости i -го вагона в поезде.

В табл. 1 представлены значения указанных параметров, приводящих к минимальному значению величины теплового потока Q_k для массы состава 1800 т, длины поезда 812 м, начальной скорости торможения поезда $V_0 = 60$ км/ч, конечной скорости $V_k = 40$ км/ч.

Таблица 1

**Параметры тормозной системы вагона,
при которой величина теплового потока Q_k минимальна**

Параметр тормозной системы грузового вагона	Значение параметра	Величина теплового потока Q_k , Вт
Порожний вагон (композиционные колодки, наличие авторежима)		
Величина выхода штока тормозного цилиндра L_{sc} , м	0,065	16810
Величина сжатия пружины регулятора тормозной рычажной передачи L_r , м	0,0131	
Количество тормозных цилиндров на вагоне	2	
Давление воздуха в тормозном цилиндре при ступени торможения, кПа	80	
Средняя скорость i -го вагона в поезде (в хвосте состава) при торможении, м/с	12,89	
Груженный вагон (композиционные колодки, воздухораспределитель настроен на средний режим)		
Величина выхода штока тормозного цилиндра L_{sc} , м	0,065	20100
Величина сжатия пружины регулятора тормозной рычажной передачи L_r , м	0,0131	
Количество тормозных цилиндров на вагоне	2	
Давление воздуха в тормозном цилиндре при ступени торможения, кПа	90	
Средняя скорость i -го вагона в поезде (в хвосте состава) при торможении, м/с	12,89	

Окончание табл. 1

Параметр тормозной системы грузового вагона	Значение параметра	Величина теплового потока Q_k , Вт
Порожний вагон (композиционные колодки, наличие авторежима)		
Величина выхода штока тормозного цилиндра L_{sc} , м	0,065	16810
Величина сжатия пружины регулятора тормозной рычажной передачи L_r , м	0,0131	
Количество тормозных цилиндров на вагоне	2	
Давление воздуха в тормозном цилиндре при ступени торможения, кПа	80	
Средняя скорость i -го вагона в поезде (в хвосте состава) при торможении, м/с	12,89	
Груженный вагон (композиционные колодки, воздухораспределитель настроен на средний режим)		
Величина выхода штока тормозного цилиндра L_{sc} , м	0,065	20100
Величина сжатия пружины регулятора тормозной рычажной передачи L_r , м	0,0131	
Количество тормозных цилиндров на вагоне	2	
Давление воздуха в тормозном цилиндре при ступени торможения, кПа	90	
Средняя скорость i -го вагона в поезде (в хвосте состава) при торможении, м/с	12,89	

В табл. 2 представлены значения указанных выше параметров, приводящих к максимальному значению величины теплового потока Q_k .

Таблица 2

**Параметры тормозной системы вагона,
при которой величина теплового потока Q_k максимальна**

Параметр тормозной системы грузового вагона	Значение параметра	Величина теплового потока Q_k , Вт
Порожний вагон (композиционные колодки, воздухораспределитель настроен на порожний режим)		
Величина выхода штока тормозного цилиндра L_{sc} , м	0,08	20450
Величина сжатия пружины регулятора тормозной рычажной передачи L_r , м	0,01	
Количество тормозных цилиндров на вагоне	1	
Давление воздуха в тормозном цилиндре при ступени торможения, кПа	80	
Средняя скорость i -го вагона в поезде (в голове состава) при торможении, м/с	13,89	
Груженный вагон (композиционные колодки, воздухораспределитель настроен на груженный режим)		
Величина выхода штока тормозного цилиндра L_{sc} , м	0,08	26350
Величина сжатия пружины регулятора тормозной рычажной передачи L_r , м	0,01	
Количество тормозных цилиндров на вагоне	1	
Давление воздуха в тормозном цилиндре при ступени торможения, кПа	100	
Средняя скорость i -го вагона в поезде (в голове состава) при торможении, м/с	13,89	

Как видно из сравнения данных в табл. 1 и 2, вариативность величины теплового потока у порожнего вагона составляет 17,8 %, а у груженого – 23,7 %.

Величины тепловых потоков из табл. 1 и 2 использовались как исходные данные для расчета по МКЭ нестационарной задачи определения средней температуры обода колеса по методике, изложенной в [21, 22].

Для установления диапазона температур обода колеса при торможении, вызванного вариацией параметров тормозной системы, различным расстоянием вагона от локомотива и температурой окружающей среды, использовался тестовый пример, описанный в [21, 22]. В этом примере рассчитывался тормозной путь при снижении скорости движения поезда с 60 км/ч до 40 км/ч, определялось, время торможения (11,5 с), время прохождения контрольного участка (расстояние до пункта измерения температур колес), которое равнялось 62 с, при количестве вагонов в поезде, равном 52, массе состава 1800 т, длине поезда 812 м. Как и в [21, 22], проводились по МКЭ три термических исследования в SolidWorks Simulation.

В первом стационарном исследовании устанавливались параметры конвективного теплообмена с окружающей средой всех свободных поверхностей колеса для получения значений температуры в узлах конечных элементов, равных температуре окружающей среды.

Во втором нестационарном термическом исследовании задавалась длительность процесса (время торможения) – 11,5 с с шагом по времени – 0,5 с. В качестве начальных условий приняты результаты первого исследования. Термическая нагрузка задавалась одним из значений теплового потока (см. табл. 1 или 2), приложенного к поверхности катания колеса. В качестве граничных условий устанавливались параметры конвективного теплообмена с окружающей средой свободных поверхностей колеса, задавались коэффициент теплоотдачи и температура окружающей среды.

В третьем нестационарном термическом исследовании задавалась длительность процесса 62 с (время движения поезда после торможения до пункта измерения температур колес), шаг по времени 1 с, в качестве начальных условий указывались результаты второго исследования на конечном шаге по времени этого исследования. Термическая нагрузка отсутствовала, в качестве граничных условий также устанавливались параметры конвективного теплообмена колеса с окружающей средой. Коэффициенты теплоотдачи устанавливались так же, как в [21, 22].

На рис. 1 представлены результаты расчета по МКЭ в третьем термическом исследовании средней температуры обода колеса порожнего вагона с параметрами, обеспечивающими минимальное значение теплового потока, направленного в колесо (согласно табл. 1 – 16810 Вт), при температуре окружающей среды 298,9 К.

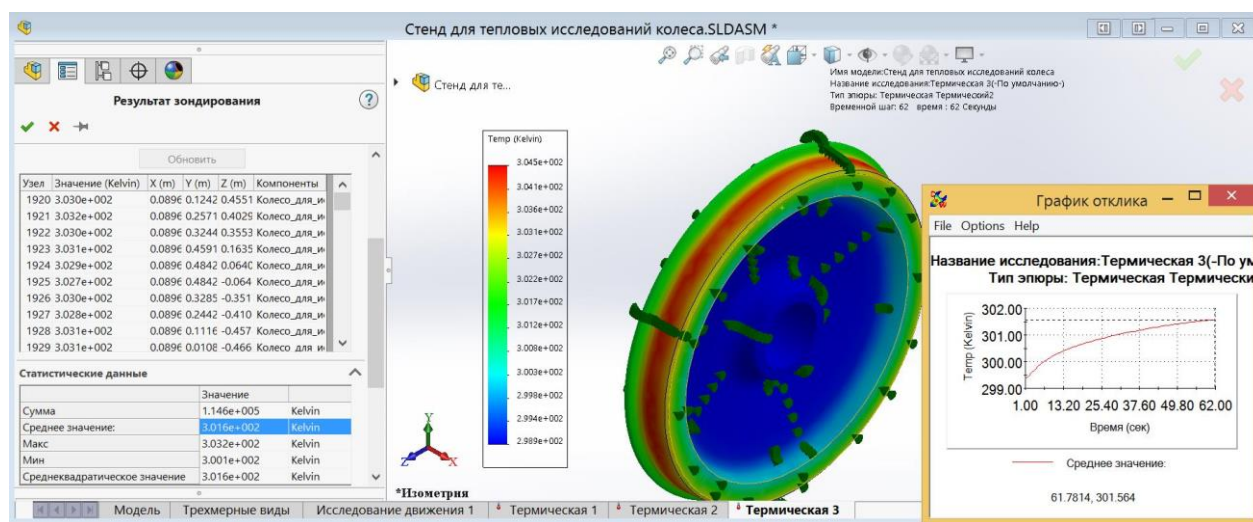


Рис. 1. Результаты расчета средней температуры обода колеса при минимальном тепловом потоке в летний период

Как видно из таблицы результатов на рис. 1, среднее значение температуры обода равнялось 301,6 К, что на 2,7 К больше температуры окружающей среды. Также из графика в правом нижнем углу на рис. 1 видно, что средняя температура обода колеса имеет тенденцию возрастания с течением времени.

На рис. 2 представлены результаты расчета в третьем термическом исследовании средней температуры обода колеса груженого вагона с параметрами, обеспечивающими максимальное значение теплового потока, направленного в колесо (согласно табл. 2 – 26350 Вт), также при температуре окружающей среды 298,9 К.

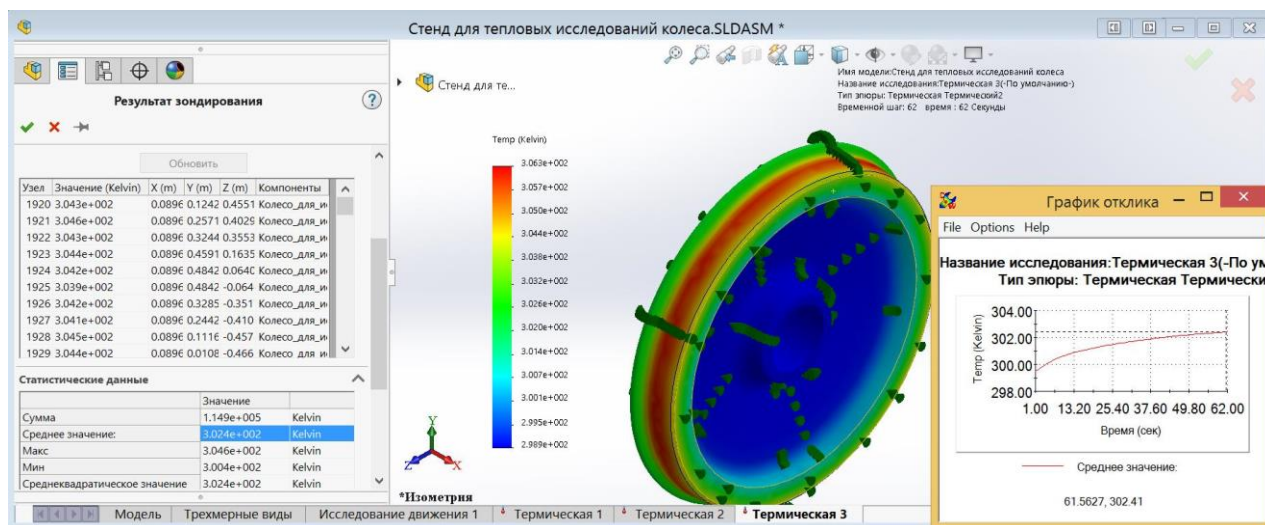


Рис. 2. Результаты расчета средней температуры обода колеса при максимальном тепловом потоке в летний период

Как видно из таблицы результатов на рис. 2, среднее значение температуры обода равнялось 302,4 К, что на 3,5 К больше температуры окружающей среды.

Разность значений средней температуры обода при максимальном и минимальном тепловых потоках составила всего 1,2 К, однако в процентном отношении этой величины к разности между средней температурой обода и температурой окружающей среды разность составляет 34 %.

Если в качестве характерной температуры колеса фиксировать максимальное значение температуры обода, то получаются большие значения разности этой температуры и окружающей среды.

На рис. 3 представлены результаты расчета по МКЭ в третьем термическом исследовании максимальной температуры обода колеса порожнего вагона с параметрами, обеспечивающими минимальное значение теплового потока (16810 Вт), при температуре окружающей среды 253 К.

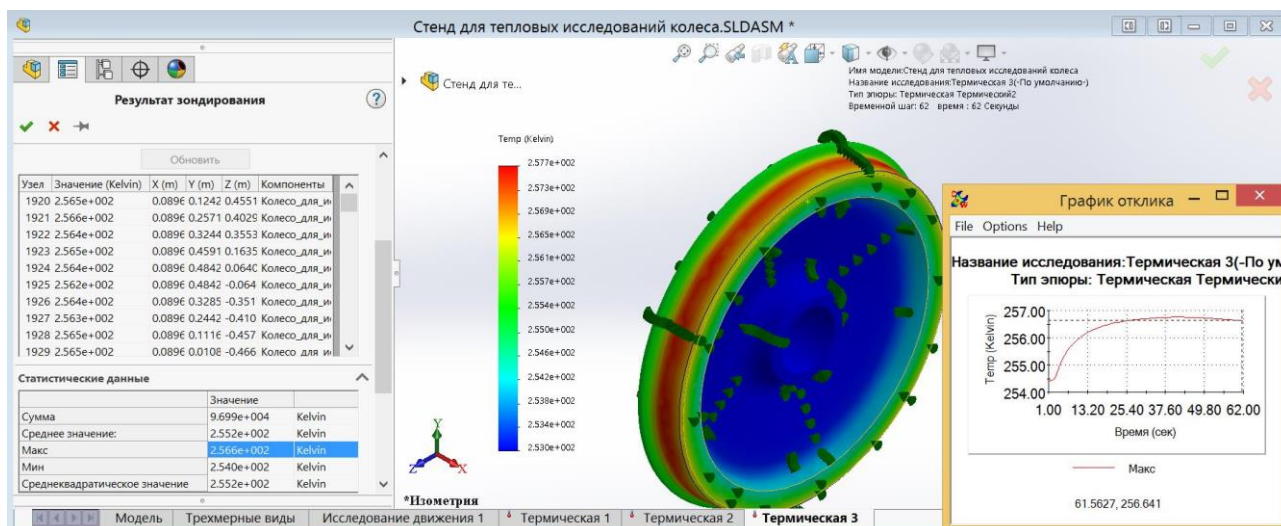


Рис. 3. Результаты расчета максимальной температуры обода колеса при минимальном тепловом потоке в зимний период

Как видно из таблицы результатов на рис. 3, максимальное значение температуры обода равнялось 256,6 К, что на 3,6 К больше температуры окружающей среды. Также из графика в правом нижнем углу рис. 3 видно, что максимальная температура обода колеса с 25 с имеет тенденцию стабилизации, что

делает этот параметр контроля менее зависимым от расстояния до места измерения температуры колеса, чем средняя температура обода.

На рис. 4 представлены результаты расчета в третьем термическом исследовании максимальной температуры обода колеса груженого вагона с параметрами, обеспечивающими максимальное значение теплового потока (26350 Вт), при температуре окружающей среды 253 К.

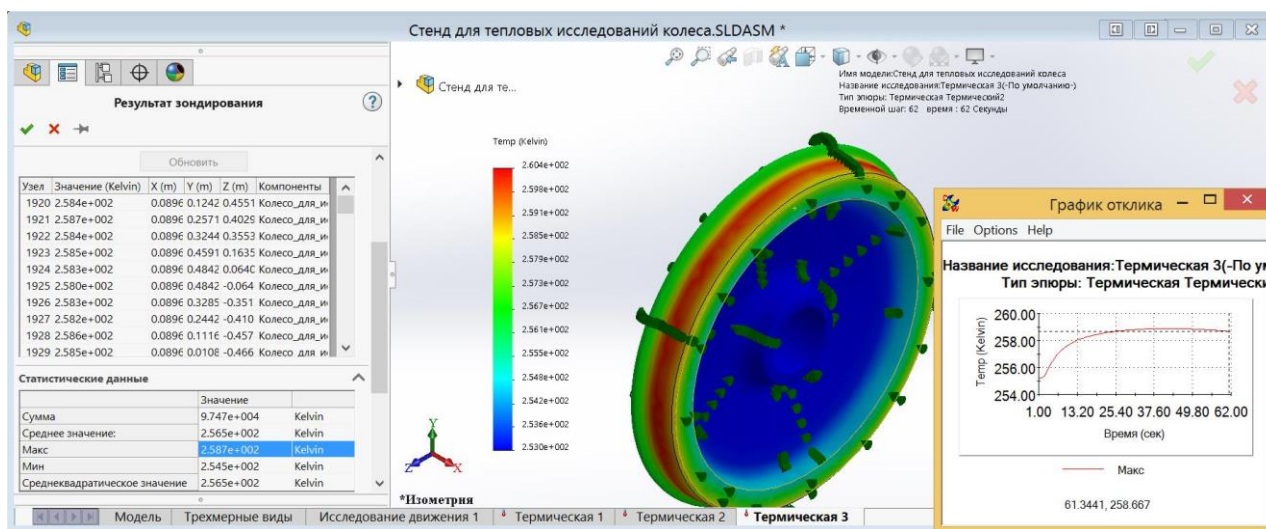


Рис. 4. Результаты расчета максимальной температуры обода колеса при максимальном тепловом потоке в зимний период

Как видно из таблицы результатов на рис. 4, максимальное значение температуры обода равнялось 258,7 К, что на 5,7 К больше температуры окружающей среды. Разница по величине превышения максимальной температуры обода колеса над температурой окружающей среды при максимальном и минимальном тепловом потоке, направленном в колесо при торможении, равна 2,1 К или в процентном отношении этой величины к разности между максимальной температурой обода и температурой окружающей среды 37 %.

Таким образом, вариативность параметров, указанных в табл. 1 и 2, приводит к изменению разности между максимальной температурой обода и температурой окружающей среды на 37 %.

Выводы

Параметры тормозной системы, такие как давление в тормозном цилиндре при ступени торможения, величина выхода штока тормозного цилиндра, величина сжатия пружины регулятора тормозной рычажной передачи и средняя скорость вагона при торможении, являются случайными величинами. Даже если все эти параметры находятся в пределах значений исправного состояния, их соотношение влияет на величину температуры обода колеса при торможении, делая ее случайной величиной. Расчеты по МКЭ позволили установить диапазоны изменения максимальной и средней температуры обода колеса при торможении с учетом допустимых вариаций параметров тормозной системы и положения вагона в поезде. Найденное расчетным путем значение максимального нагрева обода колеса от снижения скорости поезда на заданную величину может являться пороговым браковочным значением при контроле исправности тормозной системы средствами диагностики КСТМ-03.

Список литературы

- 1 Кокшенова, Ю. А. Обзор систем диагностики тормозного оборудования вагонов / Ю. А. Кокшенова, М. В. Яранцев // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Десятой Международной научно-практической конференции, 21–24 мая 2019 г., Иркутск : в 2 т. – Иркутск : ИрГУПС, 2019. – Т. 2. – С. 208–212. – ISBN 978-5-98710-365-4.
- 2 Салтыков, Д. Н. О необходимости создания инфракрасных напольных систем для контроля

References

- 1 Kokshenova, Yu. A. Review of diagnostic systems of brake equipment of wagons / Yu. A. Kokshenova, M. V. Yarantsev // Transport infrastructure of the Siberian region : Proceedings of the Tenth International scientific and practical conference, May 21–24– 2019, Irkutsk : in 2 vols. – Irkutsk : IrGUPS, 2019. – Vol. 2. – P. 208–212 – ISBN 978-5-98710-365-4.
- 2 Saltykov, D. N. On the need to create infrared floor systems for monitoring the performance of

- работоспособности тормозов на железных дорогах России / Д. Н. Салтыков, П. И. Шалупина // Транспорт Урала. – 2018. – № 2 (57). – С. 47–51. – DOI 10.20291/1815-9400-2018-2-47-51.
- 3 Экспериментальные исследования бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов грузового подвижного состава / А. А. Миронов, Д. Н. Салтыков, А. Э. Павлюков, П. И. Шалупина // Транспорт Урала. – 2021. – № 1 (68). – С. 20–25. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-1-20-25.
- 4 **Ефимов, Р. А.** Оценка тепловых нагрузений цельнокатаного колеса вагона при торможении : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация / Р. А. Ефимов. – Москва : МИИТ, 2017. – 24 с.
- 5 **Першин, В. К.** Моделирование тепловых режимов при фрикционном взаимодействии колеса и тормозной колодки / В. К. Першин, Л. А. Фишбеин // Транспорт Урала. – 2005. – № 1 (4). – С. 34–44. – ISSN 1815-9400.
- 6 **Павлюков, А. Э.** Тормозные колодки грузовых вагонов: анализ повреждаемости и факторов, влияющих на создание тормозной силы / А. Э. Павлюков, О. В. Черепов, П. И. Шалупина // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4 (36). – С. 4–11. – DOI 10.20291/2079-0392-2017-4-4-11.
- 7 **Яицков, И. А.** Влияние жесткости элементов тормозных колодок на динамические нагрузки при торможении / И. А. Яицков, П. А. Поляков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (85). – С. 36–45. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_36.
- 8 **ГОСТ 34434–2018.** Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов. Технические требования и правила расчета. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 27 с.
- 9 Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утверждены заседанием Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества, протокол от 6–7 мая 2014 г. № 60. – Москва, 2015. – 162 с.
- 10 Общее руководство по ремонту тормозного оборудования вагонов: 732-ЦВ-ЦЛ : утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества / Дирекция Совета по ж.-д. трансп. Государств – участников Содружества. – Москва : Трансинфо, 2011. – 215 с. – ISBN 978-5-93647-022-6.
- 11 Анализ факторов, влияющих на коэффициент трения тормозной колодки подвижного состава / А. А. Корсун, П. Ю. Иванов, Д. В. Осипов, brakes on the railways of Russia / D. N. Saltykov, P. I. Shalupina // Transport of the Urals. – 2018. – No. 2 (57). – P. 47–51. – DOI 10.20291/1815-9400-2018-2-47-51.
- 3 Experimental studies of contactless thermal control of pad brakes of freight rolling stock / A. A. Mironov, D. N. Saltykov, A. E. Pavlyukov, P. I. Shalupina // Transport of the Urals. – 2021. – No. 1 (68). – P. 20–25. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-1-20-25.
- 4 **Efimov, R. A.** Assessment of thermal loads of a solid-rolled wagon wheel during braking : Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.22.07 – Railway rolling stock, train traction and electrification / R. A. Efimov. – Moscow : MIIT, 2017. – 24 p.
- 5 **Pershin, V. K.** Modeling of thermal regimes during frictional interaction of a wheel and a brake pad / V. K. Pershin, L. A. Fishbein // Transport of the Urals. – 2005. – No. 1 (4). – P. 34–44. – ISSN 1815-9400.
- 6 **Pavlyukov, A. E.** Brake pads of freight cars: analysis of damage and factors affecting the creation of braking force / A. E. Pavlyukov, O. V. Cherepov, P. I. Shalupina // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2017. – No. 4 (36). – P. 4–11. – DOI 10.20291/2079-0392-2017-4-4-11.
- 7 **Yaitskov, I. A.** The influence of stiffness of brake pad elements on dynamic loads during braking / I. A. Yaitskov, P. A. Polyakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1 (85). – P. 36–45. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_36.
- 8 **GOST 34434–2018.** Braking systems of freight railway wagons. Technical requirements and calculation rules. – Moscow : Standartinform, 2018. – 27 p.
- 9 Rules for maintenance of brake equipment and brake control of railway rolling stock : Approved by the meeting of the Council on Railway Transport of the CIS Member States, Protocol No. 60 dated May 6–7, 2014. – Moscow, 2015. – 162 p.
- 10 General manual for the repair of brake equipment for wagons: 732-CV-CL : approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth member States / Directorate of the Council for Railway Transport. member States of the Commonwealth. – Moscow : Transinfo, 2011. – 215 p. – ISBN 978-5-93647-022-6.
- 11 Analysis of factors influencing the coefficient of friction of a rolling stock brake pad / A. A. Korsun, P. Y. Ivanov, D. V. Osipov, D. A. Tikhonov //

- Д. А. Тихонов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 91–100. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100.
- 12 **Асадченко, В. Р.** Разработка метода расчета тормозного пути при композиционных тормозных колодках в зимних условиях эксплуатации / В. Р. Асадченко, А. В. Ермилов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 2. – С. 73–78. – ISSN 2079-5920.
- 13 **Тулузин, С. В.** Оценка работоспособности тормозной рычажной передачи тележки грузового вагона на различных стадиях износа колодок и колес / С. В. Тулузин, Д. В. Горский // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2015. – № 2. – С. 38–44. – ISSN 2223-9731.
- 14 **Шарашенидзе, Г. С.** Анализ динамической точности тормозной рычажной передачи с зазорами грузовых вагонов / Г. С. Шарашенидзе, Т. Д. Григорашвили, С. Г. Шарашенидзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2004. – № 4. – С. 48–51. – ISSN 0201-727X.
- 15 **Синицын, В. В.** Учет эксплуатационных зазоров при расчете выхода штока тормозного цилиндра в тормозной системе грузового вагона / В. В. Синицын, Г. И. Петров // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4 (65). – С. 105–110. – ISSN 1818-5509.
- 16 **Евсеев, Д. Г.** Оценка эффективности работы тормозных колодок грузовых вагонов / Д. Г. Евсеев, Е. А. Коченов // Наука и техника транспорта. – 2024. – № 1. – С. 31–33. – ISSN 2074-9325.
- 17 Исследование температуры тормозных колодок с разной степенью износа в процессе фрикционного торможения / П. Ю. Иванов, А. М. Худонов, Е. Ю. Дульский [и др.] // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3 (47). – С. 27–34. – DOI 10.20291/2079-0392- 2020-3-27-34.
- 18 Диагностическая модель теплового контроля колес подвижного состава / А. А. Миронов, Д. Н. Салтыков, А. Э. Павлюков, П. И. Шалупина // Транспорт Урала. – 2019. – № 3 (62). – С. 36–40. – DOI 10.20291/1815-9400-2019-3-36-40.
- 19 **Шалупина, П. И.** Исследование процесса теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава методом имитационного моделирования / П. И. Шалупина // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 4 (89). – С. 31–42. – DOI 10.30987/1999-8775-2020-4-31-42.
- Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2022. – No. 2 (74). – P. 91–100. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100.
- 12 **Asadchenko, V. R.** Development of a method for calculating the braking distance for composite brake pads in winter operating conditions / V. R. Asadchenko, A. V. Ermilov // Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. – 2013. – No. 2. – P. 73–78. – ISSN 2079-5920.
- 13 **Tuluzin S. V.** Evaluation of the operability of the brake lever transmission of a freight wagon trolley at various stages of wear of pads and wheels / S. V. Tuluzin, D. V. Gorsky // Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport. – 2015. – No. 2. – P. 38–44. – ISSN 2223-9731.
- 14 **Sharashenidze G. S.** Analysis of dynamic accuracy of a brake lever transmission with gaps in freight wagons / G. S. Sharashenidze, T. D. Grigorashvili, S. G. Sharashenidze // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2004. – No. 4. – P. 48–51. – ISSN 0201-727X.
- 15 **Sinitsyn, V. V.** Accounting for operational clearances when calculating the output of the brake cylinder rod in the braking system of a freight car / V. V. Sinitsyn, G. I. Petrov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 4 (65). – P. 105–110. – ISSN 1818-5509.
- 16 **Evseev, D. G.** Evaluation of the effectiveness of the brake pads of freight wagons / D. G. Evseev, E. A. Kochenov // Science and Technology of transport. – 2024. – No. 1. – P. 31–33. – ISSN 2074-9325.
- 17 Investigation of the temperature of brake pads with different degrees of wear during friction braking / P. Yu. Ivanov, A. M. Khudonogov, E. Yu. Dulsky [et al.] // Bulletin of the Ural State University of Railways. – 2020. – No. 3 (47). – P. 27–34. – DOI 10.20291/2079-0392-2020-3-27-34.
- 18 Diagnostic model of thermal control of rolling stock wheels / A. A. Mironov, D. N. Saltykov, A. E. Pavlyukov, P. I. Shalupina // Transport of the Urals. – 2019. – No. 3 (62). – P. 36–40. – DOI 10.20291/1815-9400-2019-3-36-40.
- 19 **Shalupina, P. I.** Investigation of the process of thermal control of rolling stock brake pads by simulation modeling / P. I. Shalupina // Bulletin of the Bryansk State Technical University. – 2020. – No. 4 (89). – P. 31–42. – DOI 10.30987/1999-8775-2020-4-31-42.

20 Соседкина, О. С. Теоретическое исследование процессов теплообмена в системе «колесо – рельс» при торможении / О. С. Соседкина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 4 (40). – С. 121–125. – ISSN 0201-727X.

21 Балалаев, А. Н. Распределение теплоты между колесом, рельсом и тормозной колодкой при различных режимах торможения грузового состава / А. В. Жебанов, С. В. Коркина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). – С. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_8.

22 Балалаев, А. Н. Выбор поверхности контроля нагрева колеса грузового вагона при торможении с целью диагностики тормозов / А. Н. Балалаев, А. В. Жебанов, С. В. Коркина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4 (92). – С. 219–226. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_219.

20 Sosedkina, O. S. Theoretical study of heat exchange processes in the wheel–rail braking system / O. S. Sosedkina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2010. – No. 4 (40). – P. 121–125. – ISSN 0201-727X.

21 Balalaev, A. N. Heat distribution between the wheel, rail and brake boat under various modes of braking of freight train / A. V. Zhebanov, S. V. Korkina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2 (90). – P. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_8.

22 Balalaev, A. N. Selection of the heating surface of a freight wagon wheel during braking for brake diagnostics / A. N. Balalaev, A. V. Zhebanov, S. V. Korkina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 4 (92). – P. 219–226. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_219.

A. N. Balalaev, A. V. Zhebanov, S. V. Korkina

DISTRIBUTION OF THE CALCULATED TEMPERATURE OF THE RIM OF A FREIGHT WAGON WHEEL DURING BRAKING

Abstract. In order to ensure traffic safety and monitor the parameters of the wagons en route, various diagnostic tools for the components are installed when approaching the maintenance depot (PTO). Currently, as part of the implementation of projects to organize the operation of "unmanned stations" on public tracks, equipment for monitoring parts and assemblies of freight wagons (body, chassis, braking equipment) is being placed. The detection of brake equipment malfunctions consists of detecting missing, dragging parts and jamming of wheelsets, for example, if the brake lever gear is incorrectly adjusted. The article considers the issue of using KTSM-03 diagnostic tools to detect increased heating of the wheelsets when the train speed decreases by a specified value within the control. The temperature ranges on the rim of the wheel of a freight car involved in the braking process is determined, depending on all possible ratios of the parameters of the braking equipment that are within acceptable operating limits. The calculated value of the maximum heating of the wheel from pressing the pads to the rolling surface will be the threshold rejection value when monitoring the serviceability of the braking system using KSTM-03 diagnostic tools.

Keywords: freight car, braking process, brake equipment parameters, wheel temperature, brake diagnostics.

For citation: Balalaev, A. N. Distribution of the calculated temperature of the rim of a freight wagon wheel during braking / A. N. Balalaev, A. V. Zhebanov, S. V. Korkina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 26–37. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_26.

Сведения об авторах

Балалаев Анатолий Николаевич

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС),
кафедра «Вагонное хозяйство и наземные транспортные комплексы»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: wagon.samgaps@mail.ru

Information about the authors

Balalaev Anatoly Nikolaevich

Volga State Transport University (VSTU),
Chair "Car Facilities and Land Transport Complexes",
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: wagon.samgaps@mail.ru

Жебанов Александр Владимирович

Приволжский государственный университет
путей сообщения (ПривГУПС),
кафедра «Вагонное хозяйство и наземные
транспортные комплексы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: zhebanov@inbox.ru

Коркина Светлана Владимировна

Приволжский государственный университет
путей сообщения (ПривГУПС),
кафедра «Вагонное хозяйство и наземные
транспортные комплексы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: korkina70@mail.ru

Zhebanov Alexander Vladimirovich

Volga State Transport University (VSTU),
Chair “Car Facilities and Land Transport
Complexes”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: zhebanov@inbox.ru

Korkina Svetlana Vladimirovna

Volga State Transport University (VSTU),
Chair “Car Facilities and Land Transport
Complexes”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: korkina70@mail.ru

С. А. Сазонова, А. Н. Чукарин, Т. А. Финоченко

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЛОСКОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

Аннотация. Плоскошлифовальные станки применяются в основном для снижения шероховатости поверхности обрабатываемых изделий и для получения точных размеров, то есть для выполнения финишных операций технологических процессов обработки. Следует отметить, что общая компоновка колебательной системы плоскошлифовальных станков, геометрические размеры шлифовальных кругов, обрабатываемых заготовок и способ их закрепления имеют существенные отличия от шлифовальных станков других видов. Это обстоятельство и определяет необходимость обоснования моделей виброакустической динамики тех элементов общей колебательной системы объектов исследования, интенсивность звукового излучения которых приводит к превышению уровней звукового давления на рабочих местах станочников над предельно допустимыми величинами. Акустические модели, рассмотренные в статье, позволяют теоретически рассчитывать спектральные уровни звукового давления вышеуказанных источников шумового дискомфорта на этапе проектирования и установки оборудования, а также выявлять частотные интервалы и величины превышений над санитарными нормами.

Ключевые слова: шлифовальные станки, акустические модели, шум, вибрация, зубострогальный станок, виброакустическая динамика.

Для цитирования: Сазонова, С. А. Теоретическое обоснование акустических моделей плоскошлифовальных станков / С. А. Сазонова, А. Н. Чукарин, Т. А. Финоченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 38–43. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_38.

Акустические модели плоскошлифовальных станков представляют собой сложную взаимосвязь физических процессов, происходящих в ходе обработки поверхностей. Для их создания необходимо глубокое понимание как динамических, так и акустических характеристик этих машин. В настоящее время выполнены исследования процессов возбуждения вибраций и изучения звуковой энергии применительно к резьбо- и шлицешлифовальным станкам [1], зубошлифовальным [2], координатно- и профилешлифовальным [3]. На основе компоновок рассматриваемых в указанных работах станков и способов закрепления шлифовальных кругов и шлифуемых изделий выстраиваются расчетные схемы. На базе этих расчетных схем разрабатываются математические модели виброакустической динамики основных звукоизлучающих элементов и аналитические зависимости уровней звукового давления. Первым шагом в создании акустической модели является анализ вибраций, генерируемых в точке контакта абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью. Вибрации, возникающие при высокоскоростном контакте, отличаются сложностью своего спектрального состава и меняются в зависимости от множества факторов, таких как скорость вращения шпинделя, твердость шлифуемого материала, зернистость абразива и режимы обработки. Введение математического аппарата, позволяющего описать эти изменения, является критическим аспектом построения модели.

Расчетные схемы акустической подсистемы «обрабатываемые заготовки – шлифовальные круги» внутришлифовальных станков приведены на рис. 1–4.

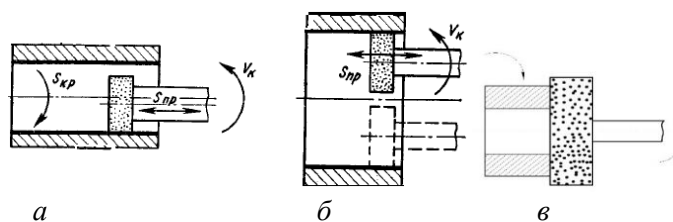


Рис. 1. Расчетные схемы обработки изделий на внутришлифовальных станках:
a – шлифование детали (типа колец), у которой диаметр намного больше толщины; *б* – шлифование детали значительной толщины, когда шлифовальный круг имеет подачу вдоль оси заготовки;
в – торцевое шлифование

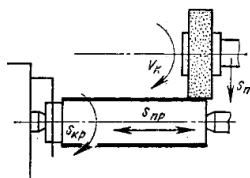


Рис. 2. Расчетная схема продольного круглого наружного шлифования

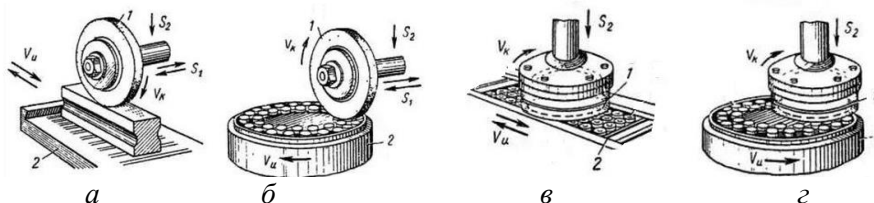


Рис. 3. Расчетные схемы плоскошлифовальных станков:

а – при установке детали на прямоугольном столе; *б* – на круглом столе при шлифовании периферией круга; *в* – на магнитном столе при шлифовании торцом круга; *г* – на круглом столе при шлифовании торцом круга (*1* – шлифовальный круг; *2* – стол для установки деталей)

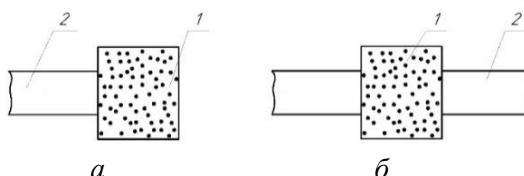


Рис. 4. Расчетная схема узлов резания:

1 – шлифовальный круг; *2* – оправка; *а* – при консольном закреплении шлифовального круга; *б* – при установке шлифовального круга при симметричном расположении относительно опор оправки

Для элементов расчетных схем с учетом их геометрических конфигураций и комплексности факторов, влияющих на генерацию звука, использования различных типов источников звука в моделировании звуковых процессов приняты нижеперечисленные источники звука.

Монополь – для деталей типа колец, у которых толщина кольца существенно меньше диаметра, что соответствует обрабатываемым изделиям на внутришлифовальных станках (см. схемы на рис. 1, *а*, *в*), деталям на плоскошлифовальных станках с круглым столом, а также шлифовальным кругом. Для всех указанных элементов должно выполняться соотношение:

$$0,018R \cdot f_k \leq 1,$$

где f_k – собственные частоты колебаний, Гц; R – радиус, м.

Круглая пластина – для всех вышеуказанных элементов при выполнении соотношения

$$0,018R \cdot f_k > 1.$$

Цилиндр ограниченной длины – для заготовок, оправок шлифовальных кругов, у которых

$$l \gg R,$$

где l – длина соответствующего источника, м.

Линейный источник – для деталей типа балок, стержней прямоугольного профиля, обрабатываемым по схеме на рис. 3, *а*, условия закрепления которых соответствуют упруго-диссипативному основанию.

В данной работе рассматриваются условия реализации технологических процессов шлифования стальных закаленных деталей с применением смазывающе-охлаждающих жидкостей. С использованием данных работ А. С. Никифорова и А. Н. Чукарина [5–7] получены выражения основных акустических характеристик звукового давления (P), уровней звукового давления (L_p), звуковой мощности (N) и уровней звуковой мощности (L_N) для вышеуказанных источников шума.

Монополь

$$\begin{aligned}
 P &= 2 \frac{D^2 f_k V_k}{r}, \\
 L_p &= 20 \lg \frac{f_k V_k D^2}{r \cdot 10^{-5}}, \text{ дБ}, \\
 N &= 5 \cdot 10^{-2} D^2 f_k^2 V_k^2, \\
 L_N &= 10 \lg \frac{5 (D V_k)^2 f_k}{10^{-10}}, \text{ дБ}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Цилиндр ограниченной длины и линейный источник

$$\begin{aligned}
 P &= 44 b V_k \sqrt{\frac{f_k}{r}} l, \\
 L_p &= 20 \lg \frac{22 b V_k l}{10^{-5}} \sqrt{\frac{f_k}{r}}, \text{ дБ}, \\
 N &= 19 (b V_k)^2 f_k l, \\
 L_N &= 10 \lg \frac{19 (b V_k)^2 f_k l}{10^{-12}}, \text{ дБ}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Круглая пластина

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{D^2 f_k V_k}{r}, \\
 L_p &= 20 \lg \frac{f_k V_k D^2}{2 \cdot 10^{-5} r}, \text{ дБ}, \\
 N &= 2,5 \cdot 10^{-2} D^4 (f_k V_k)^2, \\
 L_N &= 10 \lg \frac{2,5 D^4 (f_k V_k)^2}{10^{-10}}, \text{ дБ}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

где D – диаметр источника, м; l – длина источника, м; r – расстояние от источника до рабочего места станочника, м; b – диаметр или размер поперечного сечения линейного источника, м.

Собственные частоты колебаний источников согласно условиям закрепления определяются следующим образом. Прежде всего, для каждого конкретного типа закрепления необходимо учитывать граничные условия, которые могут значительно влиять на динамические характеристики системы. В случае жесткого закрепления на концах, например, собственные частоты будут отличаться от тех, которые наблюдаются при шарнирном закреплении, где возможны подвижки и вращения. Для определения собственных частот рассматривается уравнение колебаний системы, которое включает в себя такие параметры, как масса, жесткость и демпфирующие свойства. В общем виде уравнение колебаний можно представить в следующей форме:

– для кольца

$$f_k = 2 \cdot 10^2 \frac{k(k^2 - 1)}{D^2} \sqrt{\frac{D^2 + d^2}{k^2 + 1}};$$

– для детали с консольным закреплением

$$\begin{aligned}
 f_k &= 5 \cdot 10^2 \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 \sqrt{D^2 + d^2} - \text{для полых детали}; \\
 f_k &= 5 \cdot 10^{-2} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 D - \text{для сплошной детали};
 \end{aligned}$$

– для цилиндра ограниченной длины

$$f_k = 2 \cdot 10^3 \left(\frac{k}{l}\right)^2 \sqrt{D + d} - \text{для полого цилиндра};$$

$$f_k = 2 \cdot 10^3 \left(\frac{k}{l}\right)^2 D - \text{для сплошного цилиндра};$$

– для круглой пластины

$$f_k = \frac{kh}{D^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\mu^2)}};$$

– для балки на упруго-диссипативном основании

$$f_k = 1,8 \cdot 10^{-3} \sqrt{2 \cdot 10^{13} \left(\frac{k}{l}\right)^4 \frac{J}{F} + \frac{j_{\text{пр}}}{F}},$$

где k – коэффициент, определяющий собственные частоты колебаний; h – толщина шлифовального круга, м; E – модуль упругости, Па; ρ – плотность материала, кг/м³; J – площадь поперечного сечения, м²; F – момент инерции, м⁴; $j_{\text{пр}}$ – приведенная жесткость технологической системы «шлифуемая заготовка – стол», н/м.

Точное определение собственных частот колебаний источников согласно условиям закрепления требует глубокого анализа и учета множества факторов, включая материальные свойства, конструктивные особенности и типы закреплений. Правильный подход к анализу позволяет не только предсказать поведение системы, но и разработать меры для предотвращения негативных последствий резонансных колебаний [8].

Заключение

Как видно из полученных выражений, для расчета акустических характеристик необходимо определить скорости колебаний на их собственных частотах колебаний, что фактически даст возможность теоретически рассчитать спектры шума на этапе проектирования станка. Скорости колебаний определяются из дифференциальных уравнений колебаний соответствующего элемента с учетом силового воздействия от процесса шлифования, которое определяется на основе задаваемого по нормативам режимов резания [9] значения мощности шлифования N_p .

В приведенных выше зависимостях параметры технологических процессов, реализуемых на плоскошлифовальных станках, будут учтены в зависимостях скоростей колебаний на собственных частотах. Эти данные позволяют теоретически рассчитывать спектральные уровни звукового давления вышеуказанных станков на этапе их проектирования. Основываясь на этих данных, можно моделировать акустические характеристики производственного оборудования, что является ключевым аспектом при создании современных машиностроительных комплексов. Это позволяет не только предугадывать ожидаемые уровни звукового давления, но и оптимизировать параметры акустических систем еще на стадии разработки. Так, инженеры могут заранее корректировать конструктивные элементы для достижения наибольшей эффективности шумозащиты, что особенно важно в условиях строгих нормативов по промышленной безопасности и охране труда. В результате значительно сокращаются временные и материальные затраты на этапе внедрения и эксплуатации новых станков. Совместное использование теоретических и экспериментальных данных обеспечивает более точное прогнозирование акустической обстановки на производственных площадках, минимизируя воздействие шума на работников. Эта методика способствует созданию гармоничного и безопасного производственного пространства, где высокий технологический уровень производства сочетается с заботой о комфорте персонала.

В последние годы заметно возрос интерес к использованию цифровых технологий для моделирования акустических характеристик производственного оборудования. Современные программные комплексы позволяют создавать виртуальные прототипы станков и других машин, что существенно расширяет возможности инженеров. Эти системы интегрируют данные различных датчиков, таких как акселерометры и микрофоны, предоставляя подробную картину акустического ландшафта на стадии проектирования. Таким образом, можно выявить и устранить потенциальные источники шума до начала производства, что способствует созданию более тихих и эффективных машин.

Список литературы

1 Theoretical study of the processes of vibration excitation and noise generation of grinding wheels of thread and spline grinding machines / J. P. Razakov, A. E. Shashurin, P. S. Kurchenko, N. I. Ivanov // *AKUSTIKA*. – 2021. – Vol. 38. – P. 175–178. – DOI 10.36336/akustika202139173.

2 Теоретическое обоснование способов снижения шума и вибраций крупногабаритных шлифовальных кругов / А. Г. Солдатов, А. Н. Чукарин, Т. А. Финоченко, Т. К. Суворова // *Noise Theory and Practice*. – 2022. – Т. 8, № 2 (29). – С. 35–44. – EDN MPYVVC.

3 **Курченко, П. С.** Экспериментальные исследования спектрального состава вибраций и шума координатно- и профильно-шлифовальных станков / П. С. Курченко // *Noise Theory and Practice*. – 2021. – Т. 7, № 5 (27). – С. 78–91. – EDN SQAGCX.

4 **Чукарин, А. Н.** Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки : монография / А. Н. Чукарин. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2004. – 152 с. – ISBN 5-7890-0326-5.

5 **Никифоров, А. С.** Акустическое проектирование судовых конструкций : справочник / А. С. Никифоров. – Ленинград : Судостроение, 1990. – 200 с. – ISBN 5-7355-0188-7 : 70 к.

6 Model validation of the acoustic systems “tooth wheels-mandrels” of the vertical gear generator and gear shaping machines / S. Ryzhov, T. Finochenko, A. Chukarin, I. Yaitskov // *AKUSTIKA*. – 2021. – Vol. 41. – P. 90–93. – DOI 10.36336/akustika20214190.

7 **Kharlamov, O. G.** Theoretical analysis of the vibration inducing processes of the “work-piece-mandrel” assemblies during gear-tooth milling / O. G. Kharlamov, T. A. Finochenko, A. N. Chukarin // *E3S Web of Conferences : International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) “Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution”*, Rostov-on-Don, Russia, April 05–07, 2023. – Rostov-on-Don : EDP Sciences, 2023. – P. 04037. – DOI 10.1051/e3sconf/202338304037.

8 **Месхи, Б. Ч.** Закономерности шумообразования плоскошлифовальных станков / Б. Ч. Месхи, В. Ф. Саликов, А. Н. Чукарин // *Управление. Конкуренентоспособность. Автоматизация : сборник научных трудов. Том 3*. – Ростов-на-Дону : Институт управления и инноваций авиационной промышленности, 2003. – С. 163–171. – EDN TNBDVR.

References

1 Theoretical study of the processes of vibration excitation and noise generation of grinding wheels of thread and spline grinding machines / J. P. Razakov, A. E. Shashurin, P. S. Kurchenko, N. I. Ivanov // *AKUSTIKA*. – 2021. – Vol. 38. – P. 175–178. – DOI 10.36336/akustika202139173.

2 Theoretical substantiation of ways to reduce noise and vibrations of large-sized grinding wheels / A. G. Soldatov, A. N. Chukarin, T. A. Finochenko, T. K. Suvorova // *Noise Theory and Practice*. – 2022. – Vol. 8, No. 2 (29). – P. 35–44. – EDN MPYVVC.

3 **Kurchenko, P. S.** Experimental studies of the spectral composition of vibrations and noise of coordinate and profile grinding machines / P. S. Kurchenko // *Noise Theory and Practice*. – 2021. – Vol. 7, No. 5 (27). – P. 78–91. – EDN SQAGCX.

4 **Chukarin, A. N.** Theory and methods of acoustic calculations and design of technological machines for mechanical processing : monograph / A. N. Chukarin. – Rostov-on-Don : Publishing Center of DSTU, 2004. – 152 p. – ISBN 5-7890-0326-5.

5 **Nikiforov, A. S.** Acoustic design of ship structures : handbook / A. S. Nikiforov. – Leningrad : Sudostroyeniye, 1990. – 200 p. – ISBN 5-7355-0188-7 : 70 k.

6 Model validation of the acoustic systems “tooth wheels-mandrels” of the vertical gear generator and gear shaping machines / S. Ryzhov, T. Finochenko, A. Chukarin, I. Yaitskov // *AKUSTIKA*. – 2021. – Vol. 41. – P. 90–93. – DOI 10.36336/akustika20214190.

7 **Kharlamov, O. G.** Theoretical analysis of the vibration inducing processes of the “work-piece-mandrel” assemblies during gear-tooth milling / O. G. Kharlamov, T. A. Finochenko, A. N. Chukarin // *E3S Web of Conferences : International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) “Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering : Ways of Their Innovative Solution”*, Rostov-on-Don, Russia, April 05–07, 2023. – Rostov-on-Don : EDP Sciences, 2023. – P. 04037. – DOI 10.1051/e3sconf/202338304037.

8 **Meskhi, B. Ch.** Regularities of noise generation of surface grinding machines / B. Ch. Meskhi, V. F. Salikov, A. N. Chukarin // *Management. Competitiveness. Automation : collection of scientific papers. Vol. 3*. – Rostov-on-Don : Institute of Management and Innovation of the Aviation Industry, 2003. – P. 163–171. – EDN TNBDR.

9 Яицкова, Н. М. Снижение шума металлорежущих станков / Н. М. Яицкова, Т. А. Финоченко, И. Г. Переверзев // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (51). – С. 112–115. – ISSN 1818-5509.

9 Yaitskova, N. M. Noise reduction of metal-cutting machines / N. M. Yaitskova, T. A. Finochenko, I. G. Pereverzev // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 2 (51). – P. 112–115. – ISSN 1818-5509.

S. A. Sazonova, A. N. Chukarin, T. A. Finochenko

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF ACOUSTIC MODELS OF SURFACE GRINDING MACHINES

Abstract. Surface grinding machines are mainly used to reduce the surface roughness of workpieces and to obtain accurate dimensions, that is, to perform finishing operations of technological processing processes. It should be noted that the general layout of the oscillatory system of surface grinding machines, the geometric dimensions of the grinding wheels, workpieces and the methods of their fastening have significant differences from other types of grinding machines. This circumstance determines the need to substantiate the models of vibroacoustic dynamics of those elements of the general oscillatory system of the objects of study, the intensity of sound radiation of which leads to an excess of sound pressure levels at the workplaces of machine operators over the maximum permissible values. The acoustic models considered in the article allow theoretically calculating the spectral sound pressure levels of the above sources of noise discomfort at the stage of designing and installing equipment, as well as identifying frequency intervals and the values of excess over sanitary standards.

Keywords: grinding machines, acoustic models, noise, vibration, gear shaping machine, vibroacoustic dynamics.

For citation: Sazonova, S. A. Theoretical substantiation of acoustic models of surface grinding machines / S. A. Sazonova, A. N. Chukarin, T. A. Finochenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 38–43. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_38.

Сведения об авторах

Сазонова Светлана Анатольевна

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, кафедра компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии, кандидат технических наук, доцент, e-mail: fta09@bk.ru

Чукарин Александр Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Безопасность жизнедеятельности», доктор технических наук, профессор, e-mail: fta09@bk.ru

Финоченко Татьяна Анатольевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Безопасность жизнедеятельности», кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой, e-mail: fta09@bk.ru

Information about the authors

Sazonova Svetlana Anatolyevna

Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozova, Chair of Computer Technologies and Microelectronic Engineering, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: fta09@bk.ru

Chukarin Alexander Nikolaevich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Life Safety”, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: fta09@bk.ru

Finochenko Tatyana Anatolyevna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Life Safety”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Chair, e-mail: fta09@bk.ru

А. Н. Шмойлов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕСОТОКАРНЫМ СТАНКОМ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ПРОФИЛЯ КАТАНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Аннотация. Рассмотрен вопрос разработки автоматизированной системы управления колесотокарным станком для восстановления профиля катания колесных пар грузовых вагонов, установлены причины преждевременного выхода из строя быстроходных фрез специализированных колесотокарных станков. Была определена функция готовности системы управления скоростью вращения шпинделя станка и подачи рабочего инструмента. В работе были проанализированы значения модуля скорости резания металла при восстановлении профиля катания колесной пары и амплитуды автоколебаний рабочего инструмента станка, а также результаты расчетов показателей готовности восстанавливаемых объектов динамической системы колесотокарного станка и основные характеристики элементов динамической системы станка. Исследован характер колебаний рабочего инструмента станка и проанализированы факторы, которые вызывают данные колебания. Предложена блок-схема автоматизированной системы управления колесотокарным станком и приведен набор основных элементов основного контура системы управления специализированным колесотокарным станком.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, колесотокарный станок, динамическая система, оптимальная скорость подачи режущего инструмента, автоколебания, концевая быстроходная фреза.

Для цитирования: Шмойлов, А. Н. Автоматизированная система управления колесотокарным станком при восстановлении профиля катания колесных пар грузовых вагонов / А. Н. Шмойлов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 44–50. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_44.

Введение

В настоящее время актуальным остается вопрос увеличения показателей надежности тех узлов и деталей эксплуатируемого парка подвижного состава, которые являются наиболее нагруженными и чаще других выходят из строя [1]. Согласно действующим регламентным документам на железнодорожном транспорте в целях обеспечения безопасности движения поездов особое внимание должно уделяться техническому состоянию ходовых частей вагонов, в том числе колесным парам [2]. Операции по восстановлению профиля катания колесных пар являются неотъемлемой частью важнейших технологических цепочек производственного цикла вагоноремонтных депо [3]. От эффективности данной технологической операции зависит значительная часть экономии ресурсов предприятия и трудозатрат при ремонте колесных пар. Развитие железнодорожного транспорта тесно связано с развитием основных отраслей современного машиностроения.

Технологические операции по восстановлению профиля катания колесных пар сопровождаются динамической нестабильностью технической системы колесотокарного станка, что негативно сказывается на стойкости инструмента, оборудования и качестве обработки. Регенерация автоколебаний под воздействием вибраций на поверхности резания является основной причиной динамической нестабильности [4]. Необходимо понимать природу и закономерности этого процесса для эффективного управления автоколебаниями. Модуляция скорости резания может открывать новые возможности для стабилизации технологической системы.

Цель научной разработки

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы управления колесотокарным станком для восстановления профиля катания колесных пар грузовых вагонов. В соответствии с поставленной целью разрабатываемая система должна учитывать влияние динамических процессов обработки металла резанием на ресурс и долговечность режущего инструмента в условиях различных внешних возмущений с целью осуществления управляющих воздействий на электроприводы станка.

Основная часть

Важную роль при восстановлении профиля катания колесных пар на колесотокарном станке играет четкое соблюдение алгоритма работы и выполнение всех технологических операций при взаимодействии всех элементов динамической системы станка [5]. Данные взаимодействующие элементы принято рассматривать как комбинацию элементов упругой динамической системы и рабочих процессов торцевого фрезерования при обработке поверхности колесной пары. Были аналитически определены различные параметры представленной системы и определены параметры срезаемого слоя. При этом учитывались поправки на толщину среза и фактического положения в пространстве рабочего инструмента колесотокарного станка. Учитывались вибрации, которые возникают в точке пересечения рабочего инструмента с передней кромкой инструмента.

Для дальнейшего экспериментального исследования данных процессов поверхность рабочей фрезы была математически преобразована и описана. Данные преобразования позволили составить схему динамической системы фрезерного станка. В основу данной динамической системы легла пространственная матрица точек. Основные элементы динамической системы колесотокарного станка и ее структурная схема представлены на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема динамической системы колесотокарного станка

В данной динамической системе указаны входные и выходные величины, которые обладают линейными зависимостями. В качестве входных величин приняты составляющие силы подсистемы режущего инструмента (P_a , P_b , P_c) и момент резания (M_p). Выходами данной модели приняты значения характеристик движения отдельных звеньев системы и колебательных контуров (A_1 , B_1 , C_1) и заготовки (перемещения (A_2 , B_2 , C_2), а также скорости V_2).

Экспериментальные исследования данной динамической системы колесотокарного станка позволили установить прямую зависимость между напряжениями и деформациями отдельных элементов станка. При этом установлено, что при воздействии внешних сил на упругое тело системы в любом известном соотношении, напряжения, деформации и перемещения увеличиваются (уменьшаются) в одинаковой пропорции в любой точке тела.

На основе представленной динамической системы была разработана экспериментальная модель, которая описывает жесткость системы «станок – инструмент – заготовка». Данная модель позволяет реализовывать оптимальные режимы резания (глубина резания, подача) при восстановлении профиля колесных пар. Разработанная экспериментальная модель состоит из трех подмоделей: эластичной модели станка, рабочего режущего инструмента и процесса резания обрабатываемой поверхности.

Исследование представленной динамической модели позволило установить взаимосвязь между параметрами сил трения соприкасающихся элементов станка, жесткости системы станка и возникающих автоколебаний рабочего инструмента при обточке поверхности катания колесной пары.

Установлено, что большое количество деталей в силовой схеме станка и наличие относительного небольшого перемещения в соединениях данных деталей при вибрациях системы приводят к разбалансировке всей системы [6]. Данная разбалансировка приводит к большим отклонениям заданного положения рабочего инструмента станка, вследствие чего происходит отклонение допусков снимаемого слоя металла и, в конечном итоге, нарушение технологии восстановления профиля катания колёсных пар грузовых вагонов железнодорожного транспорта.

Практическая реализация результатов предоставленной работы заключается в решении следующих вопросов: уменьшение вибраций, снижение износа рабочего инструмента и повышение точности обработки.

Данные целевые показатели невозможно выполнить без постоянного контроля и мониторинга величин вибраций. Данный контроль позволит повысить качество обрабатываемой поверхности колесной пары и даст предпосылки к снижению трудоемкости данной технологии.

С целью снижения проявления нарушений допусков при обработке и уменьшения ресурса режущего инструмента в процессе восстановления профиля катания колесных пар на колесотокарном станке необходимо более ответственно отнестись к выбору составных частей системы управления данной замкнутой динамической системы. Правильно выбранная система управления позволит свести к минимуму колебания режущего инструмента в процессе обработки колесной пары. В результате проведенной работы было установлено, что при увеличении величин динамических возмущений происходит рост интенсивности износа рабочего инструмента и снижение точности обработки.

В работе были проанализированы различные варианты настройки оборудования станка в зависимости от величины динамических возмущений. Была определена функция готовности системы управления скоростью станка по формуле (1). Вероятность наступления первого события равна вероятности безотказной работы объекта $F(t)$ в течение определенного периода времени $(0, t)$.

$$\Gamma(t) = \frac{\lambda_s}{\lambda_0 + \lambda_s} + \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_s} \cdot \exp[-(\lambda_s + \lambda_0) \cdot t], \quad (1)$$

где λ_0 – параметр распределения наработки между отказами;

λ_s – параметр распределения времени восстановления.

Функцию готовности была рассчитана на интервале $0 \dots 20$ ч с промежутками 2 ч.

Пример графических зависимостей приведен на рис. 2.

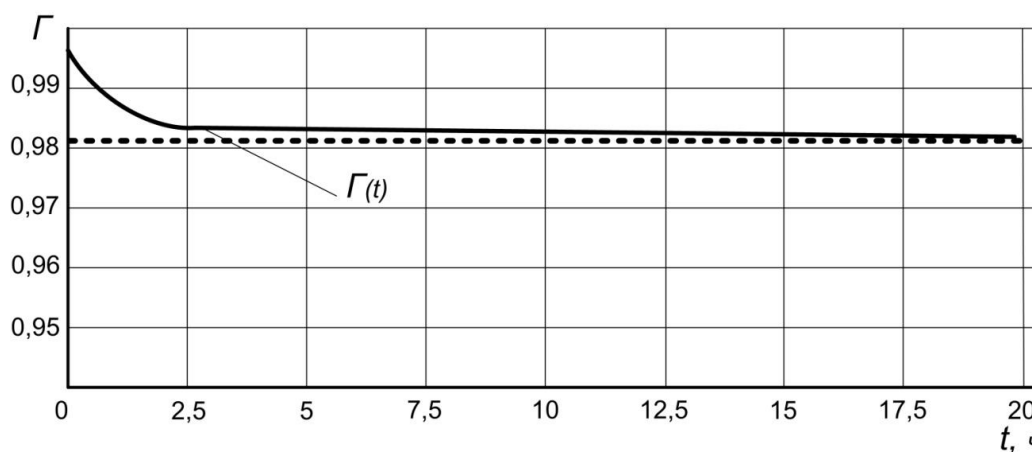


Рис. 2. Результаты расчетов показателей готовности восстанавливаемых объектов динамической системы специализированного колесотокарного станка

По итогам данной работы была разработана система автоматического управления специализированным колесотокарным станком для восстановления профиля катания колесной пары. Данная система управления включает в себя подсистему модулирования скорости резания обрабатываемой поверхности колесной пары. Детально проработаны конструктивные технические особенности основных составных частей данной системы [7]. Предлагается решить проблему возбуждения путем создания цепи обратной

связи в «механической» части. Это позволяет упростить систему снятия и возбуждения колебаний, а также обеспечить самонастройку на резонансную частоту и отслеживать ее изменение [8–9].

В качестве чувствительных элементов в системе могут быть использованы мембранные и нелинейные преобразователи колебаний различных конструкций. Данные технические решения позволяют снизить трудоёмкость испытаний и дают возможность осуществлять непрерывную дистанционную настройку и корректировку программы измерений при монтаже блоков контроля параметров в основные узлы и приводы колесотокарного станка [10].

Был разработан алгоритм управления колесотокарным станком, который позволит в автоматическом режиме подбирать оптимальную скорость подачи режущего инструмента и необходимую технологическую программу по работе основных механизмов и приводов станка при восстановлении профиля катания колесной пары.

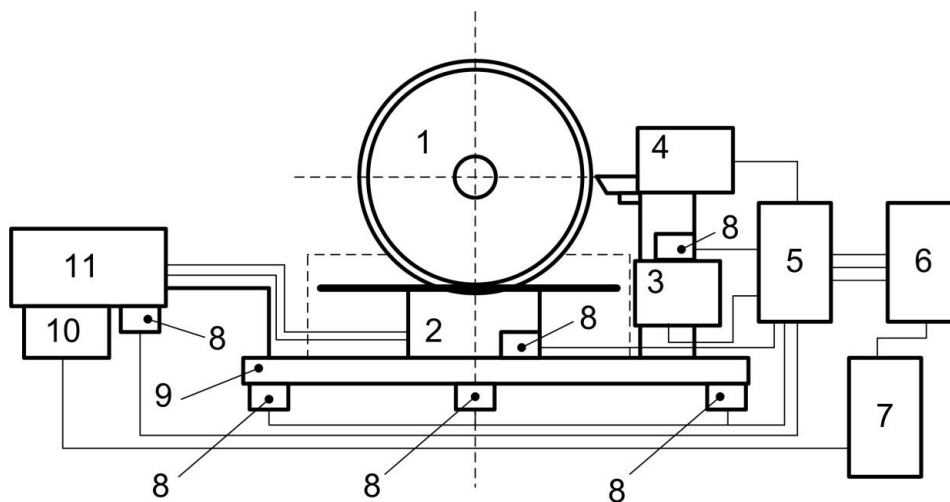


Рис. 3. Блок-схема автоматизированной системы управления колесотокарным станком по восстановлению профиля катания колесной пары:

1 – обрабатываемая колесная пара; 2 – металлическая основа; 3 – блок контроля вертикальных перемещений; 4 – блок контроля горизонтальных перемещений; 5 – преобразователь сигналов; 6 – блок вычислений; 7 – подсистема модулирования скорости резания металла; 8 – блок контроля вибраций; 9 – горизонтальный кронштейн металлической основы станка; 10 – модуль управления электроприводом; 11 – электропривод станка

Подсистема модулирования скорости резания металла соединена через блок вычислений и преобразователь сигналов с блоком контроля вибраций. Металлическая основа станка имеет в своем составе горизонтальный кронштейн с расположенными на нем блоками контроля вибраций. Электропривод станка получает управляющие сигналы от подключенного к нему специального модуля управления электроприводом. Корректировка работы модуля управления электроприводом осуществляется с помощью подсистемы модулирования скорости резания металла. Блок вычислений с подключенными к нему блоками контроля горизонтальных и вертикальных перемещений и преобразователем сигналов образуют основной контур системы управления специализированным колесотокарным станком.

Далее был разработан алгоритм управления данным станком, который позволит в автоматическом режиме подбирать оптимальную скорость обработки поверхности катания колесной пары в зависимости от возникающих автоколебаний.

В работе были проанализированы значения модуля скорости резания металла при восстановлении профиля катания колесной пары и амплитуды автоколебаний рабочего инструмента станка, а также результаты расчетов показателей готовности восстанавливаемых объектов динамической системы колесотокарного станка и основные характеристики элементов динамической системы станка.

На рис. 4 приведены зависимости модуля скорости резания и амплитуды автоколебаний рабочего инструмента станка. Рабочим инструментом колесотокарного станка является концевая быстроходная фреза.

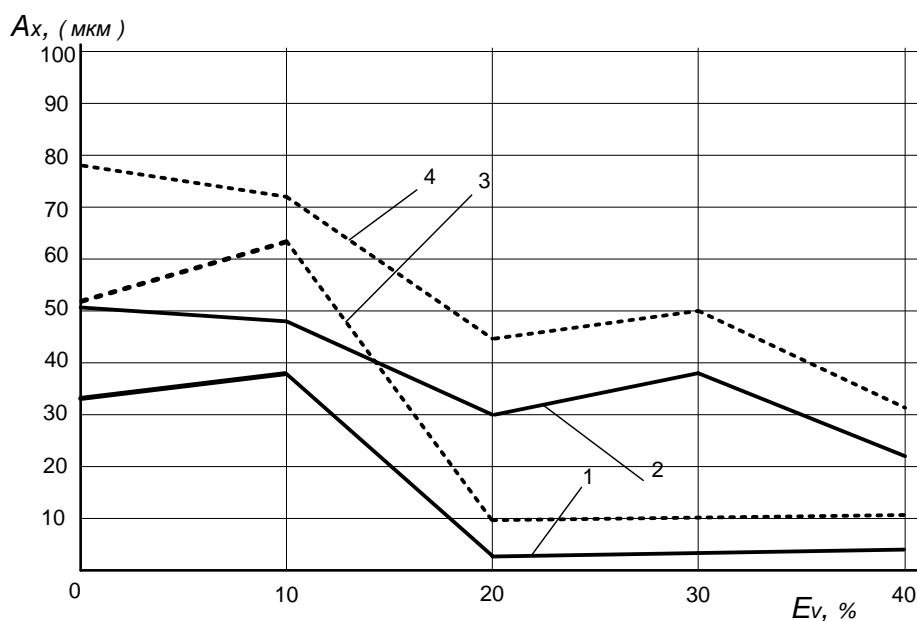


Рис. 4. Зависимости модуля скорости резания и амплитуды автоколебаний концевой быстроходной фрезы станка:

1, 3 – нормальный режим обработки, 2, 4 – режим обработки при сдвиге модуля скорости

При обработке поверхности катания колесной пары происходит колебание рабочего инструмента. Характер данных колебаний зависит от различных факторов: направления действия и величин сил, прикладываемых к резу. Образующиеся при этом колебательные процессы можно разделить на несколько групп. К первой группе относятся вынужденные колебания, которые образуются в результате вхождения зубьев фрезы в заготовку. Данный вид вынужденных колебаний формируется, в основном, при выполнении чистовой обработки поверхности катания колесной пары. Ко второй группе можно отнести колебания возникающих при черновой и чистовой обработке поверхности катания колесных пар. Данные колебания формируются при низких скоростях вращения шпинделя станка в подсистеме изгиба инструмента. Основным фактором возникновения данных колебаний является жесткость резания металла поверхности катания колесной пары.

Крутильные автоколебания, возникающие при высоких скоростях вращения шпинделя инструмента при черновой и чистовой обработке поверхности катания колесной пары, относятся к третьей группе вынужденных колебаний. Характер данных колебаний хаотичный и интенсивный. При этом существует большая вероятность появления резонансных колебаний изгибных подсистем инструмента и обрабатываемой колесной пары.

Применение систем модуляции скорости колесотокарного станка с автоподстройкой скорости в зависимости от величин сил, прикладываемых к резу, позволит уменьшить вероятность возникновения подобных нежелательных колебательных процессов.

Выводы

По итогам проведенных в работе расчетов и исследований можно констатировать следующее: разработка и внедрение автоматизированной системы управления колесотокарным станком позволит на 17 % повысить качество восстановления профиля катания колесных пар грузовых вагонов на вагоноремонтных предприятиях.

В результате проведенной работы были получены следующие основные результаты:

1 Установлены причины преждевременного выхода из строя быстроходных фрез специализированных колесотокарных станков.

2 Разработаны методы определения режимов резания металла и скорости подачи рабочего инструмента на станке с использованием модуляции скорости.

3 В работе были проанализированы различные варианты настройки оборудования станка в зависимости от величины динамических возмущений.

4 Установлены зависимости модуля скорости резания и амплитуды автоколебаний концевой быстроходной фрезы станка.

5 Исследован характер колебаний рабочего инструмента станка и проанализированы факторы, которые вызывают данные колебания.

6 Предложена блок-схема автоматизированной системы управления колесотокарным станком.

Список литературы

1 **Клюканов, А. В.** Повышение эффективности устранения дефектов колесных пар механизированных способом в пункте текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов / А. В. Клюканов, А. Н. Шмойлов, Ю. В. Шмойлова // Транспорт, наука, образование в XXI веке : опыт, перспективы, инновации. Материалы VII Международной научно-практической конференции ; ООО «Аэтерна». – Уфа, 2017. – С. 35–37. – ISBN 978-5-00109-298-8.

2 Оптимизация выбора колесотокарных станков / А. И. Быков, В. Н. Жданов, Т. А. Фролова, О. Ю. Кривич // Наука и техника транспорта. 2018. – №4. – С. 8–12. – ISSN 2074-9325.

3 **Троилин, Н. В.** Обновление парка колесотокарных станков : проблемы, перспективы, решения / Н. В. Троилин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 4 (32). – С. 36–37. – ISSN 1817-6089.

4 **Ягьяев, Э. Э.** Методы стабилизации процесса чистового шлифования с учетом изменения состояния технологической системы / Э. Э. Ягьяев, Л. Б. Шрон // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – № 4 (82). – С. 230–235. – ISSN 2658-364X.

5 **Кротов, С. В.** Определение вертикальных динамических сил, действующих на колесо в контакте с рельсом / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 3 (44). – С. 70–76. – ISSN 1815-588X.

6 **Каленов, В. Е.** Создание автоколебательного режима работы в микромеханических системах на основе емкостного преобразователя / В. Е. Каленов, А. В. Корляков, С. В. Кротов // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – № 5 (18). – С. 286–296. – ISSN 1813-8586.

7 **Ким, К. К.** Электрические измерения неэлектрических величин / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. А. Ткачук. – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 137 с. – ISBN 978-5-4486-0731-8.

8 **Ким, К. К.** Средства электрических измерений и их поверка / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. И. Чураков. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 316 с. – ISBN 978-5-8114-6981-9.

9 Информационно-измерительная электромеханическая система / П. О. Саяпина, М. А. Ефремов, Р. Ф. Крупский, Х. Х. Азимов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и

References

1 **Klyukanov, A. V.** Improving the efficiency of eliminating defects in wheelsets by a mechanized method at the point of ongoing uncoupling repair of freight wagons / A. V. Klyukanov, A. N. Shmoilov, Yu. V. Shmoilova // Transport, science, education in the 21st century : experience, prospects, innovations. Materials of the VII International scientific and practical conference ; Aeterna LLC. – Ufa, 2017. – P. 35–37. – ISBN 978-5-00109-298-8.

2 Optimization of the choice of wheel lathes / A. I. Bykov, V. N. Zhdanov, T. A. Frolova, O. Y. Krivich // Science and technology of transport. – 2018. – No. 4. – P. 8–12. – ISSN 2074-9325.

3 **Troilin, N. V.** Updating the fleet of wheel lathes : problems, prospects, solutions / N. V. Troilin // Wagons and carriage facilities. – 2012. – No. 4 (32). – P. 36–37. – ISSN 1817-6089.

4 **Yagyaev, E. E.** Methods for stabilizing the process of finishing grinding, taking into account changes in the state of the technological system / E. E. Yagyaev, L. B. Shron // Scientific notes of the Crimean engineering and pedagogical university. – 2023. – No. 4 (82). – P. 230–235. – ISSN 2658-364X.

5 **Krotov, S. V.** Determination of vertical dynamic forces acting on a wheel in contact with a rail / S. V. Krotov, D. P. Kononov // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2015. – No. 3 (44). – P. 70–76. – ISSN 1815-588X.

6 **Kalenov, V. E.** Creation of self-oscillating mode of operation in micromechanical systems based on a capacitive converter / V. E. Kalenov, A. V. Korlyakov, S. V. Krotov // Nano- and microsystems technology. – 2016. – No. 5 (18). – P. 286–296. – ISSN 1813-8586.

7 **Kim, K. K.** Electrical measurements of non-electrical quantities / K. K. Kim, G. N. Anisimov, A. A. Tkachuk. – Saratov : IPR Media, 2019. – 137 p. – ISBN 978-5-4486-0731-8.

8 **Kim, K. K.** Electrical measuring instruments and their verification / K. K. Kim, G. N. Anisimov, A. I. Churakov. – St-Petersburg : Lan, 2021. – 316 p. – ISBN 978-5-8114-6981-9.

9 Information and measuring electromechanical system / P. O. Sayapina, M. A. Efremov, R. F. Krupsky, Kh. Kh. Azimov // Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Natural sciences and technology. – 2023. – No. I (65). – P. 94–101. – ISSN 2076-4359.

технике. – 2023. – № I (65). – С. 94–101. – ISSN 2076-4359.

10 Саяпина, П. О. Измерительная электромеханическая система / П. О. Саяпина, Р. Ф. Крупский // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2023. – № 5 (69). – С. 23–29. – DOI 10.17084/20764359-2023-69-23.

10 Sayapina, P. O. Measuring electromechanical system / P. O. Sayapina, R. F. Krupsky // Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. – 2023. – No. 5 (69). – P. 23–29. – DOI 10.17084/20764359-2023-69-23.

A. N. Shmoilov

AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR A WHEEL LATHE FOR RESTORING THE ROLLING PROFILE OF WHEEL SETS OF FREIGHT WAGONS

Abstract. The study considers the issue of developing an automated control system for a wheel lathe to restore the rolling profile of wheel sets of freight wagons, and establishes the causes of premature failure of high-speed milling cutters of specialized wheel-rolling machines. The readiness function of the control system for the rotation speed of the machine spindle and the working tool feed was determined. The work analyzes the values of the modulus of the metal cutting speed during the restoration of the rolling profile of the wheelset and the amplitude of the self-oscillation of the working tool of the machine, as well as the results of calculations of the readiness indicators of the restored objects of the dynamic system of the wheel machine and the main characteristics of the elements of the dynamic system of the machine. The nature of the oscillations of the working tool of the machine is investigated and the factors that cause these oscillations are analyzed. A block diagram of an automated wheel-rolling machine control system is proposed and a set of basic elements of the main contour of the control system for a specialized wheel lathe is presented.

Keywords: automated control system, wheel lathe, dynamic system, optimal feed rate of the cutting tool, self-oscillation, high-speed end mill.

For citation: Shmoilov, A. N. Automated control system for a wheel lathe for restoring the rolling profile of wheel sets of freight wagons / A. N. Shmoilov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 44–50. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_44.

Сведения об авторах

Шмойлов Андрей Николаевич

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС),
кафедра «Вагонное хозяйство и наземные транспортные комплексы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: Shmoilov@inbox.ru

Information about the authors

Shmoilov Andrey Nikolaevich

Volga State Transport University (VSTU),
Chair “Carriage Facilities and Land Transport Complexes”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Shmoilov@inbox.ru

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 004.89

DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_51

*И. М. А. Ал-Хафаджи, А. В. Панов***УЛУЧШЕНИЕ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ШЕСТИКОЛЕСНОГО НАЗЕМНОГО РОБОТА
ПО РАЗЛИЧНЫМ ТИПАМ МЕСТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА А*
И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Аннотация. Рассматривается сверточная нейронная сеть для классификации типов поверхностей, с которыми столкнулись мобильные роботы при выполнении задач навигации. Анализируется классификация из пяти типов поверхностей, на которые можно натолкнуться в Ираке: глина, холмы, ямы, дороги и бетонные покрытия. Архитектура сверточной нейронной сети (CNN) состоит из трех блоков свертки со слоями нормализации и активации ReLU, слоя объединения, полносвязанного классификационного слоя после CNN. Обучение с 96,62 % точностью убедило, что это эффективно. Лучевые графики показывают острый спад потерь и улучшение точности классификации, а кросс-матрица подтверждает успешное распознавание большинства типов поверхностей с недопущением ошибки в классификации холмов. CNN позволяет этим роботам быстрее приспособиться к такой сложной местности, динамически корректируя навигационные пути, что значительно повышает надежность и автономность в реальных операциях.

Ключевые слова: матрица путаницы, типы поверхности, алгоритм А*, навигация мобильного робота, сверточная нейронная сеть (CNN), типы поверхности.

Для цитирования: Ал-Хафаджи, И. М. А. Улучшение передвижения шестиколесного наземного робота по различным типам местности с использованием алгоритма А* и нейронных сетей / И. М. А. Ал-Хафаджи, А. В. Панов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 51–57. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_51.

Введение

Шестиколесные роботы играют важную роль в неблагоприятных условиях эксплуатации, таких как зоны препятствий, неровные ландшафты и суровая окружающая среда. Роботы выполняют различные виды деятельности, такие как спасение, разведка и сбор данных, когда люди могут столкнуться с ограничениями доступа или невозможностью безопасного передвижения. Поэтому оптимизация их способности передвижения в различных ландшафтах остается сложной задачей в робототехнике.

Постановка задачи

Исследование направлено на улучшение передвижения шестиколесного наземного робота по различным типам местности с использованием комбинации алгоритма А* и сверточных нейронных сетей (CNN). Основной проблемой является обеспечение классификации поверхности в реальном времени и динамическая корректировка маршрута для оптимизации навигации. Робот должен передвигаться по пяти конкретным типам поверхностей: глина, холмы, ямы, дороги и бетонные покрытия, – каждая из которых предъявляет уникальные требования к мобильности. Использование классификации поверхности на основе CNN в сочетании с алгоритмом А* позволяет улучшить автономную навигацию за счет динамической адаптации к изменениям рельефа, сокращения времени передвижения и повышения надежности работы в сложных условиях.

Целью данного исследования является использование алгоритма А* в сочетании с нейронными сетями для повышения навигационной способности 6-колесного робота на пяти видах поверхностей: глина, холмы, ямы, дороги и бетонные покрытия. Алгоритм А* эффективен при поиске пути и выбран в качестве основного метода, поскольку он может учитывать расстояние до цели и сложность ландшафта, а сверточная нейронная сеть используется для классификации поверхностей, чтобы робот мог справиться с изменяющимися условиями в режиме реального времени.

Обзор предыдущих исследований

В области улучшения передвижения мобильных роботов было проведено множество исследований, основанных на использовании нейронных сетей и алгоритмов планирования маршрута. Ниже представлен краткий обзор некоторых из них:

– Планирование пути с использованием оптимизационных алгоритмов.

Исследование, проведенное на кафедре информатики Технологического университета Ирака, рассматривает улучшение планирования маршрута мобильных роботов в сложных и загруженных средах с помощью оптимизационных алгоритмов. Цель исследования заключалась в разработке алгоритмов, позволяющих строить безопасные и эффективные маршруты с минимальными затратами энергии. Было установлено, что комбинация генетического алгоритма и алгоритма гориллы обеспечивает наилучшее планирование передвижения робота [1].

– Использование искусственных нейронных сетей для планирования траектории робота.

В другом исследовании рассматривалось применение нейронных сетей для управления движением роботизированной руки с несколькими пальцами. Цель работы состояла в обучении системы всем необходимым движениям, что позволяет прогнозировать и управлять положением суставов руки на основе данных, полученных в процессе обучения нейросети. Результаты показали высокую точность и адаптивность метода [2].

– Применение нейросетевых моделей в навигации мобильных роботов.

В данной работе исследуется планирование маршрута робота на основе нейронных сетей. Авторы разработали модель предсказания маршрута робота, использующую методы искусственного интеллекта, что позволило значительно повысить точность и эффективность передвижения роботов в различных условиях [3].

Описание робота

Это мобильное устройство, выполняющее навигационные задачи и оснащенное камерой для анализа окружающей среды. Робот управляется платой Arduino, которая обрабатывает данные, полученные от датчиков, и преобразует их в алгоритмы для дальнейшего анализа. Фронтальная камера делает снимки местности, которые затем классифицируются с помощью трех сверточных нейронных сетей (CNN), предназначенных для классификации и распознавания поверхностей.

Этот робот разработан для работы в различных условиях местности, включая сложные среды: глина, холмы, ямы, дороги и бетонные покрытия.

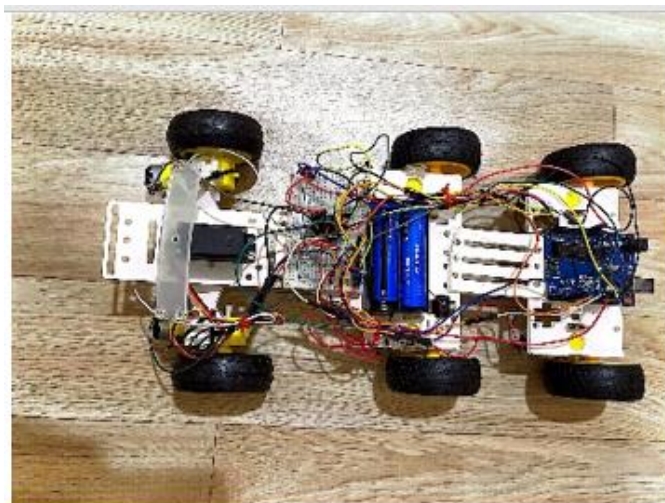


Рис. 1. Экспериментальная модель робота, иллюстрирующая включение электроники и сенсорных систем

Применение алгоритма A* для шестиколесного робота

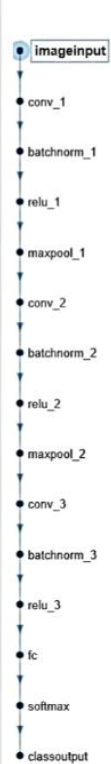
Рельеф, по которому движется робот, моделируется в виде графа, где узлы представляют возможные положения робота, а ребра – пути между ними. Каждый тип поверхности, будь то глина, дороги или холмы, имеет определенную стоимость перемещения. Конструкция должна учитывать сложность рельефа, обеспечивая реалистичное представление условий вождения.

Алгоритм А* использует эвристику для оценки расстояния от текущего положения робота до целевой точки аналогично обработке данных с камеры робота. Например, движение по скользким поверхностям или выбоинам может потребовать больше энергии и времени. Эвристическая оценка позволяет роботу отдавать приоритет наиболее безопасным и энергоэффективным маршрутам.

Для динамической адаптации у робота нет точной информации о типе поверхности, по которой он движется. Характеристики рельефа определяются с помощью камеры и анализируются сверточной нейронной сетью (CNN). Благодаря динамической оценке робот выбирает путь через наиболее безопасную область, например, предпочитая движение по асфальту, даже если он находится дальше от глины. Такой подход формирует структуру CNN, гарантируя ее адаптацию к изменяющимся условиям местности.

Анализ архитектуры сверточной нейронной сети (CNN) для классификации типов поверхности

Для эффективного извлечения признаков из изображений и их последующей классификации использовалась архитектура CNN. Архитектура CNN, используемая для классификации типов поверхности, является самодостаточной и используется вместе с другими слоями для достижения консенсуса. Для начала сеть принимает изображения размером 200×200 пикселей с тремя каналами, которые сначала подлежат нормализации. После нормализации используется первый сверточный слой, содержащий 16 фильтров 3×3 . Однако размеры изображений сохраняются за счёт свойства заполнения. Эти фильтры добавлены к каждой строке изображения или столбцу, позволяя сохранить размер. Эти отрезки изображения или строчки являются признаками. После использования сверточного слоя используется слой нормализации. Этот слой фиксирует ошибки со средним значением и отклонением, что улучшает стабильность работы. Следующим уровнем является слой активации ReLU для введения нелинейности. Максимальный пул используется для выборки информационно богатых областей с помощью окна 2×2 (рис. 2). Второй сверточный подход используется после первого сверточного слоя. Последующий шаг после нормализации – активация maxpool. В этом случае количество фильтров нашего третьего сверточного слоя становится 64. Далее совместно используется сверточная нормализация для уменьшения пространственной размерности функций.



The diagram on the left shows a vertical flow of layers: imageinput, conv_1, batchnorm_1, relu_1, maxpool_1, conv_2, batchnorm_2, relu_2, maxpool_2, conv_3, batchnorm_3, relu_3, fc, softmax, and classoutput.

ANALYSIS RESULT				
Name	Type	Activations	Learnables	
1 imageinput 200x200x3 images with 'zerocenter' normalization	Image Input	200x200x3	-	
2 conv_1 16 3x3x3 convolutions with stride [1 1] and padding 'same'	Convolution	200x200x16	Weights 3x3x3x16	Bias 1x1x16
3 batchnorm_1 Batch normalization with 16 channels	Batch Normalization	200x200x16	Offset 1x1x16	Scale 1x1x16
4 relu_1 ReLU	ReLU	200x200x16	-	
5 maxpool_1 2x2 max pooling with stride [2 2] and padding [0 0 0 0]	Max Pooling	100x100x16	-	
6 conv_2 32 3x3x16 convolutions with stride [1 1] and padding 'same'	Convolution	100x100x32	Weights 3x3x16x32	Bias 1x1x32
7 batchnorm_2 Batch normalization with 32 channels	Batch Normalization	100x100x32	Offset 1x1x32	Scale 1x1x32
8 relu_2 ReLU	ReLU	100x100x32	-	
9 maxpool_2 2x2 max pooling with stride [2 2] and padding [0 0 0 0]	Max Pooling	50x50x32	-	
10 conv_3 64 3x3x32 convolutions with stride [1 1] and padding 'same'	Convolution	50x50x64	Weights 3x3x32x64	Bias 1x1x64
11 batchnorm_3 Batch normalization with 64 channels	Batch Normalization	50x50x64	Offset 1x1x64	Scale 1x1x64
12 relu_3 ReLU	ReLU	50x50x64	-	
13 fc 5 fully connected layer	Fully Connected	1x1x5	Weights 5x160000	Bias 5x1
14 softmax softmax	Softmax	1x1x5	-	
15 classoutput crossentropyex with 'clay' and 4 other classes	Classification Output	-	-	

Рис. 2. Анализ структуры сверточной нейронной сети (CNN), используемой для классификации типов поверхностей

На рис. 2 представлена архитектура сверточной нейронной сети (CNN), используемой для классификации изображений на основе типа поверхности, например, «глина» и других категорий. Модель состоит из нескольких слоев, включая сверточные слои, пакетную нормализацию, функции активации (ReLU), пулирование максимальных значений, полностью связанный слой и окончательный слой классификации (Softmax).

Из таблицы видно, что данная сверточная нейронная сеть состоит из операторов свертки, операторов нормализации, активационных функций, операций объединения, полносвязного слоя и классифицирующего слоя Softmax. CNN анализирует входные данные и относит их к одному из пяти типов поверхностей.

Архитектура сверточной нейронной сети (CNN) для классификации типов поверхностей

№ п/п	Название слоя	Тип слоя	Активации	Параметры (обучаемые)
1	imageinput	Входное изображение	200×200×3	Нормализация («zerocenter»)
2	conv_1	Сверточный слой	200×200×16	16 фильтров 3×3, шаг 1, padding 'same'
3	batchnorm_1	Нормализация пакета	200×200×16	16 каналов
4	relu_1	Функция активации ReLU	200×200×16	—
5	maxpool_1	Максимальное объединение	100×100×16	2×2, шаг 2, padding [0 0 0 0]
6	conv_2	Сверточный слой	100×100×32	32 фильтра 3×3, шаг 1, padding 'same'
7	batchnorm_2	Нормализация пакета	100×100×32	32 канала
8	relu_2	Функция активации ReLU	100×100×32	—
9	maxpool_2	Максимальное объединение	50×50×32	2×2, шаг 2, padding [0 0 0 0]
10	conv_3	Сверточный слой	50×50×64	64 фильтра 3×3, шаг 1, padding 'same'
11	batchnorm_3	Нормализация пакета	50×50×64	64 канала
12	relu_3	Функция активации ReLU	50×50×64	—
13	fc	Полносвязный слой	1×1×5	5 нейронов, веса 5×160000
14	softmax	Softmax-активация	1×1×5	—
15	classoutput	Выход классификации	—	Классификация на глину, холмы, ямы, дороги и бетонные покрытия

Таким образом, данная архитектура решает задачу классификации изображения одной из пяти категорий поверхностей. Также отметим, что фильтрации тех или иных признаков способствует применение операторов свертки. Слой нормализации данных предварительно обрабатывает данные и упрощает процесс обучения. Полносвязный слой на последнем этапе объединяет полученные признаки, а Softmax присваивает вероятности принадлежность к классу.

Работа состоит из более чем 5000 изображений, позволяющих классифицировать тип поверхности, с которой сталкивается робот перед своей камерой. Полный набор включал в себя в общей сложности 500 изображений, которые были разделены на категории: глина, холмы, ямы, дороги и бетонные покрытия. Каждый показанный тип был точно определен с помощью обученного оператора CNN, что позволило роботу правильно адаптировать навигацию к каждому свойству поверхности. Эти изображения были полезны для повышения точности классификации и предоставления роботу наилучшего маршрута с учетом текстуры, влажности и других характеристик поверхности (рис. 3).

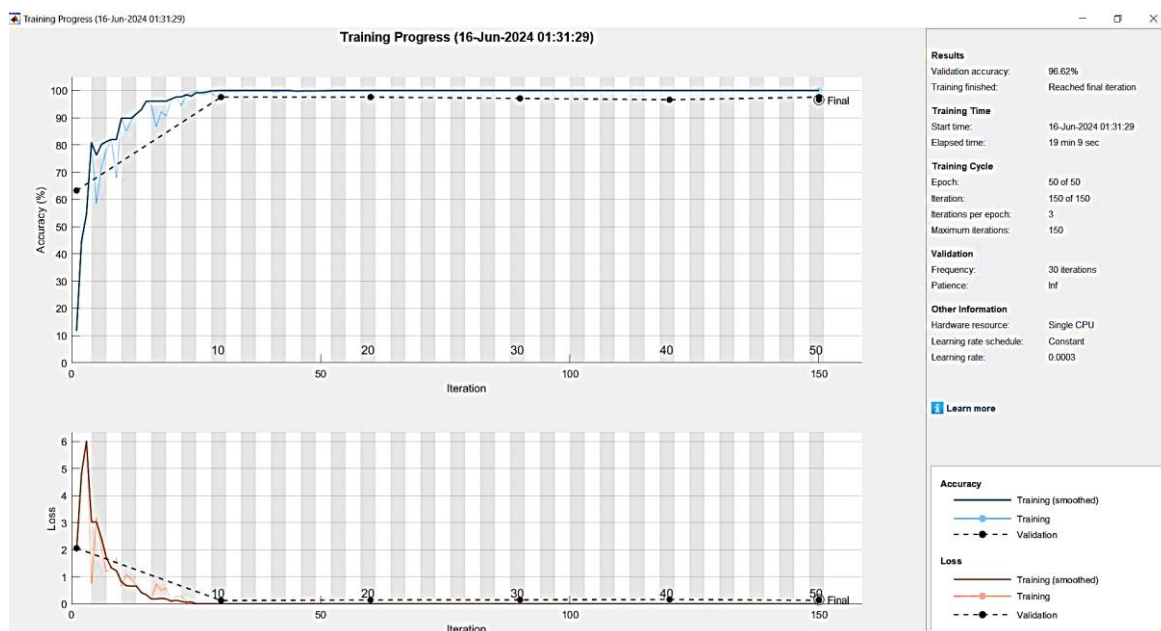


Рис. 3. График прогресса обучения модели сверточной нейронной сети с использованием алгоритма A*

На рис. 4 изображена траектория робота, нанесенная с использованием алгоритма A*, которая отражает перемещение от точки выхода к рабочему назначению. Оригинальная точка старта изображена синим маркером в круглом поле, в то время как желаемая точка цели обозначена круглым знаком зеленого цвета. Красные объекты с кругом указывают на препятствия, которые становятся в пути. Алгоритм A*, показывающий движение, представляет собой подход поиска динамической точности маршрута к пути робота, что делает его кратким, с учетом всех признаков внешней среды. На рис. 4 можно увидеть, как алгоритм успешно проходит через все препятствия, чтобы достичь заданного пункта назначения по кратчайшему пути. Как описано выше, алгоритм A* визуализирует, насколько эффективно он работает в процессе навигации. В большинстве случаев также можно увидеть, насколько уникален и адаптивен алгоритм A* в реальных условиях.

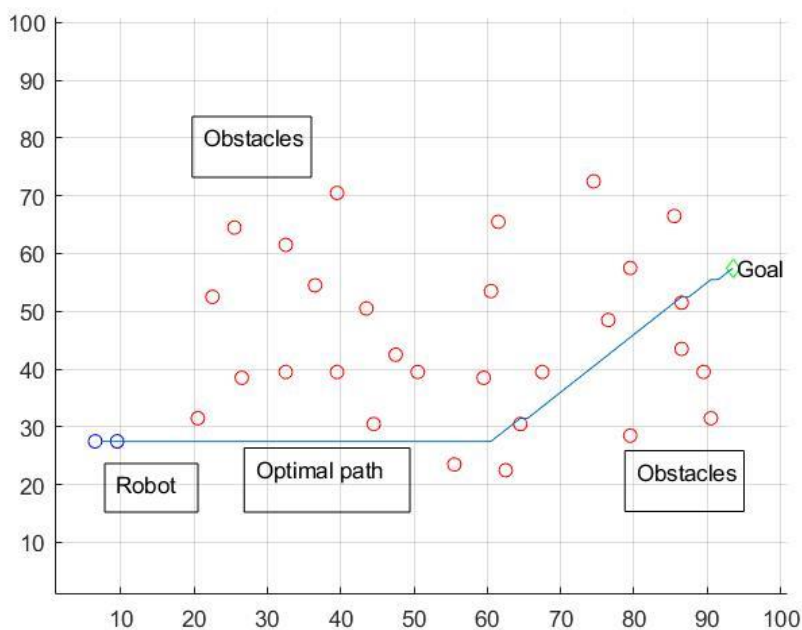


Рис. 4. Маршрут робота, найденный с использованием алгоритма A*

Заключение

Результаты исследования подтверждают великолепные возможности использования алгоритмического комбинирования A* со сверточными нейронными сетями в решении проблем сложнейшей навигации: 96,62 % точности предполагают существенный прогресс не только в выборе лучшего маршрута, но и в классификации ландшафтов. A* с CNN позволяют роботам овладевать динамическими поворотными движениями вокруг артефактов и адаптироваться к различным оборачивающим слоям. Эти результаты делают эту разработку перспективной для ежедневного использования в критических задачах, таких как аварийные процессы схождения группы либо агентов или рекогносцировочные операции, когда быстрота и точность перемещения необходимы как никогда. Исследователи продолжают совершенствование навигационных систем за счёт использования более сложных алгоритмов машинного обучения. Для этого планируется разработка трёх уникальных CNN: каждая оптимизирована по-разному в плане конкретных параметров и архитектуры для улучшения качества критеризации и классификации. Их относительная производительность, а в дальнейшем, возможно, и универсальность, будет детально изучена в контексте эксперимента.

Список литературы/References

- 1 **Krizhevsky, A.** ImageNet Classification Using Deep Convolutional Neural Networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2012. – DOI 10.1145/3065386.
- 2 **He, Q.** Deep residual learning for image recognition / Q. He, S. Zhang, S. Ren, Q. Sun // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2016. – DOI 10.1109/CVPR.2016.90.
- 3 **Simonyan, K.** Very deep convolutional networks for image recognition at large scales / K. Simonyan, A. Zisserman // arXiv preprint arXiv:1409.1556. – 2014. – URL: <https://arxiv.org/abs/1409.1556> (date of access: 15.10.2024).
- 4 **Long, J.** Fully convolutional networks for semantic segmentation / J. Long, E. Shelhamer, T. Darrell // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2015. – DOI 10.1109/CVPR.2015.7298965.
- 5 Deep feature learning for discriminative localization / B. Zhou, A. Khosla, A. Lapedriza [et al.] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2016. – DOI 10.1109/CVPR.2016.319.
- 6 **Hart, P. E.** Formal Basis for Heuristic Determination of Minimum Cost Paths / P. E. Hart, N. J. Nilsson, B. Raphael // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. – 1968. – DOI 10.1109/TSSC.1968.300136.
- 7 **Stentz, A.** Optimal and efficient path planning for partially-known environments // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1994. – DOI 10.1109/ROBOT.1994.351061.
- 8 **Thrun, S.** Probabilistic Robotics / S. Thrun, W. Burgard, D. Fox // Cambridge, Massachusetts : MIT Press. – 2005. – 647 p. – ISBN 978-0-262-20162-9.
- 9 Invitation to 3D Vision : From Images to Geometric Models / Y. Ma, S. Soatto, J. Kosechka, S. S. Sastry // New York. – USA : Springer. – 2004. – 528 p. – ISBN 978-0-387-00893-6.
- 10 **Wong, J. Y.** Theory of ground vehicles. 3rd ed. – New York, NY : Wiley, 1989. – 528 p. – ISBN 978-0-471-35461-3.

I. M. A. Al-Khafaji, A. V. Panov

IMPROVING THE LOCOMOTION OF A SIX-WHEELED GROUND ROBOT ON DIFFERENT TYPES OF TERRAIN USING A* ALGORITHM AND NEURAL NETWORKS

Abstract. A convolutional neural network is considered for classifying surface types encountered by mobile robots during navigation tasks. The classification of five surface types encountered in Iraq is analyzed: clay, hills, potholes, asphalt roads, and concrete pavements. The architecture of the convolutional neural network (CNN) consists of three convolution blocks with normalization and ReLU activation layers, a pooling layer, a fully connected classification layer after the CNN. The training with 96.62 % accuracy convinced that it is effective. The ray plots show a sharp decrease in loss and improvement in classification accuracy,

and the cross matrix confirms successful recognition of most surface types with no misclassification of hills. CNN allows these robots to adapt faster to such complex terrain by dynamically adjusting navigation paths, which significantly improves reliability and autonomy in real-world operations.

Keywords: confusion matrix, surface types, A* algorithm, mobile robot navigation, convolutional neural network (CNN), surface types.

For citation: Al-Khafaji, I. M. A. Improving the locomotion of a six-wheeled ground robot on different types of terrain using A* algorithm and neural networks / I. M. A. Al-Khafaji, A. V. Panov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 51–57. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_1_51.

Сведения об авторах

Ал-Хафаджи Исра М. Абдаламир

Институт информационных технологий (МИРЭА) – Российский технологический университет,
кафедра корпоративных информационных систем,
аспирант,

Университет Мустансирия,
(Багдад, Ирак),
факультет естественных наук,
ассистент,
e-mail: misnew6@gmail.com

Панов Александр Владимирович

Институт информационных технологий (МИРЭА) – Российский технологический университет,
кафедра корпоративных информационных систем,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: Iks.ital@yandex.ru.

Information about the authors

Al-Khafaji Israa M. Abdalameer

Institute of Information Technologies (MIREA) – Russian Technological University,
Chair of Information Information Systems,
Postgraduate Student,

Mustansiriyah University,
(Baghdad, Iraq),
Department of Natural Sciences,
Assistant,
e-mail: misnew6@gmail.com

Panov Alexander Vladimirovich

Institute of Information Technologies (MIREA) – Russian Technological University,
Chair of Information Information Systems,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Iks.ital@yandex.ru.

А. И. Долгий, А. Е. Хатламаджиян, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов

КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ «ОТ КОЛЕСА»

Аннотация. Предложен новый подход к разделению режимов работы железнодорожной грузовой сортировочной станции на основе объективных данных, получаемых при слиянии информации от различных датчиков и станционных систем. Предложена концепция классификации работы станции «от колеса», то есть на основе данных от автоматических считывающих устройств, в противовес существующей системе расчета эффективности работы станции на основе вручную вводимой информации. При описании новой концепции представлена формализация основных станционных показателей: простоя вагонов, рабочего парка и интенсивности прибытия поездов, – по сути являющихся количественными переменными, значения которых отражают работу станции. Показано применение предлагаемого подхода на примере статистических данных о работе станции Челябинск-Главный, и описаны режимы работы станции, выявленные на основе экспертной оценки рассчитанных показателей. Предложено развитие разрабатываемого подхода в качестве инструмента предиктивной аналитики работы станции и адресной выработки мер по реализации эффективного функционирования железнодорожных сортировочных станций.

Ключевые слова: цифровая железнодорожная станция, автоматизация станционной работы, расчет показателей «от колеса», повышение эффективности сортировочной станции.

Для цитирования: Классификация режимов работы железнодорожной станции на основе реальных данных «от колеса» / А. И. Долгий, А. Е. Хатламаджиян, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 58–68. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_58.

Введение

Ввиду динамичных изменений характера и структуры транспортно-логистических услуг в России и в мире в компании «Российские железные дороги» стали уделять особое внимание развитию комплексных интеллектуальных систем, направленных на повышение прогнозируемости и управляемости перевозочного процесса [1]. Начиная с 2023 года на сети дорог внедряются такие современные автоматизированные системы планирования и контроля, как «Вариантный график движения поездов» (ВГДП) [2], «Сменно-суточное планирование» (ССП) [3], «График исполненного движения нового поколения» (ГИД НП) [4] и др. Функционирование этих систем основывается на современных методах сбора и обработки данных, использующих достижения искусственного интеллекта (ИИ) в целом и машинного обучения в частности. Среднесрочной целью развития в этом направлении является создание единой аппаратно-программной платформы сквозного (от зарождения до погашения вагонопотока) планирования и управления перевозочным процессом средствами информационно-управляющих систем и единой линейки исполнительных систем на перегонах, станциях и сортировочных горках (системы автоматического управления сортировочным процессом, электрической и диспетчерской централизации с автоматическим управлением по данным оперативного планирования). В настоящее время годовое, месячное и оперативное планирование осуществляется на основе зачастую неоднородной и поэтому вручную обновляемой информации, поступающей от различных информационных систем. Крупнейшим источником «ручных» данных признается сортировочная станция, на которой неавтоматизированным способом решаются важнейшие для процесса исполнения графика движения поездов задачи поездообразования, оперативного планирования, межхозяйственного ресурсоснабжения и многие другие.

В работах [5–6] авторским коллективом данного направления была предложена и подробно рассмотрена идеология анализа, прогнозирования и принятия решений на основе реальных достоверных данных, названная анализом данных «от колеса».

1 Постановка задачи

Для оптимизации технологических процессов на сортировочных станциях, исключения ручного ввода информации и объективного контроля расчлененного простоя в 2022 году в ОАО «РЖД» был дан старт важнейшему проекту – «Цифровая железнодорожная станция» (далее – ЦЖС) с пилотной реализацией на станции Челябинск-Главный Южно-Уральской железной дороги [7]. В 2022 году специалистами АО «НИИАС» была разработана и утверждена в ОАО «РЖД» Методология ЦЖС [8], которая охватывает работу почти двух десятков различных хозяйств и подразделений Компании, участвующих в технологии работы сортировочной станции. Основной целью этого документа является описание методов, подходов и инструментария по приведению существующих бизнес-процессов к целевому состоянию автоматического управления работой сортировочной станции в целом.

В 2023 году началась разработка проектно-сметной документации по проекту ЦЖС, и АО «НИИАС», как головной исполнитель, приступил к строительству пилотного объекта. Все 23 внедряемых модуля были разделены на две категории: инфраструктурные и программные. Среди инфраструктурных модулей первый приоритет был отдан комплексным, распределенным по физическому расстоянию и наиболее трудозатратным автоматизированным системам [9]. К таким системам относятся «Комплекс компьютерного зрения для контроля занятости сортировочных путей» (КЗСП) [10], «Интеллектуальный пульт управления ЭЦ» (ИРПЦ), «Интегрированный пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях» (ПСС) [11] и «Система контроля и подготовки информации для АСУ СС о перемещениях вагонов и локомотивов в реальном времени» (СКПИ ПВЛ РВ) [12] (рис. 1).

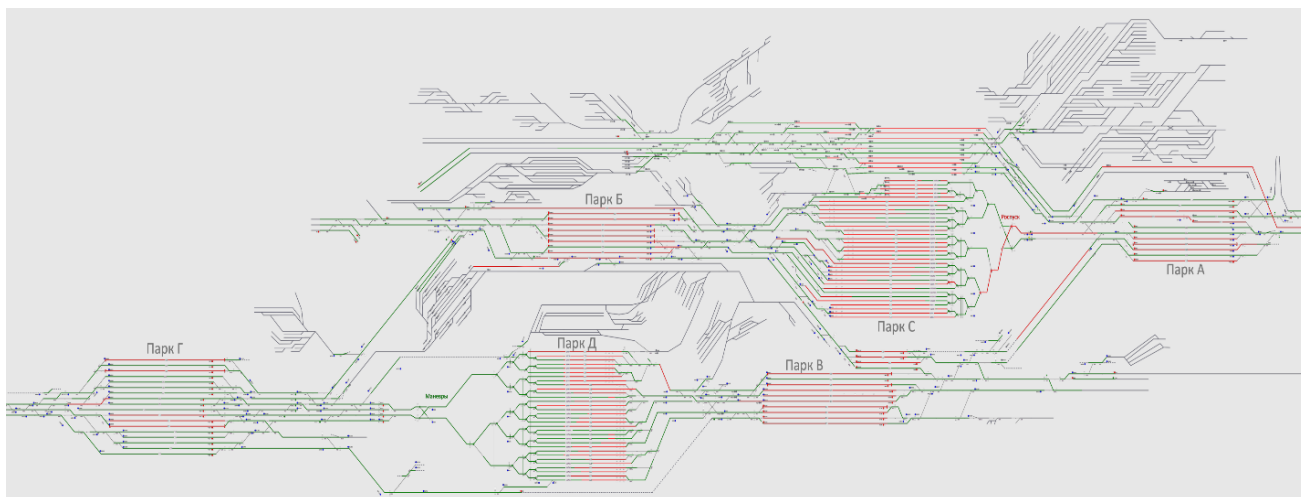


Рис. 1. Интерфейс СКПИ ПВЛ РВ (станция Челябинск-Главный)

С научно-практической точки зрения, по мнению авторов настоящей работы, первостепенный интерес представляют данные, получаемые от системы СКПИ ПВЛ РВ, состоящей из распределенной по всем паркам станции сети индуктивных датчиков прохода колеса и точек контроля визуальной информации о вагонах и локомотивах, включающих устройства технического зрения. С помощью СКПИ ПВЛ РВ впервые в истории российского железнодорожного транспорта формируется цифровая повагонная модель работы станции в автоматическом режиме и реальном времени «от колеса», то есть на основе сопоставления данных от датчиков (рис. 2) с плановым списком – отчетностью о станционных операциях (прибытия, проследования между парками, отцепки локомотива, расформирования и других).

Результат работы СКПИ ПВЛ РВ в совокупности с результатами вышеуказанных смежных систем представляют собой уникальную выборку данных для экспертизы текущего состояния и среднесрочного прогноза режима работы станции с адресной детализацией причин приближения к соответствующим точкам бифуркаций. Под режимом работы станции в данном случае предлагается понимать состояние технологического процесса (далее ТП), характеризуемое определенным значением (коридором значений) наиболее важных комплексных показателей работы станции: простоя

вагонов, прибывших транзитом с переработкой¹ на станцию, рабочего парка вагонов и интенсивности прибытия-отправления вагонов на станции.



Рис. 2. Счетная точка универсальная (СТУ) в составе СКПИ ПВЛ РВ

Задачами настоящей работы являются:

- 1) классификация режимов работы станции на основании достоверной информации о состоянии ТП «от колеса», разделяющая их на эффективные и неэффективные режимы согласно целевой функции максимальной переработки при минимальных простоях вагонов;
- 2) формулировка гипотез о причинах переходов между режимами, а также описание принципов упреждения снижения эффективности работы станции.

2 Используемые данные

Как уже было сказано, ранее в работах [5, 6] была предложена и реализована идея формирования основных показателей работы сортировочной станции (прибытие, отправление, вагонооборот, простой вагонов и другие) на основе объективной статистики, собранной «от колеса». В данном исследовании предлагается развитие данной тематики – определение режимов работы сортировочной станции на основе анализа показателей выполнения технологического процесса на основе таких данных.

Эффективная работа сортировочной станции предполагает оптимизацию времени обработки среднестатистического вагона, поступающего с перегона. Следовательно, обобщенным показателем эффективности станции является время простоя вагона (*Delay*, далее – *D*). Если рассматривать станцию с точки зрения теории массового обслуживания, как это было описано в работах [13, 14], то обобщенными комплексными факторами, влияющими на время обработки (простоя) вагона будут скорость поступления вагонов на станцию (интенсивность прибытия вагонов) (*Arrival*, далее – *A*), а также количество вагонов на станции в заданный момент времени (*Car fleet*, рабочий парк станции, далее – *CF*).

Так как скорость переработки вагонопотока станцией зависит в большей степени от вагонов, следующих по всей технологической цепочке сортировочного процесса от расформирования до зарождения новых составов, дальнейшее описание представлено для вагонов, поступающих на расформирование и повторное формирование – переработанных на станции.

¹ Вагоны местного формирования и транзитные вагоны без переработки не учитываются в исследовании, так как оказывают меньшее влияние на процесс расформирования, так как первые относительно редкие (<5 %), а вторые имеют низкий простой (норма 2,2 часа против 14 часов для транзитных вагонов с переработкой).

В качестве анализируемых данных средствами СКПИ ПВЛ РВ была собрана посменная статистика работы станции за 8 месяцев 2024 года по параметрам A , CF , D .

В следующем разделе представлены предложения о классификации режимов работы станции в общем ходе технологического процесса переработки вагонопотока на основании измерения показателя простоя вагонов, а также показано изменение влияния интенсивности прибытия вагонов и рабочего парка станции на простой в различных режимах функционирования станции.

3 Предлагаемое решение

С целью разделения категорий эффективности работы сортировочной станции на режимы взят основной показатель работы станции, влияющий на эффективность работы всей сети железных дорог – простой вагонов D . Согласно отчету о работе сортировочных станций (ДО-24ВЦ) за 2024 год на станции Челябинск-Главный норма D транзитных вагонов с переработкой составляет 14 часов, без переработки – 2,2 часа. Норма для значения интенсивности прибытия в ДО-24 отсутствует.

Для вычисления простоя «от колеса» были использованы моменты времени, взятые по каждому транзитному вагону, зашедшему в грузовую зону станции Челябинск-Главный через счетную точку универсальную (датчики прохода колеса с видеокамерами) на входе и датчики прохода колеса на выходе станции. Для вычисления рабочего парка использованы значения количества вагонов на станции через каждые 15 минут в модели перемещения СКПИ ПВЛ РВ. Для вычисления интенсивности прибытия использовано количество вагонов, прибывших на станцию Челябинск-Главный. Полученные графики значений для D , A и CF представлены на рис. 3–5.

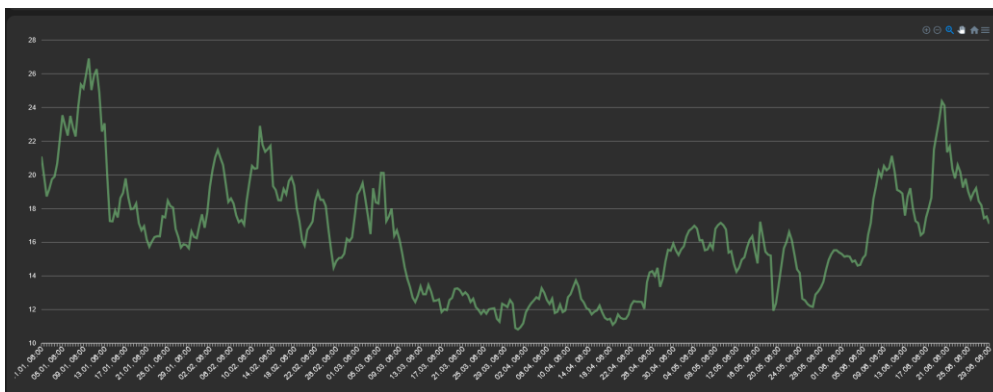


Рис. 3. Посменный график простоя вагонов, переработанных на станции Челябинск-Главный

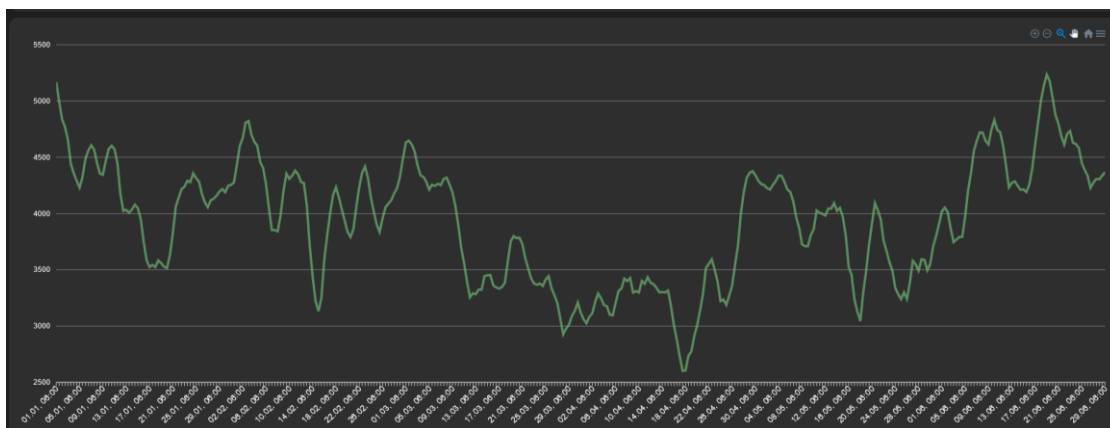


Рис. 4. График изменения среднесменного рабочего парка

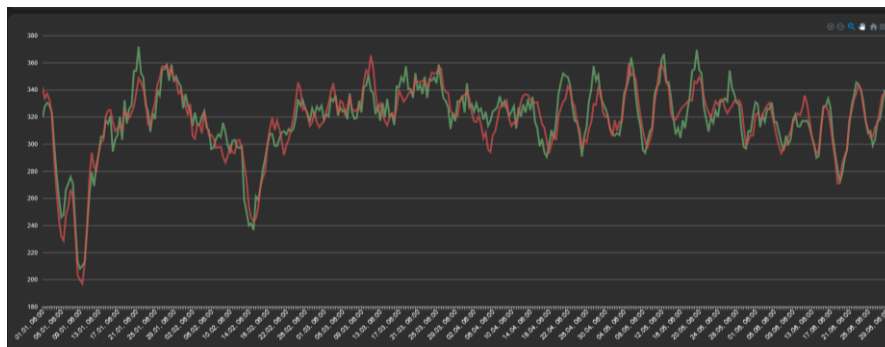


Рис. 5. Посменный график изменения интенсивности вагонов, принимаемых (зеленый) и отправляемых (красный) на ст. Челябинск-Главный

На основе экспертного анализа параметров в наблюдаемый период времени можно отчетливо выделить 4 основных режима работы станции со следующими условными наименованиями:

- 1) малые значения CF и D и высокое A – *эффективный режим*. Станция работает близко к норме (даты с 12.03 по 22.04);
- 2) критические значения CF или D при высокой интенсивности A – *нагруженный режим*. Станция работает на предельных значениях (2.02–11.03 и 30.05–30.06);
- 3) большие значения CF , D и A – *умеренный режим*. Переход между эффективным и нагруженным режимом (23.04–29.05);
- 4) малое CF и большое значение D при малом A – *межсезонный режим* (с 1.01 по 1.02).

Исходя из анализа технологического процесса работы станции (норма простоя транзитных вагонов с переработкой 14 часов, норма рабочего парка 4100 вагонов, средняя интенсивность прибытия в течение 2024 года – 280 вагонов/час), а также экспертного опроса дежурного персонала станции (согласно данным опроса, станция справляется с вагонопотоком при простоях не выше 20 часов или рабочем парке не выше 5000 вагонов) Челябинск-Главный в качестве интервалов, задающих значения CF , D и A , экспертом использовались следующие значения для оценки²:

$CF \in [0; 4100]$ – малое; $CF \in [4100; 5000]$ – большое; $CF \in [5000; \infty]$ – критическое;

$D \in [0; 14]$ – малое; $D \in [14; 20]$ – большое; $D \in [20; \infty]$ – критическое;

$A \in [0; 280]$ – малое; $A \in [280; \infty]$ – большое.

Вполне очевидно так же, что существуют и другие режимы, включающие остальные комбинации выведенных качественных показателей ключевых параметров станции, не выявленные при экспертном анализе. Для формирования матрицы всех возможных режимов методом экспертной оценки введем укрупненную качественную градацию исследуемых параметров. Значение каждого параметра могут быть характеризованы как малое, большое, критическое. Полученная матрица всех возможных режимов в заданной классификации представлена в табл. 1.

Таблица 1

Режимы работы станции на основе качественных характеристик ее ключевых параметров

	A малое	A большое
CF малое, D малое	R_1	R_8
CF малое, D большое	R_2	R_9
CF малое, D критическое	R_3	R_{10}
CF большое, D малое	R_4	R_{11}
CF большое, D большое	R_5	R_{12}
CF большое, D критическое	R_6	R_7
CF критическое, D малое	R_7	R_7
CF критическое, D большое	R_7	R_7
CF критическое, D критическое	R_7	R_7

² В настоящем исследовании использована субъективная классификация режимов по оценкам экспертов. В дальнейшем планируется формализация оценок на основе аппарата нечеткого вывода.

Ниже представлено описание режимов работы станции исходя из комбинации качественных характеристик ключевых параметров также с условным наименованием:

R_1 – *холостой режим*. Станция не загружена и не принимает поезда. Возможен в критических, довольно редких ситуациях.

R_2 – *межсезонный режим*. Станция не загружена, при этом принимает и отправляет поезда ниже своих возможностей. Переход станции на новый календарный год (перезаключение договоров и другие причины).

R_3 – *неэффективный режим*. Станция не загружена, при этом принимает ниже своих возможностей и задерживает максимально вагон. Возможен в случае неэффективного планирования работы полигона.

R_4 – *разгружающий режим*. Станция загружена, не принимает поезда, при этом вагоны на ней не задерживаются. Возможен при необходимости разгрузки станции после состояний, приведших к длительному простоя вагонов.

R_5 – *режим застоя*. Станция загружена, не принимает поезда при сниженной отправке поездов. Возможен при неэффективном управлении сортировочной станцией.

R_6 – *режим остановки*. Станция загружена, не принимает поезда, останавливая их отправку. Остановка работы станции по причине нештатных ситуаций.

R_7 – *нагруженный режим*. Станция загружена максимально, прием и отправка составов затруднены. Неэффективное планирование работы станции.

R_8 – *эффективный режим*. Станция не загружена при интенсивном приеме составов. Штатная работа сортировочной станции при эффективном планировании ресурсов.

R_9 – *переходной режим*. Станция не загружена, при этом интенсивно принимает поезда при сниженной отправке. Переход к неэффективной работе станции из-за превышения приема над отправкой.

R_{10} – *режим неготовности*. Станция принимает интенсивно поезда, при этом вагоны невозможно отправить, но их немного на станции. Интенсивный прием вагонов при неэффективном управлении технологическим процессом, либо отсутствие поездных локомотивов.

R_{11} – *сверхэффективный режим*. Станция загружена, принимает интенсивно поезда, при этом вагоны на ней не задерживаются. Работа сортировочной станции с повышенной эффективностью при большой загрузке.

R_{12} – *умеренный режим*. Станция загружена, принимает поезда при сниженной отправке поездов. Штатная работа сортировочной станции при снижении количества локомотивов или эффективности распределения ресурсов.

В рамках настоящего исследования также были проведены анализ взаимного влияния между параметрами и оценка значений в различных режимах. В качестве меры взаимного влияния показателей работы станции использован коэффициент корреляции Пирсона:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y},$$

где $\text{cov}(X, Y)$ – ковариация векторов X и Y ; σ_X , σ_Y – среднеквадратическое отклонение соответственно векторов X и Y .

На рис. 6 показаны графики изменения коэффициента корреляции между показателями простоя и интенсивности прибытия вагонов (обозначен желтым цветом); значение общего рабочего парка, нормализованное к интервалу $[-1; 1]$ (синий цвет). Также на рис. 6 дополнительно представлена корреляция показателей простоя и отправления (зеленый цвет). В качестве значений векторов X и Y использованы соответственно значения перечисленных величин. Значениями на оси ординат являются средние значения каждого показателя за одну смену, измеренные за период времени 6 месяцев. Корреляция рассчитывалась за двухнедельные периоды.

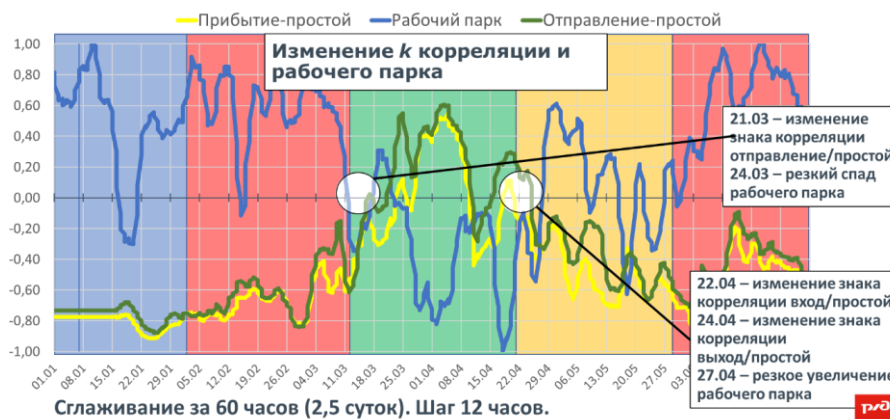


Рис. 6. Иллюстрация наиболее информативных значений, количественно отображающих работу сортировочной станции (желтая линия – взаимное влияние интенсивности прибытия и простоя, синяя линия – изменение рабочего парка станции, зеленая линия – взаимное влияние интенсивности отправления и простоя)

Укрупненно режимы работы на основе экспертной оценки размечены следующим образом: синий – межсезонный, зеленый – эффективный, красный – нагруженный, желтый – умеренный.

Как видно из рис. 6, характерной особенностью исследуемого технологического процесса является то, что момент перехода между эффективным и другими режимами работы характеризуется изменением знака коэффициента корреляции между интенсивностью прибытия и простоя вагонного парка. В эффективном режиме происходит некоторое увеличение простоя вагонов после увеличения интенсивности прибытия – загрузка станции повышается, а также уменьшение простоя после уменьшения интенсивности прибытия – станция продолжает ритмичную работу и, при уменьшении входного потока, эффективнее обрабатывает вагоны на сортировочных горках. В остальных режимах корреляция становится отрицательной, то есть даже при уменьшении входного потока простоя вагонного парка может увеличиваться или не меняться, что говорит о наличии других существенных факторов, отрицательно влияющих на эффективность работы и являющихся объектом дальнейшей работы по направлению настоящего исследования.

4 Обсуждение результатов

На основе анализа причин переходов в различные режимы работы станции были сделаны адресные выводы по каждому выявленному случаю за соответствующий период.

В случае 1 (межсезонный режим) станция довольно продолжительное время в начале календарного года, несмотря на очень низкий входной поток, работала с крайне низкой эффективностью по очевидно независимым от инфраструктуры станции причинам. Поэтому, накопив большой рабочий парк при возобновлении интенсивного подхода, станция перешла из межсезонного режима работы 31.01 сразу в нагруженный режим).

С 12.03 станции удалось перейти сразу в эффективный режим работы, освободившись от всего избыточного парка вагонов. Гипотезой здесь может быть уменьшение парка локомотивов, находящегося на техническом обслуживании, относительно общего локомотивного парка на станции с 50 до 30 % и, как следствие, снижение среднего времени подачи локомотивов для отправления выставленных в парк отправления поездов. Далее с 23.04 произошел переход на умеренный режим работы, но почти сразу увеличился процент составов с многократно переработанными вагонами на четной стороне, после чего с 01.06 станция опять вошла в нагруженный режим – началось постепенное растрачивание набранных резервов перерабатывающей способности и увеличился поток «угловых» передач – групп вагонов, перемещаемых для расформирования в противоположную относительно прибытия систему (из четной в нечетную или из нечетной в четную).

На основе предварительных результатов исследования можно сделать вывод о возможности разработки модуля прогнозирования и планирования режима работы станции (МПРС) с адресными рекомендациями по превентивному удержанию эффективного режима работы станции или нивелированию последствий от нештатных ситуаций.

Например, за три дня до возможного перехода из эффективного в нагруженный режим работы МПРС сообщает оператору (начальнику станции) о негативном прогнозе и вероятных причинах его появления. Причинами ухудшения работы станции, то есть перехода в неэффективные режимы работы ($R_1 - R_7, R_{10}, R_{11}$) могут быть выявленные тренды к снижению эксплуатируемого парка локомотивов либо увеличению доли «смешанных» поездов, которые идут на расформирование сразу на две сортировочные системы, или другие события, предполагающие ощутимые изменения сложившихся благоприятных условий работы. В таких случаях могут потребоваться дополнительные организационные меры по штату, отмену отпусков, привлечение дополнительных трудовых ресурсов из смежных хозяйств (вагонников, локомотивных бригад) и другие.

В среднесрочной перспективе на базе ЦЖС возможен переход на полностью автоматический режим работы подсистемы «Сменно-суточное планирование» и включение разрабатываемого решения в ежемесячный процесс разработки вариантного графика движения поездов на базе ВГДП ИСУЖТ.

Выводы

В результате проведенного исследования идентифицированы режимы, отражающие эффективность работы грузовой сортировочной станции на основе ключевых показателей: простоя вагонов, рабочего парка и интенсивности прибытия поездов. Предложена гипотеза о смене режимов, что позволяет создать основу для модуля превентивного определения уровня эффективности сортировочных процессов или нивелирования последствий нештатных ситуаций в процессе обработки и приема грузов на сортировочной станции. В дальнейшем планируется разработка нечеткой базы знаний адресных причин снижения эффективности работы грузовой станции и системы поддержки принятия решений в реальном времени на основе фактического состояния станции и предыстории ее функционирования. Это позволит прогнозировать и адресно реагировать на потенциальные риски потери эффективности технологических процессов как на самой сортировочной станции, так и оценивать их влияние на актуальные планы работы полигона и всей сети ОАО «РЖД».

Список литературы

- 1 Долгий, А. И. Концептуальный подход к построению современной платформы управления перевозочным процессом в ОАО «РЖД» / А. И. Долгий // Труды АО «НИИАС». – 2021. – С. 9–31. – ISBN 978-5-94833-099-0.
- 2 Патент RU 2680540 C1. Система для формирования вариантных графиков движения поездов на полигоне железнодорожной сети при производстве ремонтно-путевых работ / И. Р. Гургенидзе, Р. Т. Идиатулин, С. П. Остроумов [и др.]. – № 2018120500 ; заявл. 04.06.2018 ; опубл. 22.02.2019, Бюл. № 6. – 8 с.
- 3 Фрольцов, В. Д. Комплексное сменно-суточное планирование тяговых ресурсов под поезда в рамках ИСУЖТ / В. Д. Фрольцов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018). – 2018. – С. 21–23. – EDN VTMUSU.
- 4 Дежков, М. А. Увеличение пропускных и провозных способностей Восточного полигона с помощью использования передовых систем интервального регулирования движения поездов / М. А. Дежков, К. А. Тарасов, М. А. Чернин // Надежность. – 2024. – Т. 24, №. 3. – С. 3–9. – DOI 10.21683/1729-2646-2024-24-3-3-9.
- 5 Формирование объективных показателей работы сортировочной станции на основе данных

References

- 1 Dolgiy, A. I. Conceptual approach to building a modern platform for managing the transportation process at JSC Russian Railways / A. I. Dolgiy // Proceedings of JSC NIIAS. – 2021. – P. 9–31. – ISBN 978-5-94833-099-0.
- 2 Patent RU 2680540 C1. System for generating alternative train schedules on a railway network test site during track repair work / I. R. Gurgenzidze, R. T. Idiatulin, S. P. Ostroumov [et al.]. – No. 2018120500 ; stated 04.06.2018 ; published 22.02.2019, Bulletin No. 6. – 8 с.
- 3 Froltsov, V. D. Integrated shift-daily planning of traction resources for trains within the framework of ISUZhT / V. D. Froltsov // Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2018). – 2018. – P. 21–23. – EDN VTMUSU.
- 4 Dezhkov, M. A. Increasing the throughput and carrying capacity of the Eastern Polygon through the use of advanced interval train control systems / M. A. Dezhkov, K. A. Tarasov, M. A. Chernin // Reliability. – 2024. – Vol. 24, No. 3. – P. 3–9. – DOI 10.21683/1729-2646-2024-24-3-3-9.
- 5 Formation of objective performance indicators of a marshalling yard based on “wheel” data /

«от колеса» / А. Е. Хатламаджиян, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов, В. С. Иерусалимов // Автоматика на транспорте. – 2024. – Т. 10, № 3. – С. 254–268. – DOI 10.20295/2412-9186-2024-10-03-254-268.

6 Planning station operations based on actual station performance obtained "from the wheel" / S. M. Kovalev, A. V. Sukhanov, I. A. Olgeizer and V. S. Ierusalimov // Proceedings of the Eighth International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ИТИ'24). Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer Nature, 2024. – Volume 1, P. 33–42.

7 Цифровая железнодорожная станция – от концепции к реальному внедрению / В. Е. Андреев, А. И. Долгий, В. В. Кудюкин [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 9. – С. 2–6. – DOI 10.34649/AT.2023.9.9.001.

8 Методологические указания по формированию функционала системы управления «Цифровая железнодорожная станция». Редакция 1.10. Утв. Андреевым В. Е., № 295 от 30.12.2022 г. – URL: <http://scbist.com/xx3/56534-09-2023-cifrovaya-zheleznodorozhnaya-stanciya-ot-konceptcii-k-realnomu-vnedreniyu.html> (дата обращения: 14.03.2025).

9 Хатламаджиян, А. Е. Единая станционная платформа обмена информацией низовых систем автоматизации / А. Е. Хатламаджиян, Ю. Ф. Золотарев, И. А. Ольгейзер // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 11. – С. 34. – DOI 10.34649/AT.2021.11.11.009.

10 Компьютерное зрение как способ интеллектуализации систем горочной автоматизации / И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов, А. М. Лященко, Д. В. Глазунов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 1. – С. 46–53. – DOI 10.52261/02346206_2022_1_46.

11 Хатламаджиян, А. Е. Интегрированный пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях / А. Е. Хатламаджиян, А. И. Лебедев // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2019. – № 2. – С. 9–13. – ISSN 1817-6089.

12 Шабельников, А. Н. Комплексная автоматизация узловой сортировочной станции / А. Н. Шабельников, А. Н. Смородин // Автоматика, связь и информатика. – 2018. – № 4. – С. 12–14. – ISSN 3034-3194.

13 Одикадзе, В. Р. Развитие технологии и разработка средств мониторинга функционирования система автоматизации сортировочных процессов : 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производ-

А. Е. Khatlamadzhiyan, I. A. Olgeizer, A. V. Sukhanov, V. S. Ierusalimov // Automation in transport. – 2024. – Vol. 10, No. 3. – P. 254–268. – DOI 10.20295/2412-9186-2024-10-03-254-268.

6 Planning station operations based on actual station performance obtained "from the wheel" / S. M. Kovalev, A. V. Sukhanov, I. A. Olgeizer and V. S. Ierusalimov // Proceedings of the Eighth International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ИТИ'24). Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer Nature, 2024. – Volume 1, P. 33–42.

7 Digital railway station – from concept to real implementation / V. E. Andreev, A. I. Dolgiy, V. V. Kudyukin [et al.] // Automation, communication, informatics. – 2023. – No. 9. – P. 2–6. – DOI 10.34649/AT.2023.9.9.001.

8 Methodological guidelines for the formation of the functionality of the Digital Railway Station management system. Revision 1.10. Approved by V. E. Andreev, No. 295 dated 12/30/2022. – URL: <http://scbist.com/xx3/56534-09-2023-cifrovaya-zheleznodorozhnaya-stanciya-ot-konceptcii-k-realnomu-vnedreniyu.html> (date of access: 03/14/2025).

9 Khatlamadzhiyan, A. E. Unified station platform for information exchange of low-level automation systems / A. E. Khatlamadzhiyan, Yu. F. Zolotarev, I. A. Olgeizer // Automation, communication, informatics. – 2021. – No. 11. – P. 34. – DOI 10.34649/AT.2021.11.11.009.

10 Computer vision as a way to intellectualize hump automation systems / I. A. Olgeizer, A. V. Sukhanov, A. M. Lyashchenko, D. V. Glazunov // Problems of mechanical engineering and automation. – 2022. – No. 1. – P. 46–53. – DOI 10.52261/02346206_2022_1_46.

11 Khatlamadzhiyan, A. E. Integrated post for automated reception and diagnostics of rolling stock at marshalling yards / A. E. Khatlamadzhiyan, A. I. Lebedev // Wagons and carriage facilities. – 2019. – No. 2. – P. 9–13. – ISSN 1817-6089.

12 Shabelnikov, A. N. Integrated automation of a junction marshalling station / A. N. Shabelnikov, A. N. Smorodin // Automation, communication, informatics. – 2018. – No. 4. – P. 12–14. – ISSN 3034-3194.

13 Odikadze, V. R. Development of technology and development of means for monitoring the functioning of the automation system of sorting processes : 05.13.06 "Automation and control of technological processes and production (by industry)": dissertation for the degree of candidate of technical

ствами (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Одикадзе Владимир Ромазович ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2008. – 198 с.

14 **Жарков, М. Л.** Моделирование сортировочных станций железнодорожной сети методами теории массового обслуживания / М. Л. Жарков, М. М. Пavidис // Надежность. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 27–34. – DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-3-27-34.

sciences / Odikadze Vladimir Romazovich ; Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don, 2008. – 198 p.

14 **Zharkov, M. L.** Modeling of marshalling yards of the railway network using methods of queueing theory / M. L. Zharkov, M. M. Pavidis // Reliability. – 2021. – Vol. 21, No. 3. – P. 27–34. – DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-3-27-34.

A. I. Dolgiy, A. E. Khatlamadzhiyan, I. A. Olgeizer, A. V. Sukhanov

CLASSIFICATION OF RAILWAY STATION OPERATION MODES BASED ON REAL DATA "FROM THE WHEEL"

Abstract. A new approach to classifying the operation modes of a railway freight marshalling yard is proposed based on objective data obtained by merging information from various sensors and station systems. A concept for classifying station operation "from the wheel", i. e. based on data from automatic reading devices, is proposed, as opposed to the existing system of calculating station efficiency based on manually entered information. The new concept is described by formalizing such key station indicators as detention of car wagon downtime, operating fleet, and train arrival rate, which are essentially quantitative variables whose values reflect station operation. The application of the proposed approach is shown using statistical data on the operation of the Chelyabinsk-Glavny station as an example, and the station operating modes identified based on an expert assessment of the calculated indicators are described. The development of the given approach as a tool for predictive analytics of the station operation and targeted development of measures to implement the effective functioning of railway marshalling yards is proposed.

Keywords: digital railway station, automation of station operations, calculation of "from the wheel" indicators, increasing the efficiency of a marshalling yard.

For citation: Classification of railway station operation modes based on real data "from the wheel" / A. I. Dolgiy, A. E. Khatlamadzhiyan, I. A. Olgeizer, A. V. Sukhanov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 58–68. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_58.

Сведения об авторах

Долгий Александр Игоревич

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: a.dolgiy@vniias.ru

Хатламаджиян Агоп Ервандович

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора, e-mail: a.hatlamadzhiyan@vniias.ru

Information about the authors

Dolgiy Alexander Igorevich

JSC "Research and Design Institute of Information, Automation and Communication in Railway Transport" (JSC NIAS), Candidate of Engineering Sciences, General Director, e-mail: a.dolgiy@vniias.ru

Khatlamadzhiyan Agop Yervandovich

JSC "Scientific Research and Design Institute of Information, Automation and Communication in Railway Transport" (JSC NIAS), Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, Deputy General Director, e-mail: a.hatlamadzhiyan@vniias.ru

Ольгейзер Иван Александрович

Ростовский филиал
АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (РостФ НИИАС),
кандидат технических наук, доцент,
первый заместитель директора филиала.

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления»,
доцент,
e-mail: i.olgezer@vniias.ru

Суханов Андрей Валерьевич

Ростовский филиал
АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (РостФ НИИАС),
кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отделения интеллектуальных информационных технологий цифровой станции.

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления»,
доцент,
e-mail: a.suhanov@vniias.ru

Olgeizer Ivan Alexandrovich

Rostov Branch of JSC “Research and Design Institute of Information, Automation and Communication in Railway Transport” (RostF NIIAS),
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, First Deputy Director of the Branch.

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Computer Engineering and Automated Control Systems”,
Associate Professor,
e-mail: i.olgezer@vniias.ru

Sukhanov Andrey Valeryevich

Rostov Branch of JSC “Research and Design Institute of Information, Automation and Communication in Railway Transport” (RostF NIIAS),
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Deputy Head of the Department of Intelligent Information Technologies of the Digital Station.

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Computer Engineering and Automated Control Systems”,
Associate Professor,
e-mail: a.suhanov@vniias.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.078

DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_69

*И. С. Выскребенцев, М. Б. Петров***ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК РЕГИОНА
В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Аннотация. Настоящее исследование является продолжением предшествующих работ авторов и направлено на оценку потребности региона в развитии транспортной инфраструктуры и прогнозирование объема перевозок в условиях ее дефицита.

Приведена графоаналитическая модель взаимодействия транспортной инфраструктуры и отраслей хозяйства региона и описаны основные принципы прогнозирования грузовых перевозок региона и оценки дефицитности инфраструктуры.

Представлены результаты прогнозирования величины транспортного спроса отдельного региона и определен момент возникновения дефицита транспортной инфраструктуры.

Разработана методика прогнозирования погрузки региона при приоритетном доступе отраслей к транспортной инфраструктуре в условиях ее дефицита. Определена величина потерь экономики вследствие дефицита транспортной инфраструктуры региона при разных вариантах приоритетности отраслей.

Ключевые слова: прогнозирование, транспортная инфраструктура, транспортный спрос, дефицит инфраструктуры, приоритетный доступ к инфраструктуре.

Для цитирования: Выскребенцев, И. С. Прогнозирование грузовых перевозок региона в условиях дефицита транспортной инфраструктуры / И. С. Выскребенцев, М. Б. Петров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 69–76. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_69.

Введение

В условиях современного рынка грузовые перевозки являются ключевым элементом логистической системы, обеспечивающей эффективное функционирование экономики. Наряду с увеличением спроса на транспортные услуги возникает проблема дефицита инфраструктуры, которая приводит к снижению эффективности перевозок и увеличению времени доставки грузов. В связи с этим опережающее развитие транспортной инфраструктуры в соответствии с потребностями отраслей хозяйства является необходимым условием экономического роста.

Основная часть

Настоящая работа является продолжением ранних исследований авторов [7–8] и направлена на оценку потребности региона в развитии транспортной инфраструктуры и прогнозирование объема перевозок в условиях возникновения ее дефицита.

В современных отечественных и зарубежных исследованиях используются различные методы прогнозирования транспортного спроса: методы экстраполяции тренда [1–3], экспертные методы [4–5], экономико-статистические методы [6–10], имитационное моделирование [11–13] и др.

В основе методики прогнозирования лежит графоаналитическая модель взаимодействия транспортной инфраструктуры и отраслей хозяйства региона.

В рамках поставленной задачи регион представляется как совокупность двух взаимосвязанных инфраструктур: инфраструктуры отраслей хозяйства региона (за исключением отрасли транспорта) и транспортной инфраструктуры региона (рис. 1).

Инфраструктура отраслей хозяйства выступает в роли потребителя транспортных услуг, генерирует и поглощает грузовой поток. Транспортная инфраструктура – поставщик транспортных услуг, обеспечивает перемещение этого грузового потока. То есть взаимодействие названных инфраструктур достигается через реализацию потокового процесса.

случайные величины с установленным законом распределения. Весовой коэффициент w_i рассчитывается по формуле:

$$w_i = \frac{a_i b_i}{\sum_{i=1}^N a_i b_i}, \quad (1)$$

где a_i – удельный вес отрасли в ВРП, позволяет учитывать различия в отраслевой структуре отдельных регионов; b_i – коэффициент транспортной зависимости отрасли, обоснованный в работе [2].

Объединение результатов моделирования [1] и [2] позволит прогнозировать точку возникновения дефицита транспортной инфраструктуры в заданном регионе.

Ниже приведены результаты численных экспериментов (рис. 2, а) и график потенциального транспортного спроса региона в сопоставлении с полученным значением уровня развития инфраструктуры (рис. 2, б) на примере Свердловской области.

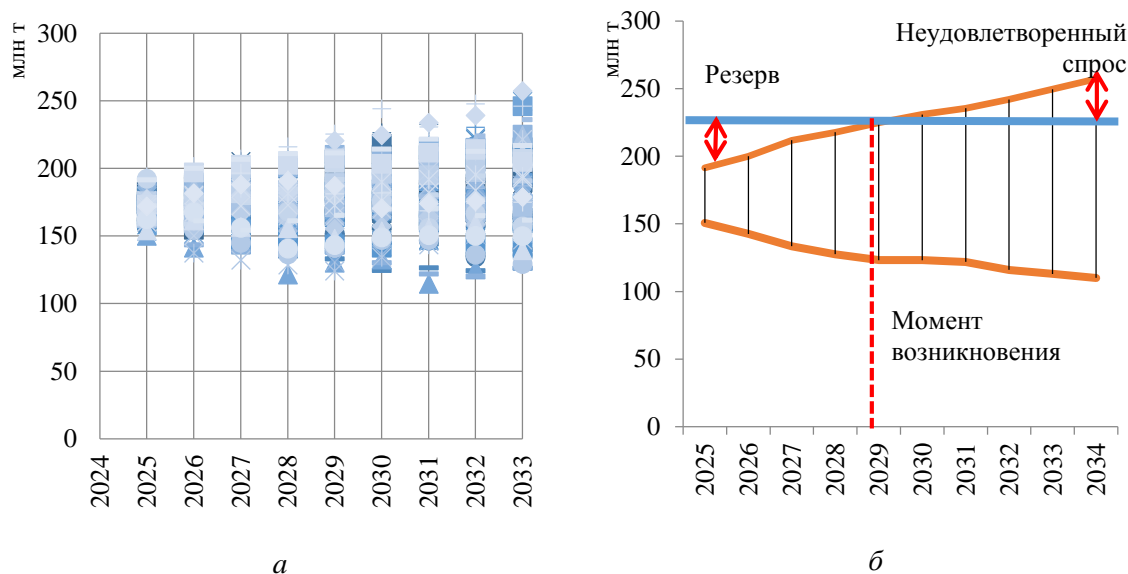


Рис. 2. Прогнозирование потребности региона в развитии транспортной инфраструктуры

Апробация разработанных моделей на примере отдельного субъекта Федерации показала, что при благоприятном развитии экономики и неизменном уровне транспортной инфраструктуры к 2029 году возникнет острый дефицит инфраструктуры, что остановит рост погрузки и приведет к замедлению экономического развития региона.

На базе предложенной модели возможно также оценивать величину неудовлетворенного спроса на грузовые перевозки и потери экономики из-за дефицита инфраструктуры.

Совокупный неудовлетворенный спрос всех отраслей экономики в момент t составит $\Delta D_t = D_t - Q_{\max}$ и будет нарастать со временем при неизменном уровне мощности инфраструктуры.

Величину неудовлетворенного спроса каждой отрасли при условии их равного доступа к инфраструктуре определим как $\Delta D_{ti} = w_i \cdot (D_t - Q_{\max})$.

При известной величине валовый региональный продукт (ВРП) региона в t -й период прогноза можем определить совокупные потери экономики вследствие дефицита транспортной инфраструктуры (при условии равного доступа отраслей к инфраструктуре):

$$\Delta \text{ВРП}_t = \text{ВРП}_t \cdot \left(1 - \frac{Q_{\max}}{D_t}\right). \quad (2)$$

Чтобы минимизировать экономические потери, выполнить социальные задачи или обеспечить национальные интересы, зачастую требуется установить приоритетность доступа к ограниченным транспортным ресурсам для различных отраслей экономики. При этом необходимо учесть транспортные потребности менее приоритетных сфер и удовлетворить их, но в меньшей степени по сравнению с более приоритетными отраслями.

Для этих целей авторы предлагают следующую методику.

Вводится параметр y_i – доля спроса i -й отрасли D_i , который способна удовлетворить транспортная система, $y_i = f(r_i)$, где r_i – приоритет доступа отрасли к транспортной инфраструктуре.

Величина r_i задается натуральными числами от 1 до N , где значение $r_i = 1$ соответствует наиболее высокому приоритету отрасли. Зависимость параметра y_i от рейтинга отрасли r_i может иметь различную форму: линейную (3), логарифмическую (4) или параболическую (5):

$$y_i = -\alpha r + \beta; \quad (3)$$

$$y_i = -\alpha \ln(r) + \beta; \quad (4)$$

$$y_i = -\alpha r^2 + \beta. \quad (5)$$

Выбор формы зависимости определяется экспертно. Линейная зависимость обеспечивает равномерное снижение доли удовлетворенного спроса при уменьшении приоритетности отрасли, логарифмическая – усиливает различия между более и менее приоритетными отраслями, параболическая – их уменьшает. Отрицательное значение параметра функции α объясняет обратный характер зависимости. Графически варианты описанных зависимостей доли удовлетворенного спроса отрасли y_i от ее рейтинга r_i представлены на рис. 3.

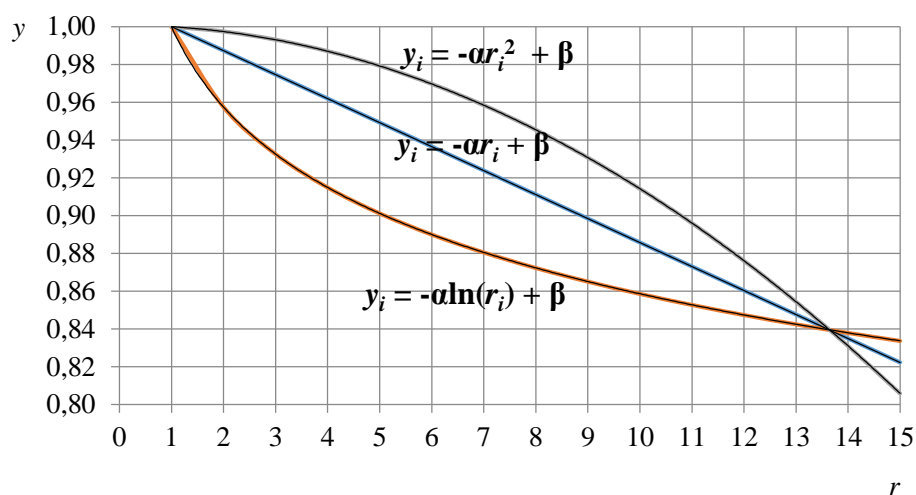


Рис. 3. Варианты зависимости доли удовлетворенного спроса отрасли y_i от ее рейтинга r_i

Значение коэффициентов α , β зависит от отраслевой структуры погрузки (т. е. параметра w_i), величины транспортного спроса региона (D) и установленной мощности инфраструктуры региона (Q_{\max}).

Для вычисления коэффициентов функции запишем уравнение:

$$Q_{\max} = D \sum_{i=1} w_i \cdot y_i, \quad (6)$$

где y_i определяется выбранной зависимостью (3)–(4).

При известных величинах Q_{\max} , D , w_i данные коэффициенты можем вычислить методом перебора с помощью доступных программных средств, например, с помощью модуля «Поиск решения» в MS Excel. При вычислении α , β также устанавливаются границы значений переменных от 0 до 1.

Апробируем методику для прогнозных данных, полученных ранее (см. рис. 1). Согласно прогнозу, на 2029 год приняты следующие значения $Q_{\max} = 223$ млн т, $D = 224,8$ млн т, то есть общий объем неудовлетворенного спроса составит 1,8 млн т. Значения коэффициентов w_i рассчитаны для отраслевой структуры Свердловской области. Параметр r_i задан в зависимости от грузоемкости отрасли в порядке возрастания коэффициента b , т. е. наивысший приоритет присвоен наименее транспортно-зависимым отраслям, грузы которых в основном относят к первому классу. На практике этот показатель может уточняться с учетом региональных и национальных интересов.

Прогноз погрузки региона в условиях дефицита выполнен для сценариев равного доступа отраслей к инфраструктуре и с учетом приоритета отдельных отраслей. Результаты расчета на 2029 год приведены в таблице.

Прогнозирование погрузки региона в условиях дефицита транспортной инфраструктуры

Отрасль	Спрос, млн т	Приоритет отрасли	Погрузка отрасли при равном доступе к инфраструктуре, млн т	Погрузка отрасли при приоритетном доступе инфраструктуре, млн т		
				Линейная зависимость от приоритета	Логарифмическая зависимость от приоритета	Параболическая зависимость от приоритета
Сельское хозяйство	4,40	4	4,37	4,392	4,382	4,398
Добыча полезных ископаемых	3,76	10	3,73	3,735	3,730	3,741
Пищевая промышленность	5,34	9	5,29	5,310	5,301	5,319
Легкая промышленность	0,12	6	0,12	0,118	0,118	0,118
Обработка древесины и производство изделий из дерева	0,70	11	0,70	0,696	0,695	0,697
Целлюлозно-бумажное производство	0,29	5	0,29	0,289	0,289	0,290
Производство кокса, нефтепродуктов	0,63	1	0,63	0,634	0,634	0,634
Химическое производство	5,92	13	5,87	5,872	5,871	5,875
Производство резиновых и пластмассовых изделий	0,05	3	0,05	0,052	0,052	0,052
Производство прочих неметаллических минеральных продуктов	15,92	15	15,79	15,778	15,788	15,767
Металлургическое производство	175,26	14	173,86	173,799	173,826	173,777
Производство машин и оборудования	12,22	12	12,12	12,136	12,128	12,146
Производство электрооборудования	0,04	7	0,04	0,040	0,040	0,040
Производство транспортных средств	0,08	8	0,08	0,080	0,080	0,080
Прочие производства	0,07	2	0,07	0,068	0,068	0,068

На основе приведенной методики определены ожидаемые потери отрасли от дефицита транспортной инфраструктуры, выраженные в недополученном ВРП. Результат исследования приведен на рис. 4.

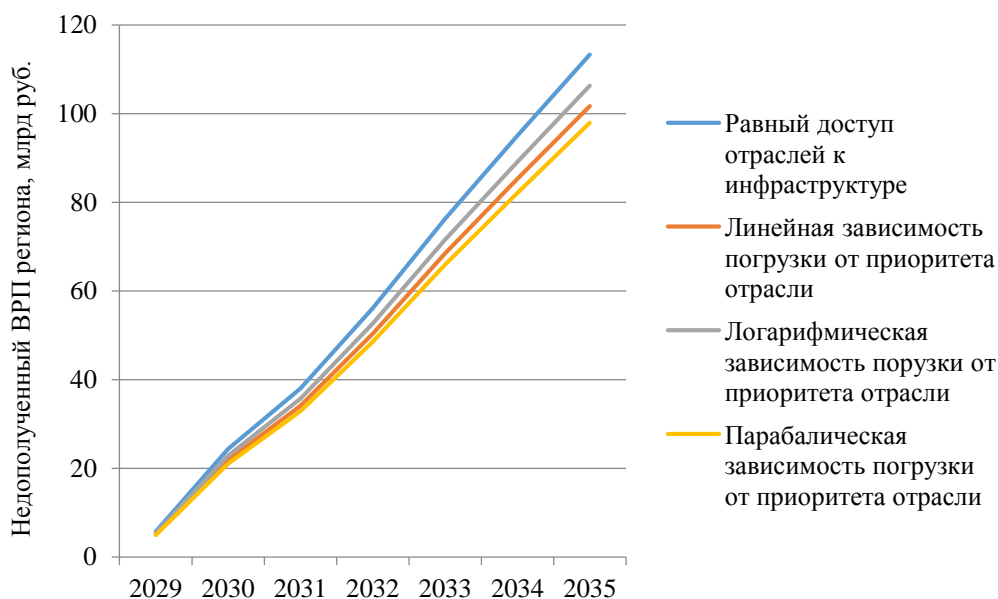


Рис. 4. Прогнозирование потерь экономики региона при дефиците транспортной инфраструктуры, млрд руб.

На основе проведенного исследования можем сделать следующие выводы:

- при неизменном уровне инфраструктуры нарастает объем неудовлетворенного транспортного спроса, что ведет к увеличению потерь экономики региона в виде недополученного ВВП;
- приоритетный доступ менее грузоемких отраслей к транспортной инфраструктуре в условиях ее дефицита позволяет снижать общие потери экономики;
- наименьшие потери экономики от дефицита транспортной инфраструктуре установлены при параболической зависимости доли удовлетворенного спроса от приоритетности отрасли.

Выводы

Таким образом, разработанные модели позволяют получить следующие результаты:

- 1) прогнозировать величину спроса на грузовые перевозки при различных сценариях развития экономики региона;
- 2) прогнозировать момент возникновения дефицита транспортной инфраструктуры и заблаговременно разрабатывать решения по ее развитию;
- 3) оценивать размер экономических потерь региона от дефицита транспортной инфраструктуры;
- 4) определять приоритетность погрузки продукции отдельных отраслей с целью снижения общей величины потерь экономики в условиях дефицита инфраструктуры.

Список литературы

- 1 **Изотов, О. А.** Прогнозирование перевозок грузов / О. А. Изотов // Системный анализ и логистика. – 2019. – № 4. – С. 12–19. – eISSN 2077-5687.
- 2 **Bulut, E.** Modeling seasonality using the fuzzy integrated logical forecasting (FILF) approach / E. Bulut // Expert Systems with Applications. – 2014. – Vol. 41, No. 4. – P. 1806–1812. – DOI 10.1057/mel.2012.9.
- 3 **Малашук, П. А.** Разработка и исследование моделей прогнозирования грузовых железнодорожных перевозок Европейской и Приуральской Арктики / П. А. Малашук // Актуальные проблемы, направления и механизмы развития про-

References

- 1 **Izotov, O. A.** Forecasting of cargo transportation / O. A. Izotov // Systems analysis and logistics. – 2019. – No. 4. – P. 12–19. – eISSN 2077-5687.
- 2 **Bulut, E.** Modeling seasonality using the fuzzy integrated logical forecasting (FILF) approach / E. Bulut // Expert Systems with Applications. – 2014. – Vol. 41, No. 4. – P. 1806–1812. – DOI 10.1057/mel.2012.9.
- 3 **Malashchuk, P. A.** Development and study of forecasting models for freight rail transportation in the European and Ural Arctic / P. A. Malashchuk // Actual problems, directions and mechanisms for the development of productive forces of the North – 2022 : collection of articles of the VIII All-Russian

изводительных сил Севера – 2022 : сборник статей VIII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), 21–23 сентября 2022 г., Сыктывкар. В 2 ч. Ч. 2. – Иркутск : ООО «Максима», 2022. – С. 72–80. – ISBN 978-5-907643-20-8.

4 **Краковский, Ю. М.** Прогнозирование грузооборота дороги на основе статистической и экспертной информации / Ю. М. Краковский, И. А. Домбровский // Вестник стипендиатов DAAD. – 2013. – № 1. – С. 48–54. – ISSN 2218-1350.

5 **Краковский, Ю. М.** Обобщенное прогнозирование показателей грузовых перевозок железнодорожным транспортом на основе сценарного подхода / Ю. М. Краковский, Н. Н. Попова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3 (79). – С. 132–138. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_132.

6 **Петров, М. Б.** Новые подходы к прогнозированию в целях управления развитием больших систем территориальной инфраструктуры / М. Б. Петров, К. Б. Кожов // Инновационный транспорт. – 2017. – № 2. – С. 3–10. – DOI 10.20291/2311-164X-2017-2-3-10.

7 **Выскребенцев, И. С.** Методика оценки уровня развития транспортной инфраструктуры региона / И. С. Выскребенцев, М. Б. Петров // Транспорт Урала. – 2023. – № 3 (78). – С. 99–104. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-3-99-104.

8 **Выскребенцев, И. С.** Методика прогнозирования спроса на грузовые перевозки / И. С. Выскребенцев, М. Б. Петров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4 (92). – С. 62–71. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_62.

scientific and practical conference (with international participation), September 21–23, 2022, Syktyvkar. In 2 parts. Part 2. – Irkutsk : Maxima LLC, 2022. – P. 72–80. – ISBN 978-5-907643-20-8.

4 **Krakovsky, Yu. M.** Forecasting of road freight turnover based on statistical and expert information / Yu. M. Krakovsky, I. A. Dombrovsky // Bulletin of DAAD Fellows. – 2013. – No. 1. – P. 48–54. – ISSN 2218-1350.

5 **Krakovsky, Yu. M.** Generalized forecasting of indicators of freight transportation by rail based on a scenario approach / Yu. M. Krakovsky, N. N. Popova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 3 (79). – P. 132–138. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_132.

6 **Petrov, M. B.** New approaches to forecasting for the purposes of managing the development of large territorial infrastructure systems / M. B. Petrov, K. B. Kozhov // Innovative transport. – 2017. – No. 2. – P. 3–10. – DOI 10.20291/2311-164X-2017-2-3-10.

7 **Vyskrebentsev, I. S.** Methodology for assessing the level of development of the transport infrastructure of the region / I. S. Vyskrebentsev, M. B. Petrov // Transport of the Urals. – 2023. – No. 3 (78). – P. 99–104. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-3-99-104.

8 **Vyskrebentsev, I. S.** Methodology for forecasting demand for freight transportation / I. S. Vyskrebentsev, M. B. Petrov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 4 (92). – P. 62–71. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_62.

I. S. Vyskrebentsev, M. B. Petrov

FREIGHT TRANSPORTATION FORECASTING IN THE REGION IN CONDITIONS OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE SHORTAGE

Abstract. This study is a continuation of the previous works of the authors and is aimed at assessing the region's needs for the development of transport infrastructure and forecasting the volume of traffic in conditions of its shortage.

A graphical-analytical model of the interaction between the transport infrastructure and the economic sectors of the region is presented and the basic principles of forecasting freight transportation in the region and assessing infrastructure shortages are described. The results of forecasting the value of transport demand in a particular region are presented and the moment of occurrence of a shortage of transport infrastructure is determined. A methodology for predicting the loading of a region with priority industry access to transport infrastructure in conditions of its scarcity is developed. The magnitude of economic losses due to the shortage of transport infrastructure in the region is determined with different options for prioritizing industries.

Keywords: forecasting, transport infrastructure, transport demand, infrastructure shortage, priority access to infrastructure.

For citation: Vyskrebentsev, I. S. Freight transportation forecasting in the region in conditions of transport infrastructure shortage / I. S. Vyskrebentsev, M. B. Petrov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 69–76. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_69.

Сведения об авторах

Выскребенцев Иван Сергеевич

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
аспирант,
e-mail: IVyskrebentsev@mail.ru

Петров Михаил Борисович

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Экономика транспорта»,
доктор технических наук, профессор,
руководитель Центра развития
и размещения производительных сил
Института экономики УрО РАН,
e-mail: MPetrov@usurt.ru

Information about the authors

Vyskrebentsev Ivan Sergeevich

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Postgraduate Student,
e-mail: IVyskrebentsev@mail.ru

Petrov Mikhail Borisovich

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair “Transport Economics”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Center for Development
and Distribution of Productive Forces of
the Institute of Economics of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: MPetrov@usurt.ru

Д. В. Никитин, Н. В. Соловьев

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫМИ ЛОГИСТИЧЕСКИМИ ТРАНСПОРТНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ

Аннотация. В современных условиях активного развития цифровых информационно-коммуникационных технологий происходит трансформация структур управления логистическими транспортными системами. В свою очередь логистические транспортные системы в условиях глобализации рынка транспортных услуг преобразуются в интегрированные логистические транспортные системы, объединяющие процессы доставки грузов на нескольких видах транспорта. В этом случае их необходимо рассматривать, как многоуровневые сложные системы, так как уровень управления неизбежно доминирует над уровнями реализации технологических процессов. Перспективным направлением в развитии структур управления интегрированными логистическими транспортными системами является направление создания цифровых информационно-аналитических платформ, которые в данном случае агрегируют функции управления. Создание новых структур управления потоками информации в логистических транспортных системах требует преобразования существующих инструментов в целях соответствия их качества возможностям, реализуемым за счет цифровых технологий.

Ключевые слова: многоуровневая система, цифровые технологии, информационно-аналитическая платформа, интегрированная логистическая система, взаимодействие видов транспорта.

Для цитирования: Никитин, Д. В. Модель управления многоуровневыми логистическими транспортными экосистемами / Д. В. Никитин, Н. В. Соловьев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 77–85. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_77.

Введение

Одной из основных проблем, сопровождающих деятельность транспортного производства в РФ, является отсутствие в настоящее время единой системы оценки эффективности транспортно-логистической деятельности, приемлемой для всех видов транспорта, и научно обоснованных методов, позволяющих её сформировать.

Особенно актуальным становится решение данной проблемы в условиях активного развития цифровых технологий и геоинформационных систем, позволяющих оперировать большими данными и управлять ими в реальном онлайн-режиме времени. В условиях активного развития цифровых информационно-коммуникационных технологий происходит трансформация структур управления логистическими транспортными системами. В свою очередь логистические транспортные системы в условиях глобализации рынка транспортных услуг преобразуются в интегрированные логистические транспортные системы, объединяющие процессы доставки грузов на нескольких видах транспорта. Тогда их необходимо рассматривать, как многоуровневые сложные системы, так как уровень управления неизбежно доминирует над уровнями реализации технологических процессов [1–2]. Перспективным направлением в развитии структур управления многоуровневыми транспортными системами является направление создания цифровых информационно-аналитических платформ, которые в данном случае агрегируют функции управления [3–5]. Создание новых структур управления потоками информации в логистических транспортных системах требует преобразования существующих инструментов в целях соответствия их качества возможностям, реализуемым за счет цифровых технологий [6–7].

Методы исследования

Настоящий период развития логистических транспортных систем характеризуется как период трансформации сложных организационно-технических систем в экосистемы с неопределенными вероятностными характеристиками событийного ряда [8–10]. Неопределенность – это свойство системы, определяемое вероятностными характеристиками исследуемых показателей. С системных позиций

каждый элемент в системе характеризуется информационным кодом, который определяется произведением значения показателя на вероятность наступления события, которое характеризует деятельность того или иного элемента в системе [11–12].

Неопределенность определяет, что вероятность наступления известного события изменяется в достаточно больших пределах (от 0 до 1), то есть вероятность наступления события не подчиняется классическим законам распределения случайных величин (нормального, логарифмического и т.д.), но при этом сам объект однозначно находится в исследуемой системе и его необходимо учитывать в сложившейся информационной ситуации. Естественно, что отнесение логистических транспортных систем к категории систем, функционирующих в условиях неопределенности, также значительно усложняет процесс целенаправленной деятельности по повышению эффективности логистических транспортных систем в силу того, что необходимо прибегать к специализированному математическому инструментарию, который позволяет аналитически решать задачи в условиях стохастической неопределенности [13–14]. Этим инструментариумом могут быть известные теории: теория игр, теория игр с природой факторов, теория нечетких множеств или нечеткой логики и т.д. Важно отметить, что в этом случае следует разделять неопределенность информационного состояния внешней среды от внутренней среды логистической транспортной системы [15].

Теоретические исследования

Разработанная математическая модель предназначена для оценки эффективности состояния отдельного вида транспорта (объекта), являющегося элементом многоуровневой сложной системы, интегрированной в единую цифровую платформу. Математическая модель определения (мониторинга) эффективности состояния выбора в общем виде содержит базовый элемент алгоритма расчёта эффективности состояния отдельного объекта (M_i^{uv}) с учетом целеполагания (максимальная эффективность функционирования системы в целом) при переменных значениях достаточно большого набора исследуемых показателей диагностических показателей (a_{ij}^{uv}):

$$M_i^{uv} = \sum_{j=1}^n k_{ij}^{uv} a_{ij}^{uv} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где M_i^{uv} – эффективность решения состояния исследуемого объекта на единичном логическом операторе на отдельном исследуемом регионе на отдельном уровне системы;

$i = 1, \dots, m$ – индекс количества исследуемых объектов;

$j = 1, \dots, n$ – индекс количества исследуемых показателей эффективности в единичном логическом операторе;

$v = 1, \dots, k$ – индекс количества логических операторов на отдельном уровне сложной системы оценки эффективности объекта в условиях стохастической неопределённости факторного пространства;

$u = 1, \dots, r$ – индекс количества уровней в исследуемой сложной системе оценки состояния технических объектов в условиях стохастической неопределённости факторного пространства;

a_{ij}^{uv} – переменное значение показателя состояния i -го объекта для j -го параметра в v -м логическом операторе на u -м уровне исследуемой системы оценки состояния технических объектов;

k_{ij}^{uv} – индивидуальный коэффициент каждого переменного значения показателя состояния i -го объекта для j -го параметра в v -м логическом операторе на u -м уровне исследуемой системы

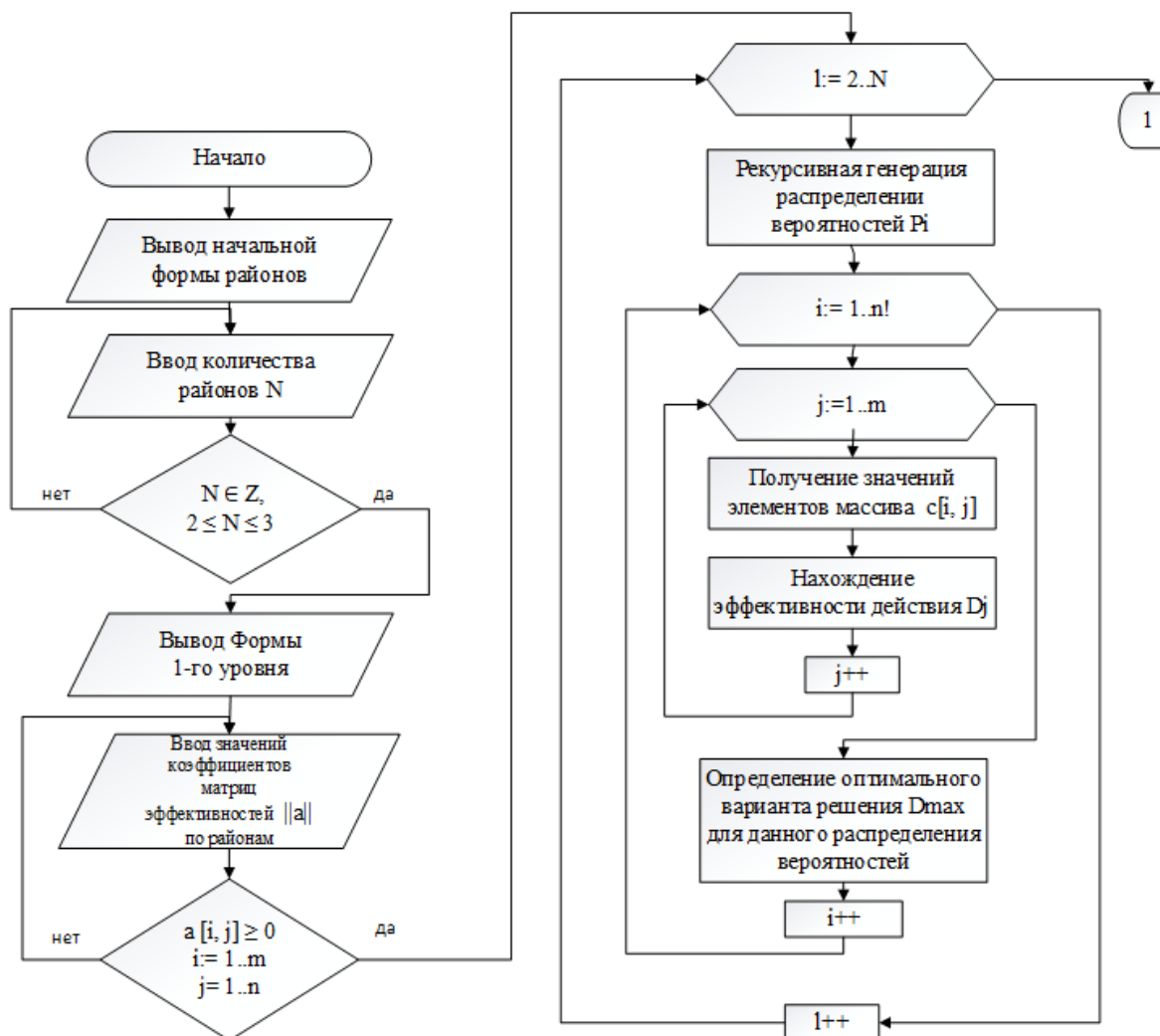
Тогда аналитический переход решения одного уровня многоуровневой системы на последующий уровень производится с помощью межуровневого логического оператора:

$$\begin{cases} M_i^{[u=(r+1)]v} = \max_j \sum_{j=1}^n k_{ij}^{[u=r]v} a_{ij}^{[u=r]v} \\ 0 < F_j^{[u=r]v} < 1 \end{cases}, \quad (2)$$

где F – функция, значение которой тождественно количественной оценке вероятности наступления исследуемого события, соответствующего значению параметра состояния вида транспорта.

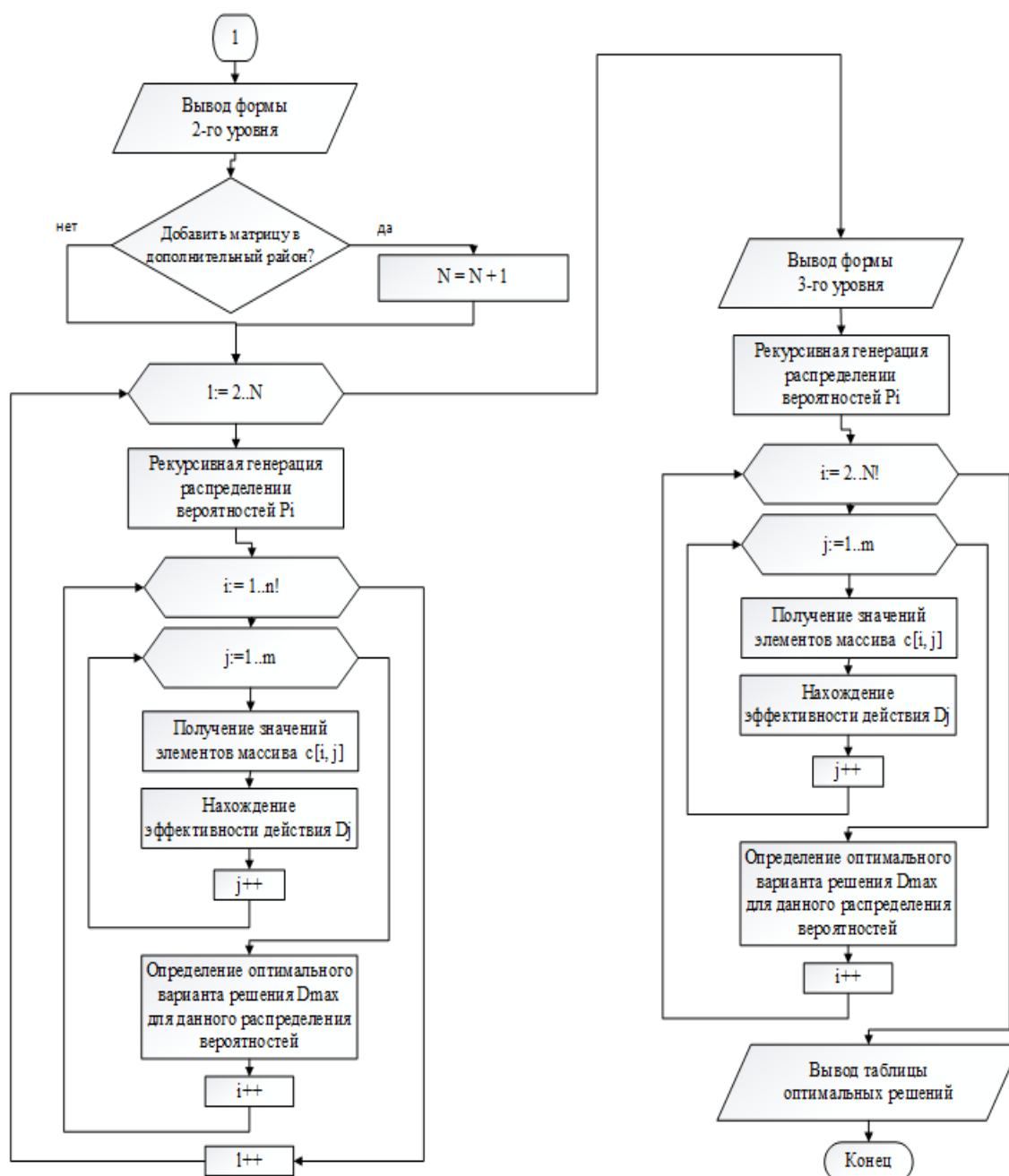
Результаты исследования

Разработанная аналитическая модель позволяет сформировать алгоритмы для исследовательского ПО, позволяющего выполнять расчёты в комплексе математических моделей и алгоритмов поиска оптимальных решений в системе оценки эффективности отдельных видов транспорта в условиях неопределенности. Алгоритмы адаптированы под программное обеспечение C++. На рис. 1 (а и б) представлены укрупнённые алгоритмы поиска оптимальных решений в многоуровневой системе оценки эффективности видов транспорта в условиях неопределенности.



a

Рис. 1. Алгоритмы поиска оптимальных решений в многоуровневой системе оценки эффективности видов транспорта в условиях неопределенности (начало)



б

Рис. 1. Алгоритмы поиска оптимальных решений в многоуровневой системе оценки эффективности видов транспорта в условиях неопределенности (окончание)

Обсуждение результатов

Представим результаты вычислительного эксперимента в виде оценки эффективности уровня соответствия технического состояния трех моделей транспортных средств отдельных видов транспорта (количество исследуемых моделей или отдельных транспортных средств неограниченно) по трём техническим параметрам (количество исследуемых параметров может быть достаточно большим, до 25 при необходимости): коэффициент технического использования, пробег транспортного средства и расход топлива, эксплуатирующихся в трех различных регионах со специфическими условиями (количество исследуемых регионов неограниченно и задается в интерфейсе ПО) и при наличии дополнительных четырех параметров, накладываемых на исследуемый процесс внешними условиями (требования системы):

- экологические;
- безопасности;

- требования эргономичности;
- производительности и т. д.

Процедура и последовательность получения решения о состоянии эффективности по результатам мониторинга параметров транспортных средств представлена на рис. 2–4.



Рис. 2. Интерфейс ПО для ввода текущих значений исследуемых параметров 1-го уровня



Рис. 3. Интерфейс установления целеполагания на третьем (результативном уровне) получаемых решений в границах исследуемой системы

Result – Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

Наилучшие решения при следующих распределениях вероятностей:

1)	P1>P2>P3>P4	D1=0,4628; D2=0,4340; D3=0,5000;	3
2)	P1>P2>P4>P3	D1=0,4830; D2=0,4340; D3=0,5000;	3
3)	P1>P3>P2>P4	D1=0,4628; D2=0,4340; D3=0,5000;	3
4)	P1>P3>P4>P2	D1=0,4807; D2=0,4340; D3=0,5000;	3
5)	P1>P4>P3>P2	D1=0,5200; D2=0,4340; D3=0,5000;	1
6)	P1>P4>P2>P3	D1=0,5200; D2=0,4340; D3=0,5000;	1
7)	P2>P1>P3>P4	D1=0,4628; D2=0,4075; D3=0,4590;	1
8)	P2>P1>P4>P3	D1=0,4830; D2=0,4075; D3=0,4590;	1
9)	P2>P3>P1>P4	D1=0,4628; D2=0,3943; D3=0,4577;	1
10)	P2>P3>P4>P1	D1=0,4670; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
11)	P2>P4>P3>P1	D1=0,4995; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
12)	P2>P4>P1>P3	D1=0,4995; D2=0,3840; D3=0,4097;	1
13)	P3>P2>P1>P4	D1=0,4628; D2=0,3943; D3=0,4577;	1
14)	P3>P2>P4>P1	D1=0,4670; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
15)	P3>P1>P2>P4	D1=0,4628; D2=0,4010; D3=0,4775;	3
16)	P3>P1>P4>P2	D1=0,4807; D2=0,4010; D3=0,4775;	1
17)	P3>P4>P1>P2	D1=0,4960; D2=0,3797; D3=0,4220;	1
18)	P3>P4>P2>P1	D1=0,4960; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
19)	P4>P2>P3>P1	D1=0,5900; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
20)	P4>P2>P1>P3	D1=0,5900; D2=0,3840; D3=0,4097;	1
21)	P4>P3>P2>P1	D1=0,5900; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
22)	P4>P3>P1>P2	D1=0,5900; D2=0,3797; D3=0,4220;	1
23)	P4>P1>P3>P2	D1=0,5900; D2=0,3855; D3=0,4055;	1
24)	P4>P1>P2>P3	D1=0,5900; D2=0,3855; D3=0,4055;	1

Количество областей, принадлежащих решениям:

D1=19 D2=0 D3=5

Рис. 4. Распечатка результатов расчётов в разработанном ПО

Выполним анализ полученных результатов. В условиях неопределенности максимум эффективности достигается при показателе энтропии, равном 0,5. В результате имеем 5 информационных состояний для двух моделей транспортных средств.

1)	P1>P2>P3>P4	D1=0,4628; D2=0,4340; D3=0,5000;	3
2)	P1>P2>P4>P3	D1=0,4830; D2=0,4340; D3=0,5000;	3
3)	P1>P3>P2>P4	D1=0,4628; D2=0,4340; D3=0,5000;	3
4)	P1>P3>P4>P2	D1=0,4807; D2=0,4340; D3=0,5000;	3
5)	P1>P4>P3>P2	D1=0,5200; D2=0,4340; D3=0,5000;	1
6)	P1>P4>P2>P3	D1=0,5200; D2=0,4340; D3=0,5000;	1
7)	P2>P1>P3>P4	D1=0,4628; D2=0,4075; D3=0,4590;	1
8)	P2>P1>P4>P3	D1=0,4830; D2=0,4075; D3=0,4590;	1
9)	P2>P3>P1>P4	D1=0,4628; D2=0,3943; D3=0,4577;	1
10)	P2>P3>P4>P1	D1=0,4670; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
11)	P2>P4>P3>P1	D1=0,4995; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
12)	P2>P4>P1>P3	D1=0,4995; D2=0,3840; D3=0,4097;	1
13)	P3>P2>P1>P4	D1=0,4628; D2=0,3943; D3=0,4577;	1
14)	P3>P2>P4>P1	D1=0,4670; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
15)	P3>P1>P2>P4	D1=0,4628; D2=0,4010; D3=0,4775;	3
16)	P3>P1>P4>P2	D1=0,4807; D2=0,4010; D3=0,4775;	1
17)	P3>P4>P1>P2	D1=0,4960; D2=0,3797; D3=0,4220;	1
18)	P3>P4>P2>P1	D1=0,4960; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
19)	P4>P2>P3>P1	D1=0,5900; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
20)	P4>P2>P1>P3	D1=0,5900; D2=0,3840; D3=0,4097;	1
21)	P4>P3>P2>P1	D1=0,5900; D2=0,3800; D3=0,4210;	1
22)	P4>P3>P1>P2	D1=0,5900; D2=0,3797; D3=0,4220;	1
23)	P4>P1>P3>P2	D1=0,5900; D2=0,3855; D3=0,4055;	1
24)	P4>P1>P2>P3	D1=0,5900; D2=0,3855; D3=0,4055;	1

Выводы

Представленная модель оценки обеспечивает единство измерителей эффективности в логистических транспортных системах и основана на учете прогнозируемых значений влияния факторного пространства на исследуемый процесс в целях повышения эффективности системы в целом. Разработанная модель характеризует количественно нескольких параметров, изменения которых представляют случайные процессы, не подчиняющиеся классическим законам распределения случайных величин, то есть функционирующих в условиях неопределенности.

Список литературы

- 1 **Луман, Н.** Введение в системную теорию / Н. Луман. – Москва : Логос, 2007. – 360 с. – ISBN 5-8163-0076-8.
- 2 **Кудж, С. А.** Многоаспектность рассмотрения сложных систем / С. А. Кудж // Перспективы науки и образования. – 2014. – № 1. – С. 38–43.
- 3 **Покровская, О. Д.** Логистические транспортные системы России в условиях, новых санкций / О. Д. Покровская // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – Вып. 1. – С. 80–94. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-80-94.
- 4 **Rozin, M.** Stereotypes of Transport Logistics in Geopolitical Analytics / M. Rozin, V. Ryabtsev, V. Svechkarev // Transportation Research Procedia. – 2022. – Vol. 61. – P. 285–288. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.047.
- 5 **Kurbatova, A.** Rational Precious Metals Supply Schemes. E3S Web of Conferences 138, 01039 / A. Kurbatova, P. Kurenkov, A. Safronova, M. Kuzina // International Scientific Conference “Construction and Architecture : Theory and Practice for the Innovation Development” (CATPID-2019). – DOI 10.1051/e3sconf/201913801039.
- 6 **Cui, Z.** How does COVID-19 pandemic impact cities’ logistics performance? Evidence from China’s highway freight transport / Z. Cui, X. Fu, J. Wang [et al.] // Transport Policy. Available online 4 March 2022. – DOI 10.1016/j.transpol.2022.03.002.
- 7 **Bayramov, V.** Collateral damage : The Western sanctions on Russia and the evaluation of implications for Russia’s post-communist neighbourhood / V. Bayramov, N. Rustamli, G. Abbas // International Economics. – August 2020. – Vol. 162. – P. 92–109. – DOI 10.1016/j.inteco.2020.01.002.
- 8 Application of Methods for Obtaining Pareto Set for Increasing Effectiveness of Managing Decisions Under Conditions of Multi-criteriality / M. Yu. Karelina, S. B. Benevolenskiy, A. V. Terentyev, I. V. Arifullin // In book : Proceeding of the International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". – P. 883–890. – DOI 10.1007/978-981-15-2244-4_84.

References

- 1 **Luhmann, N.** Introduction to system theory / N. Luhmann. – Moscow : Logos, 2007. – 360 p. – ISBN 5-8163-0076-8.
- 2 **Kuj, S. A.** Multidimensional consideration of complex systems / S. A. Kuj // Perspectives of science and education. – 2014. – No. 1. – P. 38–43.
- 3 **Pokrovskaya, O. D.** Logistics transport systems of Russia in the context of new sanctions / O. D. Pokrovskaya // Bulletin of scientific research results. – 2022. – Issue 1. – P. 80–94. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-80-94.
- 4 **Rozin, M.** Stereotypes of Transport Logistics in Geopolitical Analytics / M. Rozin, V. Ryabtsev, V. Svechkarev // Transportation Research Procedia. – 2022. – Vol. 61. – P. 285–288. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.047.
- 5 **Kurbatova, A.** Rational Precious Metals Supply Schemes. E3S Web of Conferences 138, 01039 / A. Kurbatova, P. Kurenkov, A. Safronova, M. Kuzina // International Scientific Conference “Construction and Architecture : Theory and Practice for the Innovation Development” (CATPID-2019). – DOI 10.1051/e3sconf/201913801039.
- 6 **Cui, Z.** How does COVID-19 pandemic impact cities’ logistics performance? Evidence from China’s highway freight transport / Z. Cui, X. Fu, J. Wang [et al.] // Transport Policy. Available online 4 March 2022. – DOI 10.1016/j.transpol.2022.03.002.
- 7 **Bayramov, V.** Collateral damage : The Western sanctions on Russia and the evaluation of implications for Russia’s post-communist neighbourhood / V. Bayramov, N. Rustamli, G. Abbas // International Economics. – August 2020. – Vol. 162. – P. 92–109. – DOI 10.1016/j.inteco.2020.01.002.
- 8 Application of Methods for Obtaining Pareto Set for Increasing Effectiveness of Managing Decisions Under Conditions of Multi-criteriality / M. Yu. Karelina, S. B. Benevolenskiy, A. V. Terentyev, I. V. Arifullin // In book : Proceeding of the International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". – P. 883–890. – DOI 10.1007/978-981-15-2244-4_84.

9 Application of methods for obtaining pareto set for increasing effectiveness of managing decisions under conditions of multi-criteriality / M. Y. Karelina, S. B. Benevolenskiy, A. V. Terentyev [et al.] // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Vol. 172. – P. 883–890. – DOI 10.1007 / 978-981-15-2244-4_84.

10 Digital platform and ecosystem for providing regional transport mobility/ Ivanov I, Terentyev A. Yevtukov S // XIV International Conference 2020 SPbGASU “Organization and safety of traffic in large cities” Transportation Research Procedia 50 (2020). – 211–217. – DOI 10.1016/j.trpro.2020.10.026.

11 Methodological approach to digitalization of management processes in automobile and road complex / A. V. Terentyev, M. Yu. Karelina, A. A. Pavlovskaya [at al.] // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 832 (2020) 012069. – DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012069.

12 Digital object-oriented control models in automobile-road complex systems / A. V. Terentyev, M. Yu. Karelina, T. Yu. Cherepnina, D. A Linnik, V. A. Demin // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 832 (2020) 012058. – DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012058.

13 Methods of optimization of motor transportation processes / Alexey Terentyev, Sergey Evtuykov, Maria Karelina1 // MATEC Web of Conferences 334, 01020 (2021), ITMTS 2020. – DOI 10.1051/mateconf/202133401020.

14 Geographic information systems to improve road safety / I. A. Novikov, A. E. Borovskoy, Y. V. Gorbun [at al.] // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. Moscow. – DOI 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416096.

15 Model for determining optimal routes in complex transport systems / A. Terentyev, M. Karelina, V. Egorov [at al.] // International conference of Arctic transport accessibility : networks and systems / Transportation Research Procedia. Volume 57, 2021. – P. 679–687. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.09.100.

9 Application of methods for obtaining pareto set for increasing effectiveness of managing decisions under conditions of multi-criteriality / M. Y. Karelina, S. B. Benevolenskiy, A. V. Terentyev [et al.] // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Vol. 172. – P. 883–890. – DOI 10.1007 / 978-981-15-2244-4_84.

10 Digital platform and ecosystem for providing regional transport mobility/ Ivanov I, Terentyev A. Yevtukov S // XIV International Conference 2020 SPbGASU “Organization and safety of traffic in large cities” Transportation Research Procedia 50 (2020). – 211–217. – DOI 10.1016/j.trpro.2020.10.026.

11 Methodological approach to digitalization of management processes in automobile and road complex / A. V. Terentyev, M. Yu. Karelina, A. A. Pavlovskaya [at al.] // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 832 (2020) 012069. – DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012069.

12 Digital object-oriented control models in automobile-road complex systems / A. V. Terentyev, M. Yu. Karelina, T. Yu. Cherepnina, D. A Linnik, V. A. Demin // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 832 (2020) 012058. – DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012058.

13 Methods of optimization of motor transportation processes / Alexey Terentyev, Sergey Evtuykov, Maria Karelina1 // MATEC Web of Conferences 334, 01020 (2021), ITMTS 2020. – DOI 10.1051/mateconf/202133401020.

14 Geographic information systems to improve road safety / I. A. Novikov, A. E. Borovskoy, Y. V. Gorbun [at al.] // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. Moscow. – DOI 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416096.

15 Model for determining optimal routes in complex transport systems / A. Terentyev, M. Karelina, V. Egorov [at al.] // International conference of Arctic transport accessibility : networks and systems / Transportation Research Procedia. Volume 57, 2021. – P. 679–687. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.09.100.

D. V. Nikitin, N. V. Solovyov

A MANAGEMENT MODEL FOR MULTI-LEVEL LOGISTICS TRANSPORT ECOSYSTEMS

Abstract. In modern conditions of active development of digital information and communication technologies, the management structures of logistics transport systems are being transformed. In turn, logistics transport systems in the context of the globalization of the transport services market are transformed into integrated logistics transport systems that combine the processes of cargo delivery on several modes of transport. In this case, they need to

be considered as multilevel complex systems, since the management level inevitably dominates the levels of implementation of technological processes. A promising direction in the development of management structures for integrated logistics transport systems is the creation of digital information and analytical platforms, which in this case aggregate management functions. The creation of new structures for managing information flows in logistics transport systems requires the transformation of existing tools in order to match their quality and the capabilities realized through digital technologies.

Keywords: multilevel system, digital technologies, information and analytical platform, integrated logistics system, interaction of modes of transport.

For citation: Nikitin, D. V. A management model for multi-level logistics transport ecosystems / D. V. Nikitin, N. V. Solovyov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 77–85. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_1_77.

Сведения об авторах

Никитин Дмитрий Владимирович

Государственный университет управления
Центр управления инжиниринговыми проектами (ЦУИП),
заместитель директора,
e-mail: dv_nikitin@guu.ru

Соловьев Николай Владимирович

Государственный университет управления
Управление координации научных исследований,
младший научный сотрудник,
e-mail: n.solovyov@merkatorkaluga.ru

Information about the authors

Nikitin Dmitry Vladimirovich

State University of Management,
Engineering Project Management Center (EPMC),
Deputy Director,
e-mail: dv_nikitin@guu.ru

Solovyov Nikolay Vladimirovich

State University of Management,
Department of Scientific Research Coordination,
Junior Research Assistant,
e-mail: n.solovyov@merkatorkaluga.ru

В. Е. Нутович, Т. В. Тулина

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ЛОГИСТИЧЕСКОГО НАВИГАТОРА В ЧАСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ПЕРЕВОЗОК ГРУЗОВ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ТРАНСПОРТА

Аннотация. Приводится описание моделей определения условий перевозки для различных видов груза на железнодорожном, автомобильном, авиационном и морском видах транспорта. Для построения моделей были изучены нормативные акты и справочники, регламентирующие процесс грузоперевозки, принципы классификации грузов для авиационного, морского, железнодорожного и автомобильного видов транспорта. На основании классификации были рассмотрены условия перевозки для каждого определенного типа грузов на соответствующем виде транспорта. На основании проведенного анализа была построена общая модель определения условий перевозки грузов для всех видов транспорта, а также определена концептуальная модель данных, определяющая связи между основными объектами перевозки, необходимыми для определения условий. Приведенные модели используются в основе алгоритмов нового спроектированного авторами ИТ-инструмента – логистического навигатора, предназначенного для получения оптимального логистического маршрута грузоперевозки с применением различных видов транспорта.

Ключевые слова: логистический навигатор, условия перевозки грузов, модели определения условий.

Для цитирования: Нутович, В. Е. Алгоритмическое обеспечение и концептуальные модели логистического навигатора в части определения условий перевозок грузов различными видами транспорта / В. Е. Нутович, Т. В. Тулина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 86–93. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_86.

Введение

В настоящее время планирование грузоперевозки является трудоемкой и затратной по времени задачей, как для грузоотправителя, так и для экспедиторов. Для ее решения необходимо проанализировать характеристики груза, составить маршрут и выбрать виды транспорта, перевозчиков, с учетом ограничений, накладываемых этими характеристиками.

В целях решения данной проблемы авторами предложено создание нового инструмента – логистического навигатора, основной задачей которого является поиск оптимального маршрута при наличии информации о грузе, пунктах отправления и назначения, критериях оптимизации – времени или стоимости.

Методы и модели для построения алгоритма логистического навигатора, частный алгоритм определения условий перевозки груза и ограничений маршрута на железнодорожном транспорте, а также общий верхнеуровневый алгоритм работы логистического навигатора рассмотрены в [1–3].

Основная часть

Настоящая статья посвящена детализации общего алгоритма работы логистического навигатора в части анализа условий перевозок различных видов груза для железнодорожного, автомобильного, морского и авиационного видов транспорта.

Из нормативно-правовых актов, определяющих условия перевозки и способы классификации грузов на различных видах транспорта, видно, что для каждого вида транспорта существует своя определенная классификация грузов, устанавливаемая в зависимости от специфики транспортного средства и груза (рис. 1) [4–11].

Железнодорожный транспорт	Автомобильный транспорт	Морской транспорт	Авиационный транспорт
<p>–Обычные грузы:</p> <p>–сухогрузы (насыпные, навалочные, тарноштучные),</p> <p>–наливные (сжиженные газы, химические продукты, нефть и нефтепродукты, пищевые продукты),</p> <p>–живность (животные, рыбы и раки, пчелы, птицы);</p> <p>–Грузы, требующие особых условий перевозки:</p> <p>–опасные,</p> <p>– негабаритные и тяжеловесные,</p> <p>–скоропортящиеся,</p> <p>–смерзающиеся,</p> <p>–грузы на особых условиях.</p>	<p>–Обычные грузы:</p> <p>–твердые - навалочные (кусковые, сыпучие и липкие, порошкообразные и пылевидные),</p> <p>–штучные (тарноштучные, пакетированные, контейнерные, строительные, лесные, промышленные),</p> <p>–жидкие – наливные (пищевые продукты, полужидкие и густеющие);</p> <p>–специфические грузы:</p> <p>–опасные,</p> <p>–скоропортящиеся,</p> <p>–сверхнормативные,</p> <p>–живность.</p>	<p>–Массовые грузы:</p> <p>–наливные,</p> <p>–навалочные,</p> <p>–насыпные,</p> <p>–лесные;</p> <p>–общие (генеральные):</p> <p>–мешковые,</p> <p>–контейнерные и пакетные,</p> <p>–штучные и прочие в таре,</p> <p>–металлы и металлические изделия,</p> <p>–тяжеловесные и габаритные;</p> <p>–особорежимные:</p> <p>–опасные,</p> <p>–скоропортящиеся,</p> <p>–живой скот и сырые животные продукты.</p>	<p>–Легковесные;</p> <p>–тяжеловесные и габаритные;</p> <p>–грузы с сопровождением;</p> <p>–трансферные;</p> <p>–скоропортящиеся;</p> <p>–опасные;</p> <p>–ценные;</p> <p>–жидкости и мокрый груз;</p> <p>–живой груз.</p>

Рис. 1. Рассмотренные виды грузов

Для каждого вида транспорта классификация отличается, так, например, для автомобильного транспорта классификация является более расширенной, чем для железнодорожного транспорта, так как делит грузы не только по способу приспособленности к погрузке-выгрузке (насыпь, налив, тарноштучные), но и добавляет деление по физико-механическим свойствам (кусковые, сыпучие и липкие, порошкообразные и пылевидные) и по отраслям производства (строительные, лесные, промышленные). Классификация на авиационном транспорте учитывает массовые характеристики, а классификация морского транспорта более ориентирована на способ погрузки-выгрузки.

Используя заданные классификации, правила перевозок грузов на соответствующих видах транспорта, было проведено исследование, включающее следующие этапы:

– для каждой из выделенных групп грузов последнего уровня классификации на каждом виде транспорта, были рассмотрены условия перевозок на примере грузов-представителей и составлены частные алгоритмы;

– по причине наличия схожих операций в частных алгоритмах был осуществлен переход к общим алгоритмам определения условий перевозки груза для каждого из видов транспорта;

– по причине наличия схожих операций в общих алгоритмах для каждого из рассматриваемых видов транспорта, был осуществлен переход к единому алгоритму для всех видов транспорта (рис. 2).

Для всех доступных сформированных маршрутов логистический навигатор будет исключать из рассмотрения такие маршруты, которые не будут соответствовать условиям перевозки груза.

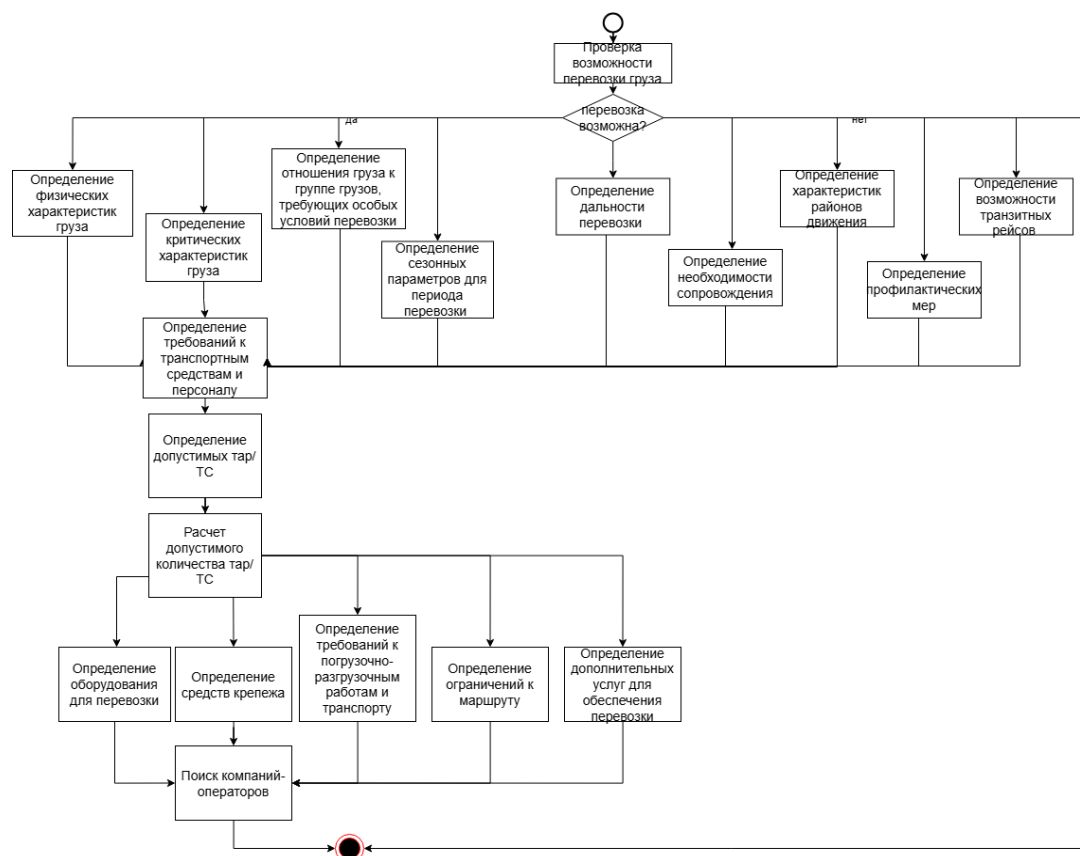


Рис. 2. Общий алгоритм определения условий перевозок груза и ограничений, накладываемых на маршрут для всех видов транспорта

Рассмотрим более подробно содержание каждой из выделенных операций [12–14].

На первом шаге логистический навигатор осуществляет *проверку возможности перевозки груза* по следующим аспектам: возможность перевозки груза заданным видом транспорта; возможность приема груза в пункте отправления предполагаемого маршрута (например, для некоторых грузов невозможен прием на подкарантинных территориях); возможность перевозки груза в заданной таре (упаковке), пакете; возможность перевозки груза заданных размеров и массы.

На следующем этапе определяются *физические характеристики груза*: обладает ли груз специфическими свойствами, влияющими на выбор оборудования, типа транспортного средства (контейнера), необходимости сопровождения, применения дополнительных мер защиты. Примерами свойств выступает сыпучесть, распыляемость, вязкость и хрупкость, абразивность, пожароопасность, взрывоопасность и т.д.

Определение критических характеристик груза предполагает выявление с использованием внутренних классификаторов предельных значений характеристик груза, позволяющих обеспечить безопасность транспортировки и сохранность груза. Например, для перевозки пищевых продуктов определяется критическая температура, для опасных грузов – критическое значение давления и температуры. Также определяется допустимый срок транспортировки для пищевых продуктов (как скоропортящихся, так и нескоропортящихся), сроки транспортировки животных, периодичность их кормления, для хрупких грузов может быть определена предельная скорость перевозки на выбранном типе транспорта и т.д.

Определение отношения груза к группе грузов, требующих особых условий перевозки, предполагает определение с использованием данных ЕТСНГ, а также внутренних классификаторов – относится ли данный груз к грузам, требующим особых условий перевозки (для морского транспорта – к особорежимным грузам). Кроме явных проверок отношения груза к заданным группам, в рамках данной операции дополнительно определяется, возможна ли перевозка опасного груза как неопасного.

Определение сезонных параметров для периода перевозки включает определение показателей температуры, влажности, ветра и т.д. Погодные показатели нужны для определения уровня заполнения цистерн (например, на железнодорожном транспорте) для последующего определения их количества, определения маршрута перевозки (например, на морском транспорте).

Определение дальности перевозки используется для железнодорожного и автомобильного транспорта, выявляет к какому виду дальности относится заданная перевозка – к ближним, средним или дальним расстояниям.

Определение необходимости сопровождения включает определение необходимости в сопровождении и норму сопровождающих, требования к профессиональной подготовке сопровождающих в зависимости от специфики груза, отношения к группе грузов, требующих особых условий перевозки. Дополнительно для автомобильного вида транспорта определяется необходимость сопровождения автомобилем прикрытия и (или) тягачом или патрульным автомобилем ГИБДД МВД России для негабаритных грузов, что требует дополнительных услуг согласования. Стоит отметить, что необходимость сопровождения накладывает ограничения на обеспечение мест для сопровождающих.

Определение характеристик районов движения предполагает для железнодорожного вида транспорта определение характеристик станций и железных дорог, для автомобильного – характеристик дорог, мостов, туннелей, для морского – районов плавания, а для авиационного – воздушных зон предлагаемого маршрута.

Определение профилактических мер предполагает определение необходимости проведения профилактических мер в зависимости от специфики груза, сезона, их вид и периодичность, и, как следствие, включение мест проведения профилактических мероприятий в маршрут перевозки при необходимости.

Определение возможности транзитных рейсов используется только для авиационного транспорта и зависит от специфики груза и возможностей транспортных операторов.

Определение требований к транспортному средству и персоналу предполагает учет наличия соответствующих разрешений и лицензий для перевозки грузов, наличие персонала с соответствующей квалификацией, а также учет ограничений, предъявляемых к конструкции тары или транспортного средства (например, в случае перевозки нефти на железнодорожном транспорте цистерны не должны иметь нижнего слива). Дополнительно необходима проверка логистическим навигатором сроков межремонтных нормативов, даты вывода транспортного средства из эксплуатации, так как данные сроки накладывают ограничения на возможность перевозки груза.

Определение допустимых тар/транспортных средств предполагает, что логистический навигатор определяет допустимые типы транспортных средств в соответствии с ограничениями конструкции, определенными в предыдущем пункте, типами контейнеров, а также требованиями к обеспечению места для сопровождающего.

Расчет допустимого количества тар/транспортных средств включает в себя следующие задачи: учет ограничений по грузоподъемности транспортного средства и допустимому объему перевозки (для наливных грузов), по количеству грузовых мест, максимальной нагрузке на пол и числу ярусов (для штучных грузов), количеству голов на единицу площади (для живых грузов), учет зазоров между грузом и транспортным средством.

Дополнительно учитывается поправочный коэффициент для расчёта допустимой грузоподъемности (для автомобильного транспорта), а также дополнительная масса к основному грузу, например, в виде кормов для животных (для всех видов транспорта).

Определение оборудования для перевозки предполагает определение необходимого оборудования для обеспечения сохранности и безопасности перевозки груза в зависимости от специфики груза и определенного транспортного средства – например, датчики для ценного груза или рефрижераторная установка для скоропортящихся грузов. Дополнительно нужно определить необходимость установки резервного оборудования и их количества по норме.

Определение средств крепежа включает в себя задачи по определению вида и количества креплений на единицу груза по норме. Дополнительно для морского транспорта расчетным способом определяется необходимость в дополнительных средствах крепежа в зависимости от параметров груза и судна, способа размещения груза, района плавания и т.д.

Определение требований к погрузочно-разгрузочным работам и транспорту предполагает определение требований к местам погрузки-разгрузки груза, типа работ, требуемому оборудованию (в случае, если оборудование не является частью конструкции транспортного средства).

Определение ограничений к маршруту: предполагает определение мест для проведения погрузочно-разгрузочных работ, мест водопоя и кормления (для живого груза), пунктов проведения профилактических работ, учет параметров инфраструктуры (например, для автомобильного транспорта параметры дорог должны быть допустимы для требуемой высоты груза, массы, скорости перевозки и т.д., для морского транспорта – возможность перевозки груза по габаритным и весовым параметрам для

выбранных вод, для авиационного транспорта – привязка необходимого типа воздушного судна к данному направлению).

Определение дополнительных услуг для обеспечения перевозки включает в себя дополнительные услуги для организации перевозки, например, маркировка грузовых мест, обеспечение соответствующих знаков безопасности, согласование маршрутов и прочее.

Поиск компаний-операторов предполагает получение списка операторов подвижного состава в соответствии с заданными требованиями к тарам и транспортным средствам, районам маршрута перевозки.

На основе содержания определенных операций можно выделить необходимые сущности и связи между ними, и таким образом перейти к концептуальной модели данных, представленной на рис. 3. Для сокращения числа связей модели не указаны конкретные характеристики груза, влияющие на определение того или иного условия перевозки, все характеристики объединены в блок «Характеристики груза». Основные объекты, отражающие условия перевозки, выделены зеленым цветом.

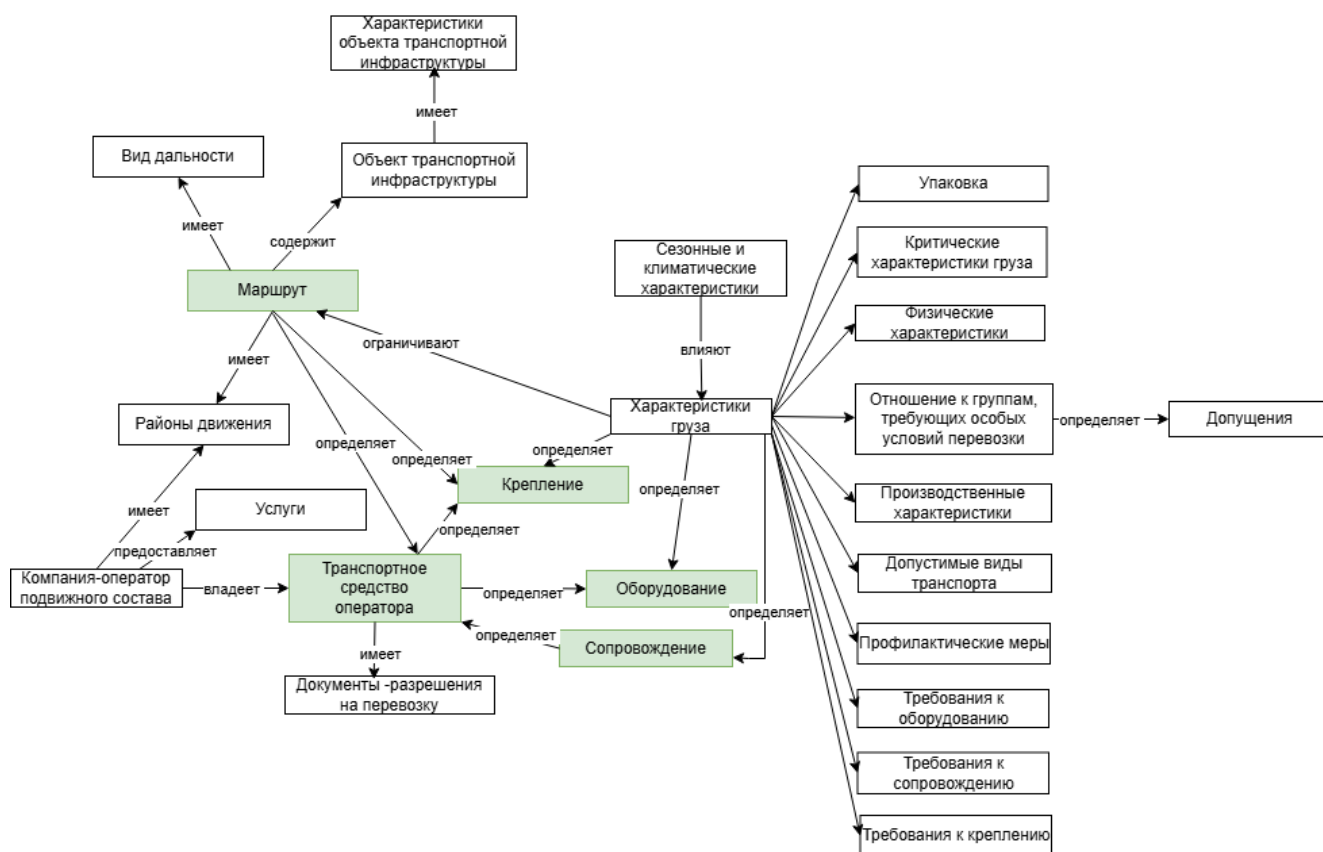


Рис. 3. Концептуальная модель данных для определения условий перевозок груза

Концептуальная модель включает, как уже определенные ранее внутренние классификаторы логистического навигатора, так и данные, необходимые к предоставлению со стороны операторов подвижного состава. Для выбора оператора подвижного состава дополнительно в его базе данных должна присутствовать информация о районах работы оператора, имеющихся транспортных средствах оператора, а также составе оказываемых услуг и рейскуранте.

Выводы

Таким образом, реализация данного ИТ-решения позволит снизить трудоемкость задач по определению условий перевозки груза, ограничений, накладываемых на маршрут, и, как следствие, поиск компаний-операторов подвижного состава. Использование логистического навигатора позволит грузоотправителю оценить возможности перевозок в соответствии с предъявленными требованиями без участия экспедитора, а экспедиторам позволит быстрее переходить к заключению договоров, исключив траты времени на ручные операции, и, как следствие, повысит производительность работы.

Список литературы

1 **Нутович, В. Е.** Методы и модели для построения логистического навигатора грузовой перевозки / В. Е. Нутович, Т. В. Тулина // Логистика и управление цепями поставок. – 2023. – Т. 20, № 3 (108). – С. 4–12. – ISSN 2587-6775.

2 **Нутович, В. Е.** Автоматизация формирования и мониторинга логистической цепи поставки груза / В. Е. Нутович, Т. В. Тулина // Цифровая трансформация транспорта : проблемы и перспективы : материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 27 сентября 2023 года. – Москва : Российский университет транспорта, 2023. – С. 13–21.

3 **Нутович, В. Е.** Проектирование общего алгоритма работы логистического навигатора / В. Е. Нутович, Т. В. Тулина // Интеллектуальные транспортные системы : Материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. – С. 301–304.

4 Приказ Минтранса РФ от 21 апреля 2003 года N ВР-1/п. Об утверждении Правил безопасности морской перевозки грузов // Гарант : официальный сайт. – URL: <https://base.garant.ru/186057/> (дата обращения: 20.11.2024).

5 Приказ МПС РФ от 5 апреля 1999 г. N 20Ц. Об утверждении Правил перевозок смерзающихся грузов на железнодорожном транспорте // Гарант : официальный сайт. – URL: <https://base.garant.ru/180439/> (дата обращения: 20.11.2024).

6 Приказ Министерства транспорта РФ от 4 марта 2019 г. N 66. Об утверждении Правил перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов // Гарант : официальный сайт. – URL: <https://base.garant.ru/72265752/> (дата обращения: 20.11.2024).

7 Приказ Минтранса России от 19.10.2020 N 427. Об утверждении Правил перевозок железнодорожным транспортом животных // Консультант-Плюс : официальный сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377044/ (дата обращения: 20.11.2024).

8 Приказ Минтранса РФ от 28 июня 2007 г. N 82. Об утверждении Федеральных авиационных правил «Общие правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов и требования к обслуживанию пассажиров, грузоотправителей, грузополучателей» // КонсультантПлюс : официальный сайт. – URL: <https://base.garant.ru/191872/> (дата обращения: 20.11.2024).

References

1 **Nutovich, V. E.** Methods and models for constructing a logistics navigator for cargo transportation / V. E. Nutovich, T. V. Tulina // Logistics and supply chain management. – 2023. – Vol. 20, No. 3 (108). – P. 4–12. – ISSN 2587-6775.

2 **Nutovich, V. E.** Automation of formation and monitoring of the logistics chain for cargo delivery / V. E. Nutovich, T. V. Tulina // Digital transformation of transport: problems and prospects : Materials of the III International scientific and practical conference, Moscow, September 27, 2023. – Moscow : Russian University of Transport, 2023. – P. 13–21.

3 **Nutovich, V. E.** Designing a general algorithm for the operation of a logistics navigator / V. E. Nutovich, T. V. Tulina // Intelligent transport systems : Proceedings of the III International scientific and practical Conference, Moscow, May 30, 2024. – Moscow : Russian University of Transport (MIIT), 2024. – P. 301–304.

4 Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated April 21, 2003 N ВР-1/п. On approval of the safety rules for the carriage of goods by sea // Garant : official website. – URL: <https://base.garant.ru/186057/> (date of access: 11/20/2024).

5 Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated April 5, 1999 N 20C. On approval of the rules for the transportation of frozen goods by rail // Garant : official website. – URL: <https://base.garant.ru/180439/> (date of access: 11/20/2024).

6 Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated March 4, 2019 N 66. On approval of the rules for the transportation of perishable goods by rail // Garant : official website. – URL: <https://base.garant.ru/72265752/> (date of access: 11/20/2024).

7 Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated October 19, 2020 N 427. On approval of the rules for the transportation of animals by rail // ConsultantPlus : official website. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377044/ (date of access: 11/20/2024).

8 Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 28, 2007 N 82. On approval of the Federal Aviation Rules “General rules for air transportation of passengers, baggage, cargo and requirements for servicing passengers, shippers, consignees” // Consultant-Plus : official website. – URL: <https://base.garant.ru/191872/> (date of access: 11/20/2024).

9 Правила перевозок опасных грузов по железным дорогам (утв. СЖТ СНГ, протокол от 05.04.1996 N 15) (ред. от 10.06.2024).

// КонсультантПлюс : официальный сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_97657/ (дата обращения: 20.11.2024).

10 РД 31.11.21.24-96. Правила безопасности морской перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ)" (утв. Приказом Росморфлота от 29.11.1996 N 44) // КонсультантПлюс : официальный сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_106443 (дата обращения: 20.11.2024).

11 Приказ Минморфлота СССР от 03.05.1989 N 56 (ред. от 03.04.1991, с изм. от 01.01.2000) «О введении в действие Правил морской перевозки опасных грузов» // КонсультантПлюс: официальный сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_96126/ (дата обращения: 20.11.2024).

12 **Куликов, Ю. И.** Грузоведение на автомобильном транспорте : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Ю. И. Куликов. – Москва : Академия, 2008. – 208 с. – ISBN 978-5-7695-5674-6.

13 **Перепон, В. П.** Организация перевозок грузов : учебник для техникумов и колледжей ж.д.-трансп. / В. П. Перепон. – Москва : Маршрут, 2003. – 614 с. – ISBN 5-89035-110-9.

14 **Козырев, В. К.** Грузоведение : учебник для вузов / В. К. Козырев. – Москва : РКонсульт, 2005. – 360 с. – ISBN 5-94976-057-3.

9 Rules for the transportation of dangerous goods by rail (approved by Council on Railway Transport of the CIS, protocol dated 05.04.1996 N 15) (as amended on 10.06.2024) // ConsultantPlus : official website. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_97657/ (date of access: 11/20/2024).

10 RD 31.11.21.24-96. Safety rules for the maritime transportation of bulky and heavy cargo (KTG)" (approved by Order of Rosmorflot dated November 29, 1996 N 44) // ConsultantPlus : official website. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_106443 (date of access: 11/20/2024).

11 Order of the USSR Ministry of Maritime Fleet dated 03.05.1989 N 56 (as amended on 03.04.1991, as amended on 01.01.2000) “On the implementation of the rules for the maritime transportation of dangerous goods” // ConsultantPlus: official website. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_96126/ (date of access: 11/20/2024).

12 **Kulikov, Yu. I.** Cargo Science in Automobile Transport : a textbook for students of higher educational institutions / Yu. I. Kulikov. – Moscow : Academy, 2008. – 208 p. – ISBN 978-5-7695-5674-6.

13 **Perepon, V.P.** Organization of cargo transportation : a textbook for technical schools and colleges of railway transport / V. P. Perepon. – Moscow : Marshrut, 2003. – 614 p. – ISBN 5-89035-110-9.

14 **Kozyrev, V. K.** Cargo science : textbook for universities / V. K. Kozyrev. – Moscow : RConsult, 2005. – 360 p. – ISBN 5-94976-057-3.

V. E. Nutovich, T. V. Tulina

ALGORITHMIC SUPPORT AND CONCEPTUAL MODELS OF THE LOGISTICS NAVIGATOR IN TERMS OF DETERMINING THE CONDITIONS OF CARGO TRANSPORTATION BY VARIOUS MODES OF TRANSPORT

Abstract. This article describes the models for determining the conditions of transportation for various types of cargo by rail, road, air and sea transport. To build the models, the regulatory acts and reference books governing the process of cargo transportation, the principles of cargo classification for air, sea, rail and road transport were studied. Based on the classification, the conditions of transportation for each specific type of cargo by the corresponding type of transport were considered. Based on the analysis, a general model for determining the conditions of cargo transportation for all modes of transport was built, and a conceptual data model was defined that determines the relationships between the main objects of transportation necessary to determine the conditions. The presented models are used as the basis of algorithms of the new IT tool designed by the authors – the logistics navigator, intended for obtaining an optimal logistics route for cargo transportation using various types of transport.

Keywords: logistics navigator, cargo transportation conditions, models for determining conditions.

For citation: Nutovich, V. E. Algorithmic support and conceptual models of the logistics navigator in terms of determining the conditions for transporting cargo by various modes of transport / V. E. Nutovich, T. V. Tulina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 86–93. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_1_86.

Сведения об авторах

Нутович Вероника Евгеньевна

Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Цифровые технологии управления транспортными процессами»,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
начальник научно-образовательного центра «Интеллектуальные транспортные системы и технологии»,
e-mail: NutovichVE@edu.rut-miit.ru

Тулина Татьяна Владимировна

Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Цифровые технологии управления транспортными процессами»,
аспирант,
e-mail: 791493@edu.rut-miit.ru

Information about the authors

Nutovich Veronika Evgenievna

Russian University of Transport (MIIT),
Chair “Digital Technologies for Transport Process Management”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Chair,
Head of the Scientific and Educational Center “Intelligent Transport Systems and Technologies”,
e-mail: NutovichVE@edu.rut-miit.ru

Tulina Tatyana Vladimirovna

Russian University of Transport (MIIT),
Chair “Digital Technologies for Transport Process Management”,
Postgraduate Student,
e-mail: 791493@edu.rut-miit.ru

Е. Д. Псеровская, К. В. Желдак, Р. А. Овчинников

АЛГОРИТМ ПОДБОРА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ

Аннотация. Статья посвящена разработке мероприятий по сокращению потерь сыпучих грузов от выдувания при перевозке в полувагонах. Проанализированы характеристики модельного ряда эксплуатируемых полувагонов, определены наиболее важные для организации подбора подвижного состава, влияющие на степень заполнения кузова грузом, а также характеристики сыпучих грузов, влияющие на высоту погрузки в полувагон. Выделены наиболее значимые, которые обуславливают как степень заполняемости кузова вагона, так и конфигурацию поверхности груза.

Разработана аэродинамическая модель процесса выдувания сыпучих грузов при перевозке в полувагонах в специализированном ПО в области исследования гидрогазодинамики (CFD). На основании результатов исследования модели разработан алгоритм подбора оптимальных вариантов сочетания характеристик используемых для перевозки полувагонов и конкретных марок и фракций сыпучих грузов, при которых обеспечивается минимизация потерь груза от выдувания.

Ключевые слова: мелкодисперсные сыпучие грузы, открытый подвижной состав, потери от выдувания, характеристики подвижного состава, характеристики угля, алгоритм подбора.

Для цитирования: Псеровская, Е. Д. Алгоритм подбора подвижного состава для транспортировки мелкодисперсных сыпучих грузов / Е. Д. Псеровская, К. В. Желдак, Р. А. Овчинников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 94–105. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_94.

Введение

На сегодняшний день транспортировка мелкодисперсных сыпучих грузов на открытом подвижном составе занимает значительную долю в общем объеме грузооборота Российских железных дорог (28–36 % от общего объема погрузки по сети дорог в 2023 году [1]). При этом нельзя отрицать имеющиеся недостатки данного способа транспортировки, в частности угля, связанные с выдуванием мелких частиц груза обтекающими воздушными потоками. При перевозке на расстояние от 500 до 2000 км общие потери угля составляют от 400 до 1200 кг/вагон [2, с. 5], при этом потери от выдувания составляют 55 % общих его потерь. Важность решения данной проблемы в России была в приоритете еще в 60–70-е годы прошлого столетия, что вылилось в полномасштабные исследования ученых НВЦ «Трансгруз», при этом также рассматривался вопрос эффективности использования грузоподъемности полувагонов. Решением увеличения загрузки было применение способа перевозки угля «с шапкой» (выше стен), оптимальная обтекаемая форма которой была определена путем проведения опытных перевозок угля по сети железных дорог СССР, а также исследования в аэродинамической трубе и в эксплуатационных условиях различных моделей полувагонов (имеющих разную высоту кузова) для определения размера потерь [4]. Это было обусловлено следующими факторами:

- а) характеристиками используемого для перевозки подвижного состава (соотношение грузоподъемности и объема кузова (удельная грузоподъемность), допускаемая осевая нагрузка на ж.-д. путь и др.);
- б) характеристиками предъявляемого к перевозке угля (марочный и фракционный состав, объемная плотность, угол естественного откоса, влажность и др.);

в) централизованным распределением вагонов (после выгрузки), принадлежащих Перевозчику.

Анализируя сегодняшнее состояние вопроса транспортировки угля в полувагонах, можно отметить: во-первых, наличие большого числа моделей полувагонов (в том числе инновационных), имеющих разные значения удельной грузоподъемности (от 0,77 до 0,93 т/м³ [5]), а также допускаемой нагрузки на ось (от 23,5 до 27 т/ось [5]), во-вторых, возросшее разнообразие марочного и фракционного состава предъявляемого к транспортировке угля, исходя из требований конкретных грузополучателей, в-третьих, применение различных технологий погрузки угля конкретным потребителям. В результате применяются способы погрузки угля в полувагон: выше стен, ниже стен, в одном уровне со стенами,

что в случае массовой погрузки угля носит скорее случайный характер. К разнообразию моделей полувагонов в сегодняшних реалиях следует добавить и наличие большого числа игроков на рынке операторов подвижного состава, когда в подавляющем большинстве случаев фактором выбора грузоотправителем тех или иных моделей полувагонов для осуществления перевозки угля становится ставка аренды полувагонов и привлекательность условий долгосрочных договоров с конкретным оператором подвижного состава.

Учитывая вышеприведенные современные особенности транспортировки угля в полувагонах, результаты фундаментальных исследований проблемы выдувания угля при его перевозке, а также современные результаты имитационного моделирования [3], показывающие значительное влияние высоты загрузки угля в полувагон на интенсивность его выдувания, следует отметить назревшую необходимость в разработке системы рационального подбора открытого подвижного состава под перевозку соответствующих его характеристикам мелкодисперсных сыпучих грузов для обеспечения оптимальной высоты загрузки, при которой возможно минимизировать потери от выдувания.

Цель исследования – разработать алгоритм подбора оптимальных вариантов сочетания характеристик используемых для погрузки полувагонов и конкретных марок и фракций сыпучих грузов, обеспечивающих рациональное использование грузоподъемности при высоте погрузки, обеспечивающей минимальные потери от выдувания.

Анализ характеристик модельного ряда эксплуатируемых полувагонов

Как отмечалось ранее, наличный парк полувагонов для перевозки мелкодисперсных сыпучих грузов на сегодняшний день имеет большой разбег по моделям, что связано как с обновлением подвижного состава в результате выбытия парка по истечению срока службы, так и со стремлением производителей полувагонов привлечь долю рынка. Говоря о динамике обновления вагонного парка, можно отметить, что по состоянию на 2017–2019 годы доля инновационного подвижного состава на сети дорог составляла не более 5 %, из них инновационных полувагонов в общем парке полувагонов – 11,4 % [6, 7]. Но уже по состоянию на декабрь 2023 года доля инновационных вагонов составила 17 %, а доля инновационных полувагонов в общем парке полувагонов – 28 % [8]. Таким образом, парк полувагонов обновляется стремительными темпами не только в отношении замены типовых моделей, выработавших срок службы, но и в отношении ввода в эксплуатацию новых моделей с улучшенными характеристиками, что в большинстве случаев оказывает существенное влияние на способ загрузки мелкодисперсными сыпучими грузами.

Для анализа характеристик модельного ряда эксплуатируемых полувагонов были отобраны наиболее распространенные модели, у которых рассмотрено соотношение характеристик, влияющих на степень заполнения кузова грузом: удельная грузоподъемность (отношение грузоподъемности к объему кузова) и объем кузова [5]. Стоит отметить, что удельная грузоподъемность была выбрана из соображения, что по своему физическому смыслу она соответствует такой характеристике сыпучих грузов, как объемная плотность, на основании чего можно наиболее точно прогнозировать степень загрузки вагона.

На рис. 1 приведены вышеперечисленные характеристики отобранных моделей полувагонов, среди которых и инновационные (выделены оранжевым цветом), данные модели упорядочены по условию возрастания значения удельной грузоподъемности. Детальное рассмотрение полученной диаграммы позволяет отметить следующие особенности:

– наибольшему значению удельной грузоподъемности соответствуют типовые модели полувагонов с наименьшим объемом кузова при стандартной грузоподъемности (69–70 т), что оправдано обеспечением универсальности данного подвижного состава (в том числе для перевозки тяжеловесных грузов);

– инновационные полувагоны имеют большие объемы кузова в сравнении с типовыми моделями, что определяет их расширенные возможности для транспортировки легковесных сыпучих грузов, например углей рядовых фракций, имеющих меньшее значение объемной плотности.

Анализ распределения эксплуатируемых моделей типовых (рис. 3) и инновационных (рис. 4) полувагонов позволил установить, что, во-первых, характеристики большинства эксплуатируемых типовых моделей полувагонов определяются стандартным значением грузоподъемности (69,5 т) для моделей 12-132, 12-132-04 и 12-296-01 при заметном различии в значении удельной грузоподъемности: 0,79 т/м³, 0,79 т/м³ и 0,91 т/м³ соответственно, – что говорит о существенных различиях в загрузке данных моделей полувагонов при массовой погрузке, к примеру, каменного угля; во-вторых, эксплуатируемые модели инновационных полувагонов 12-9853, 12-196-02 и 12-9869 обладают повышенной грузоподъемностью (75, 75 и 77 т соответственно), однако значительного разбега в значении удельной грузоподъемности не наблюдается

(0,85, 0,8 и 0,84 т/м³ соответственно), что свидетельствует о возможном равном заполнении кузова данных полувагонов по высоте при массовой погрузке каменного угля одинаковой марки и фракции.

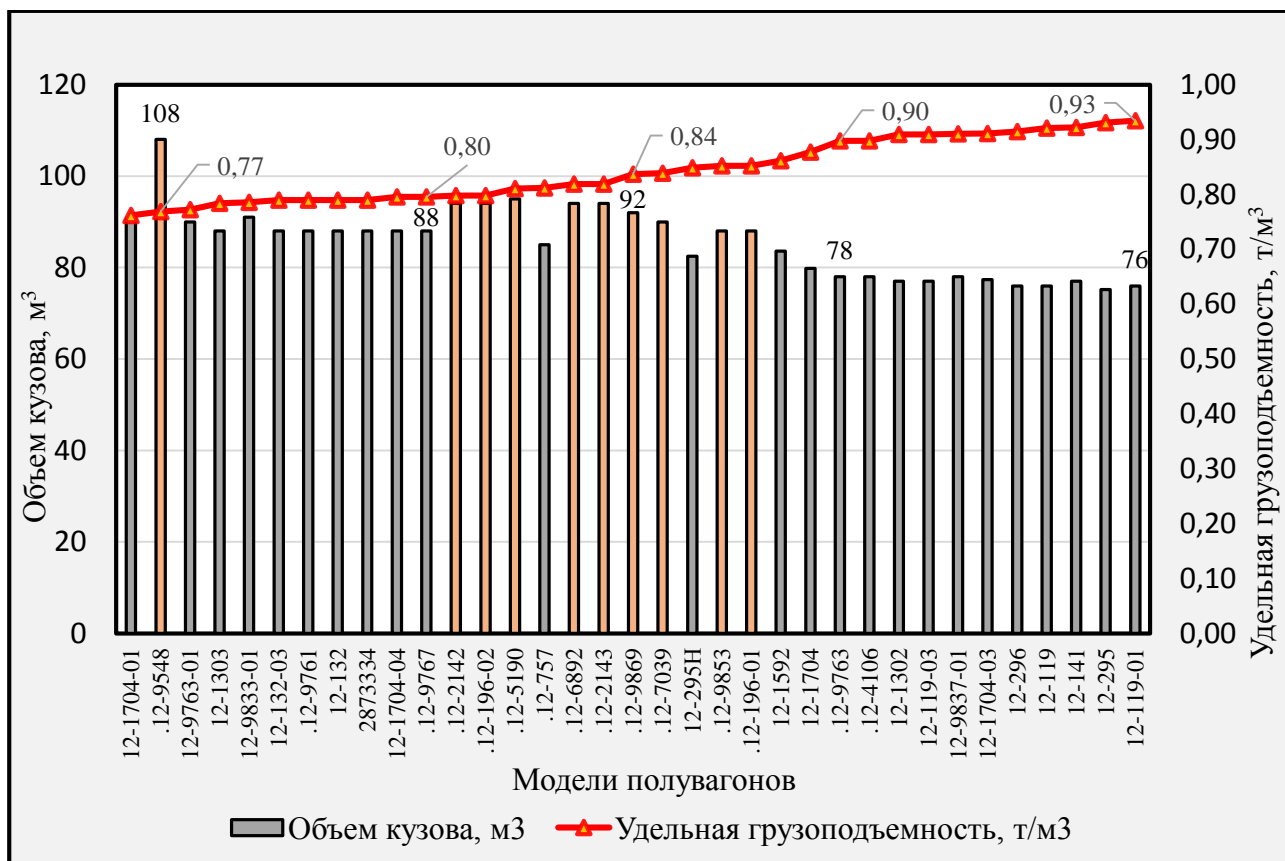


Рис. 1. Исследуемые характеристики модельного ряда эксплуатируемых полувагонов [5]

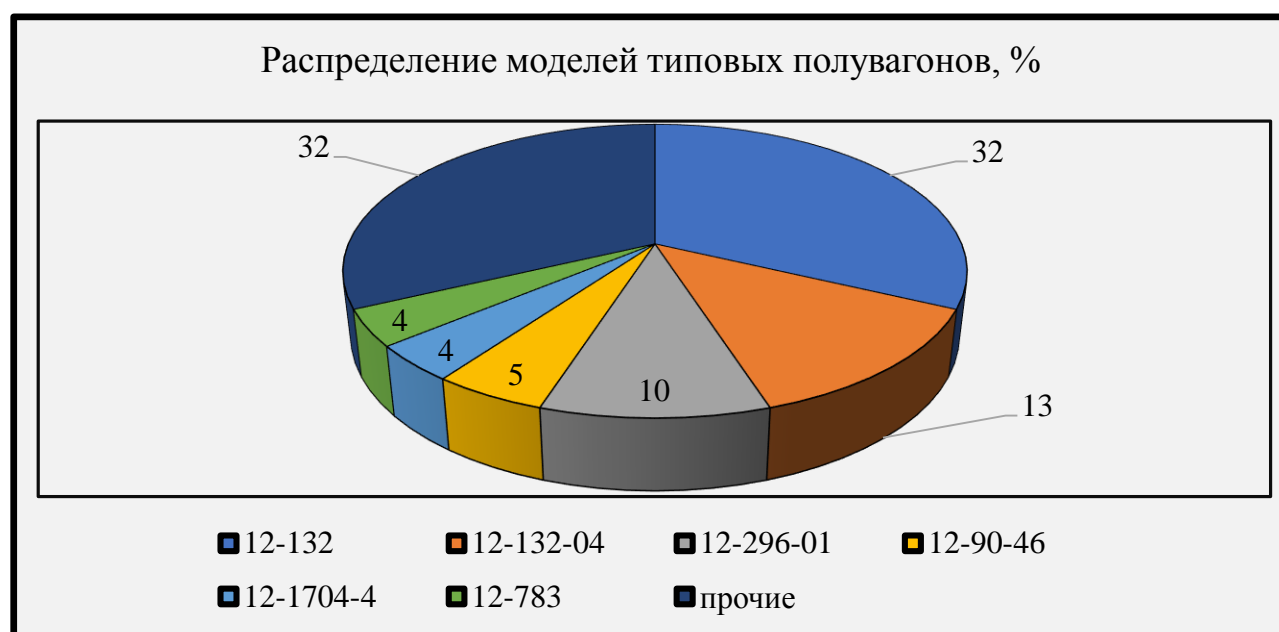


Рис. 2. Диаграмма соотношения моделей эксплуатируемых типовых полувагонов в рабочем парке [9]

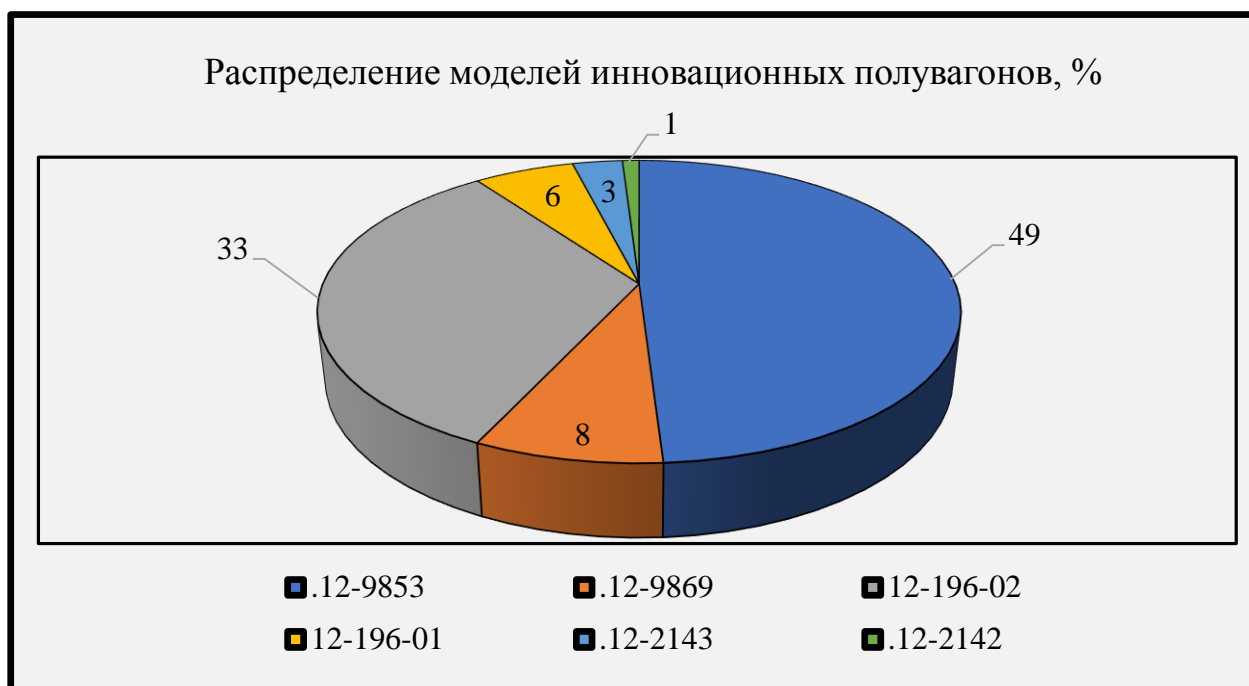


Рис. 3. Диаграмма соотношения моделей эксплуатируемых инновационных полувагонов в рабочем парке [8]

Анализ характеристик мелкодисперсных сыпучих грузов

Среди характеристик, влияющих на высоту погрузки угля в полувагоне, выделены наиболее значимые, которые обуславливают как степень заполняемости кузова вагона, так и конфигурацию поверхности груза, с учетом полного использования грузоподъемности полувагонов. Среди них:

а) объемная плотность: для каменных углей ее значение лежит в интервале 0,68–0,96 т/м³, для бурых – 0,65–0,85 т/м³, для антрацитов – 0,85–1,15 т/м³;

б) влажность, причем влага в угле может содержаться в виде внешней и гигроскопичной (внутренней) влаги;

в) фракционный состав, представленный в табл. 1;

г) угол естественного откоса: данная характеристика угля в покое и в движении имеет различные значения: для каменного угля в среднем в покое она составляет 27–45°, а в движении 20–40°;

д) коэффициент уплотнения. Равен отношению объемов груза до и после уплотнения. Характеризует способность угля изменять объемную плотность под внешним воздействием, например катка-уплотнителя, для каменных углей он составляет 1,2–1,21.

Таблица 1

Деление угля по размерам кусков на сорта

Класс крупности (обозначение)	Размеры кусков, мм
Плитный (П)	100–200 (300)
Крупный (К)	50–100
Орех (О)	25–50
Мелкий (М)	13–25
Семечко (С)	6–13
Штыб (Ш)	0–6
Рядовой (Р)	0–200 (300)

Важность учета физико-механических характеристик сыпучих грузов при планировании их погрузки в полувагоны определяется и тем, что, к примеру, каменные угли имеют различные значения

объемной плотности не только вследствие различий в марочном и фракционном составе, но и ввиду различной их влажности, обусловленной особенностями технологии добычи и обогащения. Так, согласно табл. 2, для углей марки Д, фракции М, отгружаемых различными предприятиями на различных станциях отправления, имеет место разница в значениях влажности, что будет оказывать влияние на фактическое значение объемной плотности. Учитывая данный факт, стоит отметить необходимость определения фактического значения объемной плотности на каждом предприятии-грузоотправителе для наиболее точной работы предложенного алгоритма.

Таблица 2

**Значения влажности углей марки ДМ,
отгружаемых грузоотправителями различных станций погрузки**

Станция погрузки (предприятие-грузоотправитель)	Влажность угля, %
Черногорские Копи (угольный разрез «Черногорский» ООО «СУЭК», ЦОФ «Черногорская») [10]	11
Камышта (ООО «Восточно-Бейский разрез») [11]	14,1
Ташеба (обогатительная фабрика разреза «Степной») [12]	15,5
Уссурийск (ООО «Разрез «Западный») [13]	12

С учетом вышеизложенных особенностей организации транспортировки мелкодисперсных сыпучих грузов в полувагонах, а именно разнообразия модельного ряда полувагонов, отличающихся по погрузочным характеристикам, а также значительной вариации физико-механических характеристик, предъявляемых к перевозке сыпучих грузов, разработан алгоритм подбора оптимальных вариантов сочетания характеристик используемых для погрузки полувагонов и конкретных марок и фракций сыпучих грузов, при которых обеспечивается заданная высота загрузки из условия минимизации потерь груза от выдувания и максимального использования грузоподъемности. Разработка алгоритма производилась с учетом следующих условий и допущений:

а) подбор полувагонов осуществляется из условия максимального использования грузоподъемности;
 б) фактические значения объемной плотности γ и влажности φ сыпучих грузов экспериментально определяет каждый грузоотправитель в целях обеспечения наиболее точного подбора подвижного состава;

в) учитываются результаты ранее выполненных исследований зависимости интенсивности выдувания мелкодисперсных сыпучих грузов при перевозке от их высоты загрузки в полувагонах в виде оптимального значения высоты возвышения стен кузова полувагона над поверхностью груза $\Delta h_{\text{опт}}$, причем

$$\Delta h_{\text{опт}} = H - h_{\text{гр}}^{\text{опт}}, \quad (1)$$

где H – высота стены кузова полувагона, мм; $h_{\text{гр}}^{\text{опт}}$ – оптимальная высота загрузки сыпучего груза;

г) предполагается формирование базы данных о характеристиках моделей, имеющих на рынке у операторов подвижного состава полувагонов, в форме табл. 3, а также базы данных о соответствии параметра $\Delta h_{\text{опт}}$ каждой марке и фракции, например, каменных углей – в форме табл. 4;

д) влияние конфигурации «шапки» груза, получаемой при его загрузке в полувагон с учетом применения соответствующей технологии погрузки, а также мероприятий по разравниванию и уплотнению груза после погрузки, будет учитываться коэффициентом пропорциональности α , показывающим, насколько фактический объем груза в полувагоне будет меньше в сравнении с его расчетом путем умножения площади пола на оптимальную заданную высоту загрузки $h_{\text{гр}}^{\text{опт}}$, то есть данный коэффициент учитывает области недогрузов вблизи торцевых и продольных стен кузова, а также недогрузки из-за образования сводов и волн на поверхности груза, что обусловлено в каждом случае местными особенностями технологии погрузки (α должен определяться для каждого фронта погрузки конкретного груза).

Таблица 3

**Форма таблицы базы данных о характеристиках, имеющихся на рынке у операторов
подвижного состава моделей полувагонов**

№ п/п, i	Модель полувагона	Длина кузова*, м	Ширина кузова*, м	Высота стен кузова*, м	Грузоподъемность, т
1	12-1704-01	13	2,93	2,355	69
...
i	12-....	L_i	B_i	H_i	G_i

*примечание к таблице 3:
Используются внутренние размеры кузова

Таблица 4

**Форма таблицы базы данных о соответствии параметра $\Delta h_{\text{опт}}$
каждой марке и фракции каменных углей**

№ п/п, j	Марка угля	Фракция угля	Угол естественного откоса, °	$\Delta h_{\text{опт}}$, м
1	А	Ш	31	0,2
...
j	Б	О	37	0,05

Переходим к обоснованию теоретической базы, лежащей в основе разрабатываемого алгоритма.

Непосредственный подбор моделей полувагонов под погрузку конкретной марки и фракции угля осуществляется из расчета загружаемого объема угля в полувагон, $V_{\text{гр}}$, из условия максимального использования грузоподъемности, G :

$$V_{\text{гр}} = \frac{G}{\gamma}, \quad (2)$$

с другой стороны, загружаемый объем груза можно рассчитать на основании оптимальной заданной высоты загрузки

$$V_{\text{гр}} = LBh_{\text{гр}}^{\text{опт}} \alpha, \quad (3)$$

с учетом выражений (1), (2) и (3) получаем

$$\frac{G}{\gamma} = LB(H - \Delta h_{\text{опт}}) \alpha. \quad (4)$$

Таким образом, получаем выражение для осуществления подбора модели полувагона, при которой будет полностью использована грузоподъемность и обеспечена оптимальная высота загрузки. Подбор осуществляется следующим образом:

1 Грузоотправитель вводит данные о марке, фракции отгружаемого угля, значении его объемной плотности, коэффициента α .

2 Программа подбора с использованием баз данных табл. 3 и 4 присваивает значения следующих параметров: G_i , L_i , B_i , H_i , $\Delta h_{\text{опт}}$, – тем самым начиная перебор значений характеристик различных моделей полувагонов из условия выполнения выражения (4).

3 При выполнении выражения (4) программа выводит соответствующую данным параметрам модель полувагона и переходит к расчету выражения (4) для следующей модели.

4 В случае если при параметрах данной модели полувагона выражение (4) не выполняется, программа переходит к следующей в базе данных модели, вывод данной модели пользователю не производится.

5 После каждого вывода подходящей под выражение (4) модели полувагона программа осуществляет проверку окончания списка моделей полувагонов, имеющихся у операторов подвижного состава, с которыми предполагается сотрудничество. По достижении последней в списке модели программа завершает свою работу.

Блок-схема вышеизложенного алгоритма подбора оптимальных вариантов сочетания характеристик используемых для погрузки полувагонов и конкретных марок и фракций сыпучих грузов, обеспечивающих оптимальную заданную высоту загрузки, приведена в виде рис. 4.

Разработанная аэродинамическая модель полувагона с грузом в специализированном ПО в области исследования гидрогазодинамики позволила выполнить апробацию применения алгоритма выбора подвижного состава для перевозки сыпучих грузов мелких фракций. Аэродинамическая модель представляет собой 3D-модель кузова полувагона с грузом мелкой фракции, помещенную в объем воздуха, который обтекает полувагон с грузом при движении поезда. Эксперименты на модели позволили оценить влияние высоты погрузки мелкодисперсного сыпучего груза на аэродинамические параметры обтекающих полувагон с грузом воздушных потоков, выражающиеся в распределении значений скорости, давления воздуха вблизи поверхности груза в различных ее областях, а также образовании завихрений.

В качестве примера рассмотрим погрузку угля марки АСШ, отгружаемого предприятием «ШО» и имеющего следующие объемно-массовые характеристики: объемная плотность – 1,3 т/м³, фракция 0–13 мм, угол естественного откоса 27° в покое, 23° в движении, влажность 7 % [14]. При учете возможности заключения предприятием долгосрочных договоров на аренду полувагонов с несколькими операторами подвижного состава, эксплуатируемый парк каждого из которых состоит из определенных моделей полувагонов, был рассмотрен вариант подачи под погрузку группы полувагонов, среди которых можно выделить, к примеру, следующие модели: 12-9548, 12-295, 12-141. Учитывая, что конфигурация поверхности груза в полувагоне будет постоянной (общий вид поверхности груза при бункерной погрузке в полувагон приведен на рис. 5, а), можно установить, что высота загрузки $H_{\text{загр}}$ будет отличаться исключительно ввиду различных характеристик полувагонов. Объем криволинейной поверхности груза был определен в САПР 3D-моделирования, выбор которого обоснован в работе [15], и составил 13,33 м³, при этом высота сечения криволинейной поверхности груза была определена исходя из угла естественного откоса в движении и составила 380 мм. В свою очередь заполняемость объема кузова данных моделей полувагонов и высота загрузки угля были определены согласно методике, приведенной в работе [3].

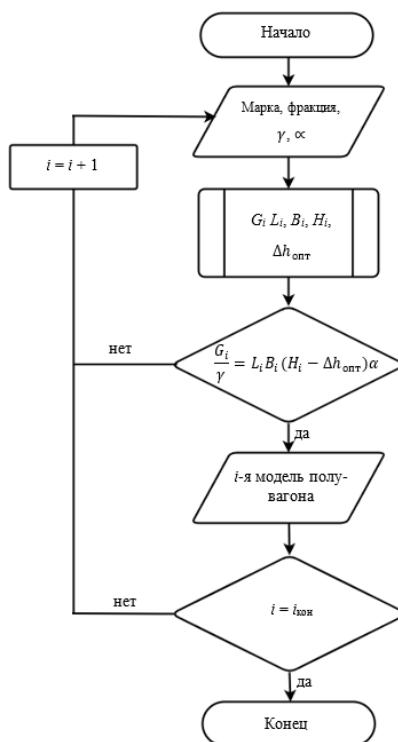
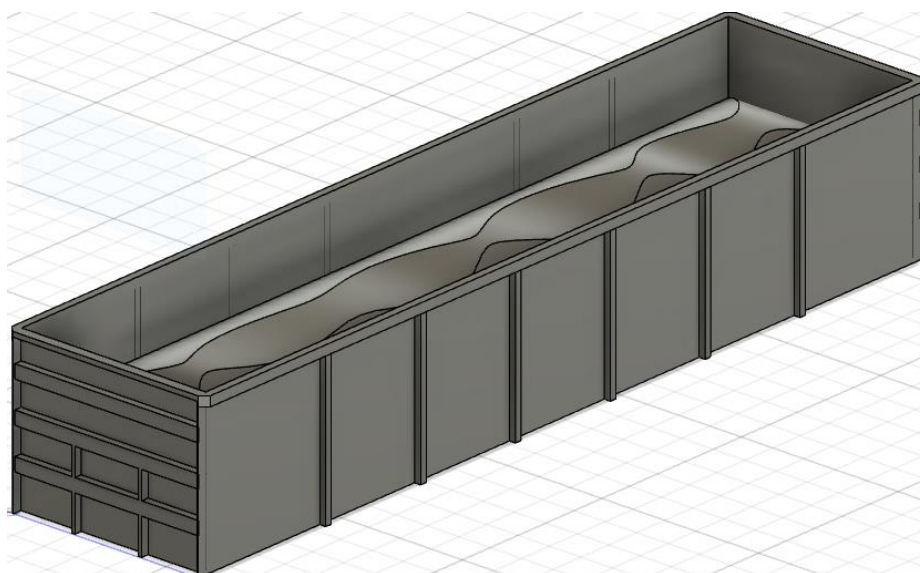
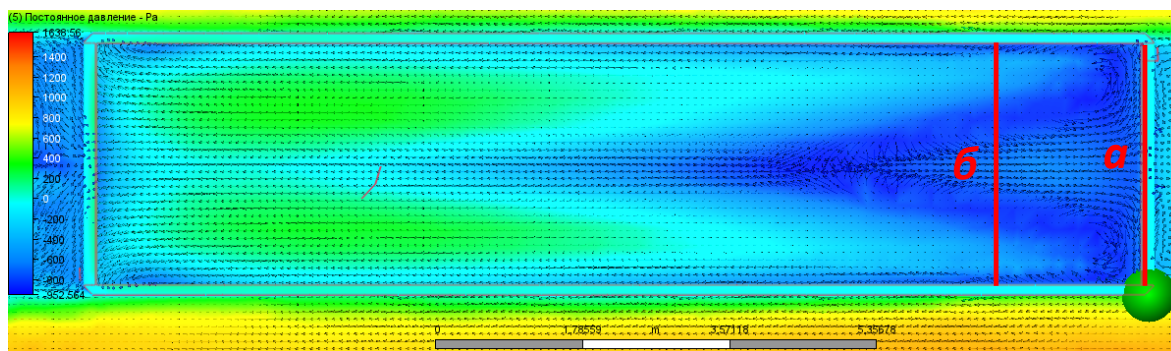


Рис. 4. Блок-схема алгоритма подбора оптимальных вариантов сочетания характеристик, используемых для погрузки полувагонов и конкретных марок, и фракций сыпучих грузов



1



2

Рис. 5. Аэродинамическая модель процесса выдувания:

1 – общий вид конфигурации шапки» груза в полувагоне модели 12-9548 при бункерной погрузке угля АСШ; 2 – общий вид (сверху) протекания воздушных потоков вблизи поверхности груза (уголь АСШ) в полувагоне модели 12-9548, исследуемые области поверхности груза

Непосредственно оценить влияние данных значений высоты загрузки угля на интенсивность его выдувания при перевозке в полувагоне возможно на основании эмпирических зависимостей секундного расхода мелких частиц угля с поверхности груза от скорости воздушных потоков вблизи нее (что соответствует определению интенсивности выдувания Q в теории эрозии), приведенных в исследовании В.И. Щапова (выражение (6)) [16]. Данные зависимости, в свою очередь, определяются значением скорости воздушных потоков вблизи поверхности груза v_b , м/с, а также ускорений вертикальных колебаний j_b , которые при скорости поезда 90 км/ч могут достигать значений 0,2g [16].

Согласно результатам исследования зависимости интенсивности выдувания угля мелких фракций при перевозке в различных моделях полувагонов при помощи разработанной аэродинамической модели наиболее оптимальная высота загрузки для угля марки АСШ (0–13 мм) составляет 400 мм ниже уровня стен. При такой высоте загрузки достигается минимизация интенсивности выдувания с поверхности груза в области между передней торцевой стеной (а) и первой по ходу движения стойкой кузова полувагона (б), подверженной действию вихрей с вертикальной осью, общий вид которых приведен на рис. 5, б.

В табл. 5 определены параметры загрузки угля марки АСШ в приведенные выше модели полувагонов и соответствующие каждому варианту загрузки значения v_b в ранее выделенных ее областях (рис. 5, б), полученные в ходе моделирования аэродинамики рассматриваемых моделей полувагонов с грузом. Значения Q были определены на основании эмпирических зависимостей, полученных в ходе массовых опытных перевозок, а также с учетом критической скорости начала выдувания частиц угля, определенной по формуле (6) [17].

Таблица 5

Исследуемые параметры загрузки полувагонов при скорости движения поезда 90 км/ч

Модель полувагона		12-9548	12-295	12-141
Исследуемые параметры				
$H_{\text{загр}}$, мм		1783	1660	1689
$\Delta h_{\text{загр}}$, мм*		-885	-390	-190
v_b , м/с	В области а)	3,79	4,36	8,4
	В области б)	7,05	2,48	7,07
Q , г/с	В области между а) и б)	33,44	6,95	80,86
*Примечание к табл. 5: Знак «←» в значениях параметра $\Delta h_{\text{загр}}$ означает погрузку ниже уровня стен кузова полувагона				

Анализ полученных значений позволил установить, что при параметрах загрузки угля марки АСШ в полувагон модели 12-295 будет обеспечено значение $H_{\text{загр}}$, близкое к оптимальному для данной марки угля, при условии полного использования грузоподъемности вагона, что характеризуется значительным снижением интенсивности выдувания угля в областях, подверженных действию турбулентных воздушных потоков, где механизмы выдувания соответствуют эффекту «высасывания» частиц, обладающему наибольшей способностью к пылеуносу [18]. Кроме того, данное различие в механизмах выдувания с поверхности груза приводит и к существенной разнице в значениях так называемых критических скоростей начала массового выдувания частиц угля (для вихревой природы выдувания угля данная величина в 2–3 раза меньше, чем при ламинарном обтекании воздухом поверхности груза, чему соответствует область поверхности груза, расположенной правее отмеченных областей (а) и (б) на рис. 5, б). Данное снижение интенсивности выдувания (с допустимым ее увеличением до 10 % вследствие разбега по величине высоты погрузки до 35 мм в сторону увеличения – до 365 мм ниже уровня стен) наблюдается и для полувагонов моделей 12-1303, 12-132-03, 12-9761, 12-132, 12-9766, 12-196-02, 12-5190, которые можно считать наиболее предпочтительными для погрузки угля марки АСШ.

В то же время, если рассматривать погрузку угля марки ДМО (фракции 13–50 мм), минимизация интенсивности выдувания будет обеспечиваться уже при высоте погрузки 330 мм ниже уровня стен кузова полувагона, что обуславливается значительным влиянием такого аэродинамического параметра поверхности груза, как шероховатость, оказывающего влияние на величину скорости воздуха вблизи поверхности груза. Тогда с учетом разницы в значении величины объемной плотности груза, обусловленной, во-первых, разными значениями действительной плотности двух марок угля (1,16 т/м³ [11] и 1,4 т/м³ [14] соответственно), и, во-вторых, разным гранулометрическим составом, влияющим на пустоты между частицами груза, наиболее предпочтительными для погрузки угля данной марки и фракции следует считать полувагоны моделей: 12-296, 12-119, 12-295, 12-1302, 12-119-03, 12-1704-03. Примечательно, что полувагон модели 12-295 соответствует указанному выше критерию оптимальности (высоте погрузки) как для угля марки АСШ, так и для угля марки ДМО, что делает его использование наиболее эффективным в отношении снижения потерь от выдувания различных марок и фракций углей.

Заключение

Таким образом, разработанный алгоритм подбора моделей полувагонов для погрузки конкретных марок и фракций сыпучих грузов, обеспечивающий оптимальную заданную высоту загрузки из условия минимизации потерь от выдувания и максимального использования грузоподъемности, предполагает оперативный выбор моделей полувагонов из парка оператора подвижного состава.

База данных, содержащая подобранные с использованием разработанного алгоритма для каждой марки и фракции груза модели подвижного состава, может быть сформирована заранее с учетом вышеуказанных местных особенностей отгружаемой продукции.

Использование данного алгоритма в подборе подвижного состава может быть особенно целесообразно при организации закольцованных маршрутов, а также при приобретении собственного подвижного состава.

Список литературы

- 1 Объем погрузки основных видов грузов на железнодорожном транспорте в 2023 году // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 09.01.2025).
- 2 Обеспечение сохранности грузов при железнодорожных перевозках / под ред. В. К. Бешкетто. – Новосибирск : НИИЖТ, 1971. – 103 с.
- 3 **Псеровская, Е. Д.** Исследование влияния формы поверхности навалочных грузов на выдувание при транспортировке / Е. Д. Псеровская, Р. А. Овчинников // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (63). – С. 53–61. – DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_53.
- 4 Обеспечение сохранности угля при железнодорожных перевозках / Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп., Науч.-техн. о-во ж.-д. трансп. ; сост.: В. К. Бешкетто [и др.]. – Москва : Транспорт, 1972. – 47 с.
- 5 Вагон.by : сайт о вагонном парке и вагонном хозяйстве. – URL: <https://vagon.by/railcars/list/6> (дата обращения: 10.01.2025).
- 6 **Глазкова, В. А.** Рынок инновационных полувагонов : государственная поддержка, производство, тарифная политика / В. А. Глазкова, Л. А. Магага // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 3 (70). – С. 10–15. – ISSN 1994-831X.
- 7 **Федорович, В. О.** Современные проблемы обновления частного парка грузовых вагонов в российской федерации / В. О. Федорович, Т. В. Федорович // Вестник Томского государственного университета. Экономика. – 2019. – № 45. – С. 88–100. – DOI 10.17223/19988648/45/6.
- 8 В 2024 году произведено более 21 тыс. инновационных вагонов. Новости ж.-д. транспорта / Информационное агентство «РЖД-Партнер». – 2025. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/v-2024-godu-proizvedeno-bolee-21-tys-innovatsionnykh-vagonov/> (дата обращения: 25.01.2025).
- 9 Анализ рынка ж.-д. перевозок. Структура парка полувагонов на сети РЖД. Январь 2022 года // Modum digital. Цифровые решения в логистике. – 2022. – Февраль. – URL: https://modum-digital.ru/upload/pdf/6_%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%20%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BA%D0%B0.pdf?v=1 (дата обращения: 27.01.2025).

References

- 1 Volume of loading of the main types of cargo by rail in 2023 // Federal State Statistics Service. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (date of access: 01/09/2025).
- 2 Ensuring the safety of cargo during rail transportation / edited by V. K. Beshketto. – Novosibirsk : Research Institute of Railway Transport, 1971. – 103 p.
- 3 **Pserovskaya, E. D.** Study of the influence of the surface shape of bulk cargo on blowing during transportation / E. D. Pserovskaya, R. A. Ovchinnikov // Bulletin of the Siberian State Transport University. – 2022. – No. 4 (63). – P. 53–61. – DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_53.
- 4 Ensuring the safety of coal during rail transportation / Novosib. Institute of Railway Transport Engineers, Scientific and Technical Society of Railway Transport ; compiled by : V.K. Beshketto [et al.]. – Moscow : Transport, 1972. – 47 p.
- 5 Vagon.by : Website about the carriage fleet and the carriage facilities. – URL: <https://vagon.by/railcars/list/6> (date of access: 01/10/2025).
- 6 **Glazkova, V. A.** Market of innovative gondola cars : state support, production, tariff policy / V. A. Glazkova, L. A. Magaga // Transport of the Russian Federation. – 2017. – No. 3 (70). – P. 10–15. – ISSN 1994-831X.
- 7 **Fedorovich, V. O.** Modern problems of updating the private fleet of freight cars in the Russian Federation / V. O. Fedorovich, T. V. Fedorovich // Bulletin of Tomsk State University. Economy. – 2019. – No. 45. – P. 88–100. DOI 10.17223/19988648/45/6.
- 8 In 2024, more than 21 thousand innovative cars were produced. Railway Transport News / Information Agency “RZD-Partner”. – 2025. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/v-2024-godu-proizvedeno-bolee-21-tys-innovatsionnykh-vagonov/> (date of access: 01/25/2025).
- 9 Analysis of the railway transportation market. Structure of the open-top car fleet on the Russian Railways network. January 2022 // Modum digital. Digital solutions in logistics. – 2022. – February. – URL: https://modum-digital.ru/upload/pdf/6_%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%20%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BA%D0%B0.pdf?v=1 (date of access: 01/27/2025).

10 СУЭК Хакасия. Структура Компании : Разрез «Черногорский». – URL: <https://www.suek-khakasia.ru/about-us/structure/> (дата обращения: 28.01.2025).

11 ООО «Восточно-Бейский разрез». – URL: <https://ugol-shop.ru/ooo-vostochno-bejskij-razrez-respublika-hakasiya/meshok-uglya-marki-do-koncentrat-25-60mm> (дата обращения: 29.01.2025).

12 Обогащительная фабрика разреза «Степной». АО «Русский уголь». – URL: <https://energybase.ru/coal-processing-plant/plant-open-pit-mine-stepnoy> (дата обращения: 29.01.2025).

13 Разрез «Западный», наша продукция. – URL: <https://www.westcoal.ru/ru/#about> (дата обращения: 29.01.2025).

14 Антрацит, производимый АО «Шахтоуправление «Обуховская». – URL: <https://obuhugol.ru/production/quality/> (дата обращения: 29.01.2025).

15 Псеровская, Е. Д. Моделирование процесса выдувания угля при перевозке в полувагоне / Е. Д. Псеровская, Р. А. Овчинников // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. – 2022. – № 4 (7). – С. 23–29. – DOI 10.52170/2712-9195_2022_4_23.

16 Щапов, В. И. Выдувание угля и рудных концентратов при железнодорожных перевозках / В.И. Щапов, А.Ф. Яшин // Труды НИИЖТа. – 1970. – Вып. 114.

17 Глазунов, Г. П. Математическая модель начала выдувания сухой монодисперсной почвы / Г. П. Глазунов, В. М. Гендугов // Вестник Московского университета. Серия 17 : почвоведение. – 2009. – № 1. – С. 45–50. – ISSN 0137-0944.

10 SUEK Khakassia. Company structure : Open pit "Chernogorsky". – URL: <https://www.suek-khakasia.ru/about-us/structure/> (date of access: 01/28/2025).

11 LLC "East Bay Razrez". – URL: <https://ugol-shop.ru/ooo-vostochno-bejskij-razrez-respublika-hakasiya/meshok-uglya-marki-do-koncentrat-25-60mm> (date of access: 01/29/2025).

12 Processing plant of the "Stepnoy" open-pit mine. JSC "Russian Coal". – URL: <https://energybase.ru/coal-processing-plant/plant-open-pit-mine-stepnoy> (date of access: 01/29/2025).

13 Open-pit mine "Zapadny", our products. – URL: <https://www.westcoal.ru/ru/#about> (date of access: 01/29/2025).

14 Anthracite produced by JSC "Obukhovskaya" Mine Administration. – URL: <https://obuhugol.ru/production/quality/> (date of access: 01/29/2025).

15 Pserovskaya, E. D. Modeling the process of coal blowing during transportation in a gondola car / E. D. Pserovskaya, R. A. Ovchinnikov // Fundamental and Applied Transport Issues. – 2022. – No. 4 (7). – P. 23–29. – DOI 10.52170/2712-9195_2022_4_23.

16 Shchapov, V. I. Blowing of coal and ore concentrates during railway transportation / V. I. Shchapov, A.F. Yashin // Proceedings of the Research Institute of Railway Transport. – 1970. – Issue 114.

17 Glazunov, G. P. Mathematical model of the onset of blowing out of dry monodisperse soil / G. P. Glazunov, V. M. Gendugov // Moscow University Bulletin. Series 17 : Soil Science. – 2009. – No. 1. – P. 45–50. – ISSN 0137-0944.

E. D. Pserovskaya, K. V. Zheldak, R. A. Ovchinnikov

SELECTION ALGORITHM OF ROLLING STOCK FOR FINELY DISPERSED BULK CARGO TRANSPORTATION

Abstract. The article is aimed to the development of measures to reduce losses of bulk cargo due to blow-out during its transportation by open-top cars. The characteristics of the model range of open-top cars in use are analyzed, and the most important ones for organizing the selection of rolling stock, which affect the degree of filling of the body with cargo, are determined. The characteristics of bulk cargo that influence on the loading height into an open-top car are analyzed, and the most significant ones are identified, which determine both the degree of filling of the car body and the configuration of the cargo surface.

An aerodynamic model of the process of blowing out bulk cargo during transportation in open-top cars has been developed using specialized software in the field of Computational fluid dynamics (CFD). Based on the results of the model study, an algorithm has been developed for selecting optimal options for combining the characteristics of open-top cars used for transportation and specific brands and fractions of bulk cargo, which ensures minimization of cargo losses from blowing out.

Keywords: finely dispersed bulk cargo, open-top rolling stock, losses due to blow-out, rolling stock characteristics, coal characteristics, selection algorithm.

For citation: Pserovskaya, E. D. Selection algorithm of rolling stock for finely dispersed bulk cargo transportation / E. D. Pserovskaya, K. V. Zheldak, R. A. Ovchinnikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 94–105. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_1_94.

Сведения об авторах

Псеровская Елена Дмитриевна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
заведующая кафедрой,
e-mail: eldp-55@yandex.ru

Желдак Константин Валентинович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: podviznoy_sostav@mail.ru

Овчинников Роман Андреевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»,
аспирант, преподаватель,
e-mail: roma.r1999@mail.ru

Information about the authors

Pserovskaya Elena Dmitrievna

Siberian State Transport University (STU),
Chair «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of The Chair,
e-mail: eldp-55@yandex.ru

Zheldak Konstantin Valentinovich

Siberian State Transport University (STU),
Chair «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: podviznoy_sostav@mail.ru

Ovchinnikov Roman Andreevich

Siberian State Transport University (STU),
Chair «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock»,
Postgraduate Student, Lecturer,
e-mail: roma.r1999@mail.ru

М. В. Четчуев, А. Н. Иванков, А. Д. Винник

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПУТЕВОГО РАЗВИТИЯ СТАНЦИЙ И ПАРКОВ ДЛЯ ВРЕМЕННОГО ОТСТОЯ ВАГОНОВ

Аннотация. Изложен краткий исторический обзор проблемы непроизводительного простоя вагонов и их избыточного скопления на железнодорожной сети. Сделаны предложения по решению имеющихся в настоящее время проблем скопления вагонов за счет создания специализированных станций и парков для их временного отстоя.

Для станций временного отстоя вагонов сформулированы методические рекомендации к определению количества путей в приемоотправочных парках, проиллюстрированные разработанной в процессе исследования диаграммой для определения коэффициента неравномерности.

Приводятся схемные и технологические решения для новой специализированной станции временного отстоя вагонов, а также для существующей крупной станции при обустройстве на ней парка длительного отстоя вагонов.

Ключевые слова: станции и парки временного отстоя вагонов, технология работы станций временного отстоя вагонов, схемные решения по путевому развитию, коэффициенты неравномерности.

Для цитирования: Четчуев, М. В. Предложения по проектированию путевого развития станций и парков для временного отстоя вагонов / М. В. Четчуев, А. Н. Иванков, А. Д. Винник // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 106–111. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_106.

Проблема необходимости создания специальной инфраструктуры для временного отстоя вагонов на железных дорогах России обозначилась еще в конце XIX века. Вполне логично, что первые мероприятия, направленные на борьбу с избыточным скоплением вагонов в определенных местах железнодорожной сети, имели организационно-технологический характер. В частности, для снижения нагрузки применялись регулировка подвода вагонов к стыковым пунктам, организация работы обезличенным парком, внедрение обменного парка вагонов в речных или морских портах [1]. За счет этих мероприятий в ряде случаев получалось снизить напряженность в эксплуатационной работе на железных дорогах. Вместе с этим перечисленными выше мероприятиями удавалось справляться далеко не со всеми факторами, вызывающими непроизводительный простой вагонов. Одним из таких факторов является объективно существующая неравномерность работы железнодорожного и других видов транспорта, а также взаимодействующих с ними предприятий [2–3]. В условиях воздействия подобных факторов обустройство специальной инфраструктуры (отдельных путей, парков или станций) для временного отстоя вагонов видится наиболее рациональным решением. Это было отмечено еще в середине прошлого века. Например, в изданном в 1945 году учебнике П. В. Бартенева «Железнодорожные станции и узлы» [4] указывалось, что на территории портов и промышленных предприятий могут сооружаться районные парки для отстоя вагонов в ожидании подачи на грузовые фронты. Помимо этого, следует признать, что и реализация технологии работы с обозначенным ранее обменным парком вагонов невозможна в условиях отсутствия на территории порта специальных путей для его отстоя.

Произошедший в результате структурной реформы железнодорожного транспорта России переход от обезличенного вагонного парка к парку вагонов крупных и мелких собственников дополнительно усложнил ситуацию [5–6]. Организационно-технологические мероприятия, обеспеченные наличием обезличенного парка вагонов, перестали работать [7]. Появление ответственности перед собственником вагона за соответствующий непроизводительный простой усложнило взаимодействие, в том числе технологическое, между ОАО «РЖД» и примыкающими к железнодорожной сети предприятиями. Стали возникать ситуации, когда после выгрузки вагона на определенной станции длительное время не было понятно, куда этот вагон поедет дальше.

Проблемами обустройства железнодорожной инфраструктуры для временного отстоя вагонов в современных условиях уже занимались А. Ф. Бородин, Е. А. Сотников, Д. В. Железнов [8–10]. Однако до настоящего времени теоретические основы проектирования путевого развития станций и парков для временного отстоя вагонов в полной мере не выработаны. Наиболее показательным является

формирование теоретических аспектов проектирования железнодорожных станций для решения проблем с избыточным скоплением вагонов в местах их массовой выгрузки, например в морских портах.

Причина появления непроизводительного простоя вагонов в местах массовой выгрузки достаточно проста. Исходя из технологии работы поступивший на железнодорожный путь необщего пользования вагон с грузом после завершения выгрузки, если не предусматриваются двоякие операции, должен быть возвращен на железнодорожную станцию примыкания и оттуда отправлен на другую станцию для последующей погрузки. В условиях частного парка вагонов после завершения выгрузки вагон может быть возвращен с железнодорожного пути необщего пользования на железнодорожную станцию примыкания только при условии его заадресовки на станцию погрузки. Станция заадресовки должна быть определена собственником вагона, и, как ранее было отмечено, данный вопрос может решаться весьма длительное время. До момента, пока собственник не определился со станцией назначения, вагон будет находиться на железнодорожном пути необщего пользования. В условиях массовой выгрузки таких вагонов будет много, и чем дольше собственники будут принимать решение о дальнейшем направлении своих вагонов, тем больше будут забиваться пути на территории предприятия и соответственно снижаться пропускная и перерабатывающая способность железнодорожного пути необщего пользования. Вслед за замедлением, а возможно, и полной остановкой работы железнодорожного пути необщего пользования процессы скопления вагонов цепной реакцией начнутся и на железнодорожной станции примыкания и на подходах к ней.

В случае нахождения поблизости железнодорожной станции временного отстоя вагонов ситуация была бы принципиально другой. Вагоны после выгрузки передавались бы на железнодорожную станцию примыкания, а если к этому моменту собственник не определился, что делать с вагоном, – то направлялись бы на железнодорожную станцию временного отстоя до принятия собственником решения.

В роли станций для временного отстоя вагонов могут выступать:

- станции, предусмотренные непосредственно для временного отстоя вагонов;
- крупные станции (участковые, грузовые, сортировочные и др.), выполняющие определенные функции в работе сети железных дорог, при этом имеющие в своем составе специализированные пути или парки для временного отстоя вагонов.

Первый тип станций по технологии своей работы весьма схож с небольшими сортировочными станциями. Их путевое развитие должно включать в себя по меньшей мере два парка:

- приемоотправочный;
- парк накопления и отстоя вагонов (аналог сортировочного парка).

С позиции экономии территории наиболее рационально параллельное размещение указанных парков, как показано на рис. 1. Однако возможны и другие конфигурации их взаимного расположения.

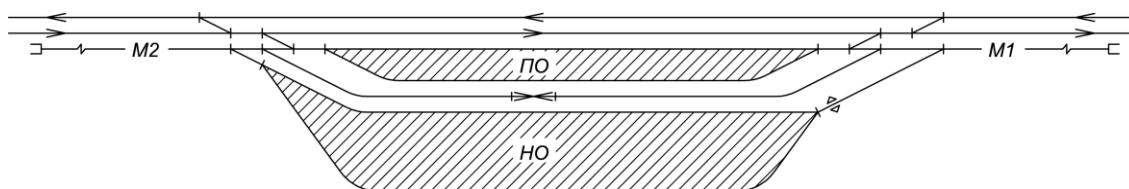


Рис. 1. Схема железнодорожной станции временного отстоя вагонов:
ПО – приемоотправочный парк; *НО* – парк накопления и отстоя вагонов;
M1, M2 – вытяжные пути

Приемоотправочный парк исходя из своего названия предназначен для приема и отправления поездов. Полезную длину путей приемоотправочного парка целесообразно проектировать в соответствии с унифицированной нормой длины поездов на рассматриваемом направлении. Количество путей в приемоотправочном парке следует определять отдельно по приему и отправлению. Для ориентировочных расчетов количество путей в приемоотправочном парке можно определить по формуле:

$$m = k_n \Sigma N \cdot T_{\text{зан}} / (1440 - T_{\text{пер}}),$$

где k_n – коэффициент неравномерности поступления составов с порожними вагонами в отстой (отставление от движения);

N – количество поступающих или отправляющихся поездов/поездов;

$T_{\text{зан}}$ – средневзвешенное время пути одной передачей или одним поездом по прибытии или по отправлении, мин;

$T_{\text{пер}}$ – время перерывов в работе (пересменки), мин;

Величина коэффициента неравномерности k_n прямо пропорциональна длине плеча транспортировки от пункта зарождения вагонопотока до пункта погашения и обратно пропорциональна мощности потока, так как увеличение мощности делает поток более регулярным, снижаются случайные флуктуации. Для определения коэффициента неравномерности разработана диаграмма, представленная на рис. 2.

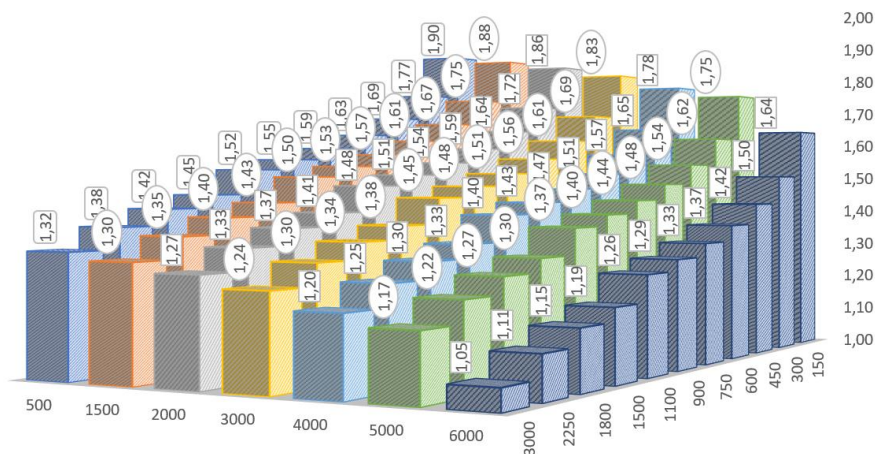


Рис. 2. Изменение коэффициента неравномерности (ось z) в зависимости от мощности потока (ось x) и дальности расположения пунктов зарождения и погашения грузевых вагонопотоков (ось y)

Для расформирования поступивших составов в схеме на рис. 1 предусматривается вытяжной путь $M1$. В зависимости от объема сортировочной работы на станции может быть обустроена сортировочная горка с вагонными замедлителями или без них.

Предусмотренной схемой на рис. 1 вытяжной путь $M2$ предназначен для перестановки сформированных составов из парка HO в парк $ПО$.

Если объем сортировочной работы относительно небольшой и обустройство сортировочной горки для расформирования составов не требуется, перестановка вагонов из парка HO в парк $ПО$ может производиться через вытяжной путь $M1$. В этом случае вытяжной путь $M2$ в составе путевого развития станции не требуется.

Поскольку выполнять всю маневровую работу (включая расформирование составов) на станции временного отстоя вагонов с высокой долей вероятности будет один локомотив, следует предусмотреть ходовой путь для его беспрепятственного перемещения из одной горловины в другую. Этот путь следует размещать между парками $ПО$ и $НО$.

С целью минимизации враждебных пересечений поездных и маневровых маршрутов размещать парки путей станции временного отстоя вагонов целесообразно с одной стороны от главных путей.

Пример схемы крупной железнодорожной станции с парком для временного отстоя вагонов представлен на рис. 3.

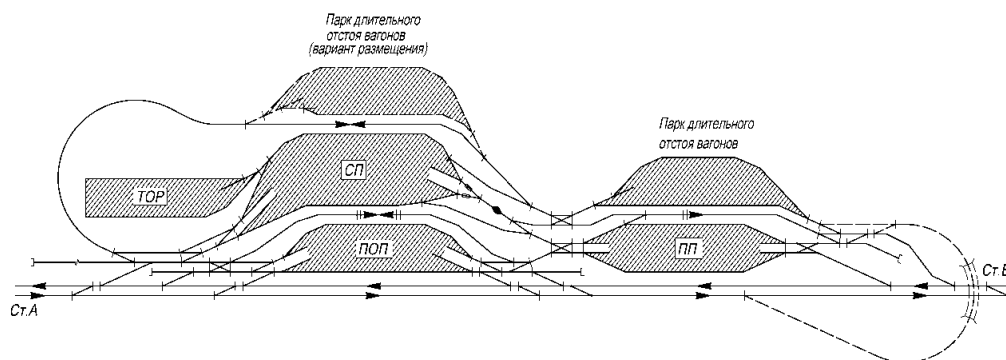


Рис. 3. Схема железнодорожной станции с обустройством парка для временного отстоя вагонов:

$ПОП$ – приемоотправочный парк; $ПП$ – парк приема; $СП$ – сортировочный парк; $ТОР$ – пункт текущего отцепочного ремонта вагонов

В этой схеме предложены два возможных варианта размещения парка для временного отстоя вагонов – параллельно парку приема и параллельно сортировочному парку.

При организации работы по данной схеме предусматривается, что поезда с вагонами для временного отстоя будут поступать в приемоотправочный парк. Далее, без расформирования, через петлевой ход поступившие вагоны будут переставляться маневровым локомотивом в парк для длительного отстоя. При появлении заявок собственников на вагоны их будут вырывать из находящихся на путях парка временного отстоя групп с использованием сортировочной горки. В случае размещения парка временного отстоя вагонов параллельно сортировочному парку группы вагонов нужно будет предварительно переставлять в парк приема. При параллельном размещении парка приема и парка временного отстоя вагоны могут надвигаться на сортировочную горку непосредственно из парка временного отстоя вагонов.

Накопление востребованных вагонов до формирования поездов предусматривается на путях сортировочного парка. Выработанные в процессе роспуска невостребованные вагоны будут возвращаться маневровым локомотивом из сортировочного парка в парк временного отстоя вагонов.

Изложенные в настоящей статье предложения и теоретические основы проектирования путевого развития парков и станций для временного отстоя вагонов в последующем могут быть использованы при формировании соответствующих типовых решений и требований нормативных документов.

Список литературы

- 1 **Четчуев, М. В.** Исследование подходов к обустройству инфраструктуры для временного отстоя вагонов на железных дорогах России в различные исторические периоды / М. В. Четчуев, А. Н. Иванков, А. Д. Винник // Бюллетень результатов научных исследований. – 2024. – № 3. – С. 128–141. – DOI 10.20295/2223-9987-2024-03-128-141.
- 2 **Четчуев, М. В.** Методика учета неравномерности объема перевозок при разработке единого технологического процесса работы станции приямки и пути необщего пользования / М. В. Четчуев // Б. П. Бещев. Выдающийся выпускник, великий железнодорожник. К 115-летию со дня рождения : материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 28–29 ноября 2018 года. – Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО РГУПС, 2019. – С. 112–115. – ISBN 978-5-7641-1395-1.
- 3 **Буракова, А. В.** Анализ методов снижения неравномерности перевозочного процесса / А. В. Буракова // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 11. – С. 37–39. – ISSN 0044-4448.
- 4 **Бартенев, П. В.** Железнодорожные станции и узлы : учебник для вузов железнодорожного транспорта / П. В. Бартенев. – Москва : Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1945. – 601 с.
- 5 **Кудрявцев, В. А.** Централизация управления вагонным парком как ключевое условие эффективности перевозок / В. А. Кудрявцев // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 3. – С. 28–31. – ISSN 1994-831X.
- 6 **Семёнкин, Д.** Реформа РЖД : Возвращаться ли к обезличенному парку / Д. Семёнкин // Ведомо-

References

- 1 **Chetchuev, M. V.** Study of approaches to arranging infrastructure for temporary storage of cars on Russian railways in various historical periods / M. V. Chetchuev, A. N. Ivankov, A. D. Vinnik // Bulletin of Scientific Research Results. – 2024. – No. 3. – P. 128–141. – DOI 10.20295/2223-9987-2024-03-128-141.
- 2 **Chetchuev, M. V.** A methodology for taking into account the uneven volume of traffic when developing a unified technological process for the operation of a junction station and a non-public track / M. V. Chetchuev // B. P. Beshchev. An outstanding graduate, a great railway worker. To the 115th anniversary of his birth : proceedings of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 28–29, 2018. – Saint Petersburg : PSTU, 2019. – P. 112–115. – ISBN 978-5-7641-1395-1.
- 3 **Burakova, A. V.** Analysis of methods for reducing the unevenness of the transportation process / A. V. Burakova // Railway Transport. – 2011. – No. 11. – P. 37–39. – ISSN 0044-4448.
- 4 **Bartenev, P. V.** Railway stations and junctions : a textbook for universities of railway transport / P. V. Bartenev. – Moscow : State Transport Railway Publishing House, 1945. – 601 p.
- 5 **Kudryavtsev, V. A.** Centralization of car fleet management as a key condition for the efficiency of transportation / V. A. Kudryavtsev // Transport of the Russian Federation. – 2011. – No. 3. – P. 28–31. – ISSN 1994-831X.
- 6 **Semyonkin, D.** Reform of Russian Railways : Should we return to an impersonal park / D. Semyonkin // Vedomosti : [website]. – 04/18/2012. –

сти : [сайт]. – 18.04.2012. – URL: https://www.vedomosti.ru/newspaper/articles/2012/04/18/vozvrashchatsya_li_k_obezhennomu_parku (дата обращения: 24.01.2025).

7 **Хусаинов, Ф.** Управление вагонными парками : грядет революция / Ф. Хусаинов // РЖД-партнер. – 2010. – № 20. – С. 32–34. – ISSN 1607-3290.

8 **Бородин, А.** Емкость железных дорог и управление вагонными парками / А. Бородин // РЖД-партнер. – 2011. – № 5. – С. 32–34. – ISSN 1607-3290.

9 **Бородин, А. Ф.** Рациональное соотношение вместимости путей станций и вагонных парков с учетом увеличения доли частных вагонов / А. Ф. Бородин, Е. А. Сотников // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 3. – С. 8–19. – ISSN 0044-4448.

10 **Железнов, Д. В.** Создание станций, специализированных для массового отстоя и подготовки вагонов, как основной путь повышения качества эксплуатационной работы полигонов в условиях обращения избыточного парка и ограничений пропускной способности / Д. В. Железнов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 3. – С. 78–87. – ISSN 0201-727X.

URL: https://www.vedomosti.ru/newspaper/articles/2012/04/18/vozvrashchatsya_li_k_obezhennomu_parku (date of access: 01/24/2025).

7 **Khusainov, F.** Wagon Fleet Management: a revolution is coming / F. Khusainov // The RZD-Partner. – 2010. – No. 20. – P. 32–34. – ISSN 1607-3290.

8 **Borodin, A.** Capacity of railways and management of car parks / A. Borodin // The RZD-Partner. – 2011. – No. 5. – P. 32–34. – ISSN 1607-3290.

9 **Borodin, A.F.** Rational ratio of station track capacity and car parks, taking into account the increase in the share of private cars / A. F. Borodin, E. A. Sotnikov // The Railway Transport. – 2011. – No. 3. – P. 8–19. – ISSN 0044-4448.

10 **Zheleznov, D. V.** The creation of stations specialized for mass storage and preparation of wagons as the main way to improve the quality of operational work of landfills in the conditions of handling excess stock and capacity limitations / D. V. Zheleznov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2012. – No. 3. – P. 78–87. – ISSN 0201-727X.

M. V. Chetchuev, A. N. Ivankov, A. D. Vinnik

PROPOSALS FOR DESIGNING TRACK DEVELOPMENT OF STATIONS AND FLEETS FOR TEMPORARY WAGON STORAGE

Abstract. A brief historical overview of the problem of unproductive detention of cars and their excessive accumulation on the railway network is presented. Proposals have been made to solve the current problems of wagon accumulation through the creation of specialized stations and fleets for their temporary storage.

For stations for temporary wagon storage, methodological recommendations are formulated for determining the number of tracks in receiving and dispatching parks, illustrated by a diagram developed during the study for determining the coefficient of unevenness.

Circuit and technological solutions are presented for a new specialized station for temporary wagon storage, as well as for an existing large station when arranging a fleet of long-term storage of cars on it.

Keywords: stations and depots for temporary storage of wagons, technology of operation of temporary storage stations for wagons, circuit design for track development, unevenness coefficients.

For citation: Chetchuev, M. V. Proposals for designing track development of stations and fleets for temporary wagon storage / M. V. Chetchuev, A. N. Ivankov, A. D. Vinnik // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 106–111. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_106.

Сведения об авторах

Четчуев Максим Владимирович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),

Information about the authors

Chetchuev Maksim Vladimirovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), Chair “Railway Stations and Junctions”,

кафедра «Железнодорожные станции и узлы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: mts@pgups.ru

Иванков Алексей Николаевич

Общество с ограниченной ответственностью
«ПСК ТехПроект» (ООО «ПСК ТехПроект»),
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: aivankov@yandex.ru

Винник Андрей Дмитриевич

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I
(ПГУПС),
кафедра «Железнодорожные станции и узлы»,
аспирант,
e-mail: geforcepio@gmail.com

Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: mts@pgups.ru

Ivankov Alexey Nikolaevich

Limited Liability Company “PSK TekhProekt”
(LLC “PSK TekhProekt”),
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: aivankov@yandex.ru

Vinnik Andrey Dmitrievich

Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University (PSTU),
Chair “Railway Stations and Junctions”,
Postgraduate Student,
e-mail: geforcepio@gmail.com

И. В. Юргин

О ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТЕЙНЕРОВ-ТРАНСФОРМЕРОВ

Аннотация. Рассматривается подход к оценке достоверности имитационной модели доставки грузов, который базируется на учете местоположения агентов, осуществляющих технологические операции в процессе транспортировки. Особое внимание уделяется реперным точкам, таким как погрузка и разгрузка контейнеров, а также этапам складывания и раскладывания контейнера-трансформера. Точное определение параметров этих процессов позволяет более достоверно отражать реальную динамику работы системы, учитывая взаимодействие различных участников логистической цепи.

Это дает возможность проводить эксперименты с значительно меньшим уровнем капитальных вложений, а также более гибко настраивать изучаемые системы. В статье определен уровень достоверности компьютерной имитационной модели доставки грузов в урбанизированной среде, созданный в программном комплексе Anylogic.

Ключевые слова: цифровое мобильное устройство, контейнер-трансформер, доставка, моделирование, эксперимент, реальные условия.

Для цитирования: Юргин, И. В. О подходе к оценке достоверности имитационной модели доставки грузов с использованием контейнеров-трансформеров / И. В. Юргин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025 – № 1. – С. 112–120. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_112.

Введение

В условиях отсутствия технических, технологических, капитальных и иных средств для анализа транспортного процесса перевозок грузов с использованием контейнеров-трансформеров, актуальными становятся альтернативные подходы к изучению особенностей работы систем доставки грузов. Подобные способы исследования обладают определенными преимуществами, в числе которых низкие затраты на проведение эксперимента, возможность проведения повторных экспериментов в идентичных условиях, высокий уровень контроля параметров моделирования. Тем не менее качество модели и уровень абстракции имеют существенное влияние на конечный результат. Проведение эксперимента с использованием компьютерных моделей в сфере транспорта требует определения уровня достоверности исследований. Результаты, полученные в ходе определения уровня достоверности, служат основой для корректировок модели, определения уровня качества модели.

Проведение эксперимента в реальных условиях в сфере транспорта имеет определенные сложности, связанные с большим количеством параметров, влияющих на процесс эксплуатации, высокой сложностью учёта данных, времени, местоположения и особенностей организационно-производственных условий. Только комплексное исследование, объединяющее результаты компьютерного моделирования с результатами экспериментов в реальных условиях, может обладать достаточной степенью достоверности, приносить практическую пользу.

Необходимо отметить, что использование мобильного имитатора в контексте осуществления перевозок грузов даёт возможность моделировать процессы погрузки, разгрузки, складывания и раскладывания контейнера-трансформера только с помощью задержек, создаваемых системой. В данном контексте важным является проведение анализа закономерностей распределения параметров этих процессов.

Цель

Анализ подхода определения степени достоверности модифицированной имитационной модели доставки грузов с использованием контейнера-трансформера в урбанизированной среде с помощью цифрового мобильного устройства с установленным на нём имитатором контейнера-трансформера, учитывающего особенности технологического процесса в реперных точках.

Основная часть

В работах [1–6] описана модифицированная имитационная модель доставки груза в урбанизированной среде с использованием контейнера-трансформера, которая учитывает положение контейне-

ров-трансформеров в любой момент времени, технологию мобильного склада и возможность трансформации контейнера-трансформера, описанную в патенте [7].

Основными данными, получаемыми с помощью использования данной модели, являются время осуществления заказа на перевозку, время подачи сложенного контейнера, коэффициент использования транспортных средств, себестоимость перевозок, производительность системы доставки грузов.

Полноценный эксперимент с использованием десятков контейнеров-трансформеров и автомобилей-манипуляторов, проводимый в реальных условиях эксплуатации на данном этапе исследований невозможен, так как требует значительных затрат на создание контейнеров-трансформеров, приобретение требуемого числа транспортных средств, обучение обслуживающего персонала.

В связи с вышеперечисленными факторами определение степени достоверности модифицированной имитационной модели доставки грузов с использованием контейнера-трансформера в урбанизированной среде с помощью цифрового мобильного устройства с установленным на нём имитатором является предпочтительным вариантом.

Имитатор – это приложение, устанавливаемое на цифровое мобильное устройство, выполняющее функции, моделирующие поведение реального объекта. Было выделено три основные функции, осуществление которых должно производиться через имитатор:

1 Имитатор водителя, с помощью которого осуществляется получение заказов на перевозку груза, перемещение контейнеров-трансформеров, сбор параметров использования технологии;

2 Имитатор клиента, с помощью которого осуществляется внесение сведений о заказах в систему, работа с созданными заказами на перевозку грузов;

3 Имитатор контейнера-трансформера, который воспроизводит основные функциональные характеристики и параметры реального контейнера-трансформера, в том числе процесс его трансформации, особенности погрузочно-разгрузочных операций, а также взаимодействие с инфраструктурой грузоперевозок и другими транспортными средствами.

Таким образом, использование имитатора, установленного на мобильном цифровом устройстве, позволяет осуществлять моделирование процессов, возникающих в ходе перевозки грузов с использованием контейнера-трансформера. Имитатор учитывает местоположение и позволяет осуществлять эксперимент в реальных условиях.



Рис. 1. Экспериментальное определение параметров работы системы доставки грузов

Методика экспериментального определения параметров работы системы доставки грузов с использованием контейнера трансформера в урбанизированной среде с использованием цифровых мобильных имитаторов, представленная на рис. 1, включает в себя следующие этапы:

1) разработка модели имитатора. На основе характеристик контейнера-трансформера и предполагаемого алгоритма функционирования системы доставки грузов разрабатывается цифровой мобильный имитатор, учитывающий основные параметры функционирования системы, а также параметры функционирования контейнера-трансформера;

2) создание сценариев работы системы доставки. Определяется последовательность действий

и субъекты, которые эти действия выполняют. Например, алгоритм доставки груза начинается с создания в системе заказа на перевозку, который оформляет клиент, лишь потом он попадает водителю и затем осуществляется работа с контейнером-трансформером с помощью цифрового мобильного устройства с установленным на нём имитатором контейнера-трансформера;

3) проведение эксперимента. С помощью созданных имитаторов на цифровых мобильных устройствах осуществляется моделирование работы в реальных условиях с учётом систем геопозиционирования;

4) сбор и анализ данных. Полученные в ходе моделирования данные о времени осуществления заказа на перевозку, времени осуществления основных этапов, сопутствующих перевозке груза, собираются и служат основой для определения достоверности разработанной ранее компьютерной имитационной модели;

5) валидация результатов. Определение достоверности компьютерной имитационной модели. Производится сравнение полученных параметров работы системы в реальной среде с параметрами, полученными в ходе работы системы в виртуальной среде.

Для полноценного отражения процессов, связанных с доставкой грузов с использованием контейнеров-трансформеров в урбанизированной среде, мобильный цифровой имитатор состоит из трех компонентов, каждый из которых выполняет уникальные функции. Это – имитатор водителя, имитатор клиента и имитатор контейнера-трансформера. Каждый из этих элементов обеспечивает воспроизведение определенных аспектов реальной системы доставки, позволяя моделировать ее работу целиком.

К функциям, которые выполняет имитатор водителя, относятся:

– получение заказа на перевозку груза с учётом количества контейнеров-трансформеров, которые находятся на автомобиле;

– учет местоположения. Учёт местоположения водителя, которые используются для определения ближайшего транспортного средства, способного осуществить перевозку;

– управление статусами заказа на перевозку грузов.

К функциям, которые выполняет имитатор клиента, относятся:

– создание заказа. Создание заказа на перевозку груза с использованием контейнера-трансформера с указанием необходимых параметров груза;

– управление статусами заказа. Имитатор клиента позволяет отслеживать статусы своих заказов.

С помощью имитатора контейнера-трансформера проводится моделирование процесса складывания и раскладывания контейнера. Также он содержит инструкцию по работе с контейнером-трансформером. Его основные функции:

– моделирование процессов складывания и раскладывания. Имитатор воспроизводит процедуры изменения конфигурации контейнера, что позволяет имитировать динамическое управление грузом в зависимости от требований клиента;

– инструкции по работе с контейнером. Имитатор включает в себя базу данных с рекомендациями и инструкциями по правильной эксплуатации контейнера-трансформера.

Методика проведения эксперимента в реальных условиях включает в себя следующие этапы:

1) определение требуемого количества транспортных средств и клиентов для проведения эксперимента;

2) определение временного диапазона исследования;

3) установка программы имитатора для цифровых мобильных устройств в смартфоны участников эксперимента;

4) перемещение участников в точки старта. Для водителей транспортных средств – в точки склада контейнеров-трансформеров, а для клиентов – в точки, распределенные в рамках урбанизированной среды;

5) осуществление действий по оформлению и выполнению заказов с учетом специфики доставки груза с использованием контейнеров-трансформеров;

6) сбор и обработка полученных данных [8, 9].

Ключевым фактором, влияющим на степень достоверности разработанной системы, является учет фактических параметров времени, затрачиваемого агентами в реперных точках процесса. В контексте описываемого способа доставки грузов это время погрузки, время разгрузки, время складывания и раскладывания контейнера-трансформера.

Время погрузочно-разгрузочных операций в системе малотоннажных перевозок грузов может находиться в широком диапазоне. Множество факторов влияют на длительность погрузочно-разгрузочных операций, в том числе характеристики и объем груза, оборудование для выполнения операций,

а также квалификация агентов, осуществляющих операции. Сложность операций может варьироваться в зависимости от специфики груза и условий работы [10].

Межотраслевые нормы времени на погрузку, разгрузку вагонов, автотранспорта и складские работы устанавливают нормы времени на погрузочно-разгрузочные работы, выполняемые вручную без применения или с применением простейших приспособлений, к которым относят тележки, тачки и др. Нормы времени на погрузку или выгрузку, определяемые документом находятся в диапазоне от 0,29 чел.-ч. до 0,824 чел.-ч.

Существующие исследования времени простоя при погрузочно-разгрузочных работах на автомобильном транспорте определяют время в интервале от 20 до 60 минут для транспортного средства грузоподъемностью 23 тонны. Для грузоподъемности 5 тонн время простоя при погрузочно-разгрузочных работах находится в диапазоне от 5 до 12 минут. При этом величина времени простоя под погрузкой-выгрузкой подчиняется нормальному закону распределения, среднеквадратическое отклонение 3 минуты [11–12].

Таким образом, в имитаторы интегрировано значение погрузочно-разгрузочных работ, соответствующее данным показателям межотраслевых норм с учетом нормального закона распределения и среднеквадратическим отклонением 3 минуты.

Параметры времени задержки, связанные с процессом складывания и раскладывания контейнера-трансформера, полученные с помощью испытаний опытного образца контейнера-трансформера и определенные в программе испытаний, составляют 5 минут [1].

Эксперимент по оценке достоверности системы доставки грузов с помощью контейнеров-трансформеров проводился с 9:00 до 17:00 на улично-дорожной сети города Ростов-на-Дону. В эксперименте приняло участие 30 агентов логистической цепи, разделенных на две группы. Группа водителей (10 агентов логистической цепи), которая выполняла функции перевозки грузов в контейнерах-трансформерах, принимая заказы и осуществляя доставку. Группа клиентов (20 агентов логистической цепи), которая создавала заказы на перевозку грузов с указанием необходимых параметров (местоположение отправителя и получателя, тип и объем груза).

Результаты представлены в табл. 1–3 и на рис. 2–4.

Таблица 1

Результаты эксперимента (коэф исп во времени)

Кол-во ТС	Коэф. исп. во времени имитационной модели	Коэф. исп. во времени имитатора
6	0,63	0,58
7	0,52	0,5
8	0,45	0,46
9	0,4	0,41
10	0,37	0,39
11	0,3	0,34
12	0,29	0,31
13	0,27	0,29

Таблица 2

Результаты эксперимента (ср время выполнения)

Кол-во ТС	Ср. время выполнения заявки имитационной модели	Ср. время выполнения заявки имитатора
6	271	265
7	275	258
8	263	280
9	240	264
10	227	247
11	226	230
12	226	242
13	226	237

Таблица 3

Результаты эксперимента (производительность ТС)

Кол-во ТС	Производительность ТС имитационной модели	Производительность ТС имитатора
6	5,67	5,67
7	4,71	4,71
8	4,25	4,25
9	3,78	4,25
10	3	3,78
11	3,09	3
12	2,83	3,09
13	2,62	2,62

В эксперименте использовалось 40 контейнеров-трансформеров. В результате эксперимента было выполнено 34 заказа. Достоверность модели, на основе которой проводилось моделирование, составила не менее 90 %. Суть работы заключалась во взаимодействии двух групп участников: водители принимали и выполняли заказы, создаваемые клиентами, моделируя реальные процессы доставки грузов с использованием контейнеров-трансформеров в условиях городской среды.

Сравнение коэф. использования транспортных средств по времени от их количества имитатора и имитационной модели

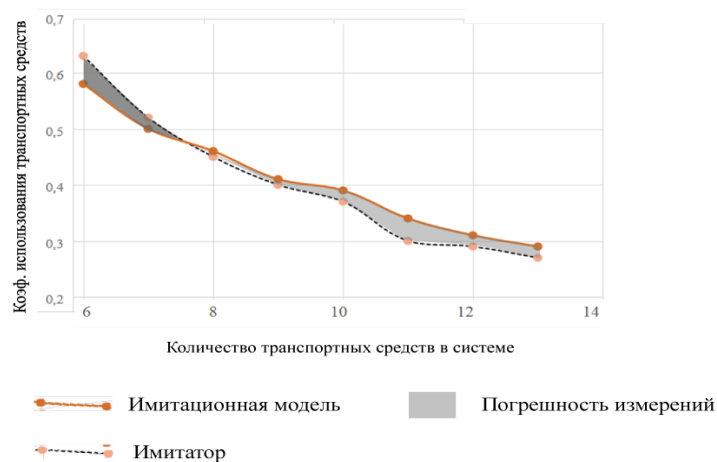


Рис. 2. Сравнение коэффициента использования транспортных средств

Сравнение среднего времени выполнения заявок имитатора и имитационной модели



Рис. 3. Сравнение среднего времени выполнения заявок

Сравнение производительности имитатора и имитационной модели

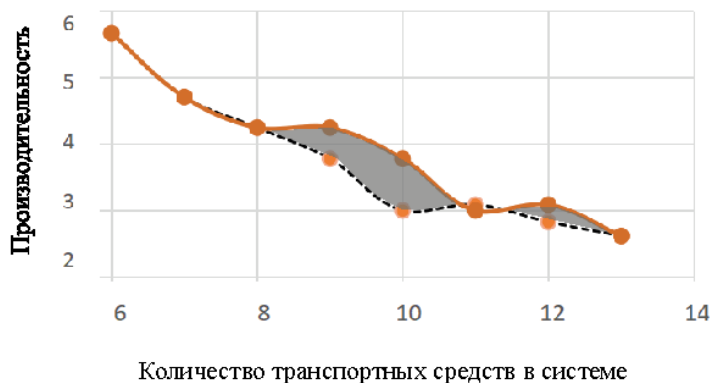


Рис. 4. Сравнение производительности

Достоверность определялась отношением результатов работы имитаторов к результатам работы имитационной модели по формулам 1, 2.

$$\varepsilon = \frac{|\Delta\alpha - \alpha|}{\alpha} \cdot 100, \quad (1)$$

где α – результаты работы имитаторов;
 $\Delta\alpha$ – результаты работы имитационной модели.

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{|271 - 265|}{265} \cdot 100 = 97,7 \% \\ \varepsilon_2 &= \frac{|275 - 258|}{258} \cdot 100 = 93,4 \% \\ \varepsilon_3 &= \frac{|263 - 280|}{280} \cdot 100 = 93,9 \% \\ \varepsilon_4 &= \frac{|240 - 264|}{264} \cdot 100 = 90,9 \% \\ \varepsilon_5 &= \frac{|227 - 247|}{247} \cdot 100 = 91,9 \% \\ \varepsilon_6 &= \frac{|226 - 230|}{230} \cdot 100 = 98,3 \% \\ \varepsilon_7 &= \frac{|226 - 242|}{242} \cdot 100 = 93,4 \% \\ \varepsilon_8 &= \frac{|226 - 237|}{237} \cdot 100 = 95,4 \% \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{\text{ср.вр.выполн.заявок}} = \frac{\sum_1^n \varepsilon}{n}, \quad (2)$$

где ε – степень соответствия результата имитационной модели натурному эксперименту, %;
 n – количество экспериментов.

$$\varepsilon_{\text{ср.вр.выполн.заявок}} = \frac{754,9}{8} = 94,4 \%$$

Выводы

Таким образом, полученные в результате компьютерного имитационного моделирования данные могут быть проверены в реальных условиях эксплуатации. Показатели, полученные в ходе эксперимента, являются индикатором достоверности модели, степени ее соответствия объективным данным. В случае, если уровень достоверности недостаточно высок, в работе могут быть использованы

дополнительные корректировочные коэффициенты. Предложенный способ проверки достоверности разработанной системы обладает важным качеством, которое делает его предпочтительным, – это высокий уровень контроля технико-эксплуатационных показателей работы системы при низких затратах на капитальные ресурсы [10].

Список литературы

- 1 Использование технологии контейнера-трансформера в урбанизированной среде / И. В. Юргин, Э. А. Панфилова, А. А. Поляков, Л. А. Терновской // Транспорт и логистика : Развитие в условиях глобальных изменений потоков : Сборник научных трудов VII международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–02 февраля 2023 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 448–451. – ISBN 978-5-907295-82-7.
- 2 Юргин, И. В. Применение мультиагентного моделирования доставки грузов с использованием контейнеров-трансформеров / И. В. Юргин, А. А. Короткий // Мир транспорта и технологических машин. – 2021. – № 3 (74). – С. 115–122. – DOI 10.33979/2073-7432-2021-74-3-115-122.
- 3 Юргин, И. В. Использование программы ANYLOGIC для моделирования процессов с использованием контейнеров-трансформеров / И. В. Юргин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2024. – № 2. – С. 140–149. – DOI 10.22281/2413-9920-2024-10-02-140-149.
- 4 Гальченко, Г. А. Применение «умных» решений с использованием инструментария логистики для перевозочных процессов / Г. А. Гальченко, А. А. Короткий, И. В. Юргин // Информационные системы и технологии. – 2020. – № 5 (121). – С. 50–57. – ISSN 2072-8964.
- 5 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618471 Российская Федерация. Программа по автоматическому определению технико-эксплуатационных характеристик системы доставки грузов с использованием контейнеров-трансформеров / А. А. Короткий, И. В. Юргин. – № 2024616734 : заявл. 02.04.2024 : опубл. 12.04.2024.
- 6 Юргин, И. В. Организация станций контейнеров при разработке системы шеринга контейнеров / И. В. Юргин, А. А. Короткий // Транспорт : наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2023. – № 2. – С. 34–39. – DOI 10.36535/0236-1914-2023-02-6.

References

- 1 Use of transformable container technology in an urban environment / I. V. Yurgin, E. A. Panfilova, A. A. Polyakov, L. A. Ternovskoy // Transport and logistics : Development in the context of global changes in flows : Collection of scientific papers of the VII international scientific and practical conference, Rostov-on-Don, February 1–2, 2023. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2023. – P. 448–451. – ISBN 978-5-907295-82-7.
- 2 Yurgin, I. V. Application of multi-agent modeling of cargo delivery using transforming containers / I. V. Yurgin, A. A. Korotkiy // World of transport and technological machines. – 2021. – No. 3 (74). – P. 115–122. – DOI 10.33979/2073-7432-2021-74-3-115-122.
- 3 Yurgin, I. V. Using the ANYLOGIC program to model processes using transforming containers / I. V. Yurgin // Scientific and technical journal of Bryansk State University. – 2024. – No. 2. – P. 140–149. – DOI 10.22281/2413-9920-2024-10-02-140-149.
- 4 Galchenko, G. A. Application of "smart" solutions using logistics tools for transportation processes / G. A. Galchenko, A. A. Korotkiy, I. V. Yurgin // Information systems and technologies. – 2020. – No. 5 (121). – P. 50–57. – ISSN 2072-8964.
- 5 Certificate of state registration of computer program No. 2024618471 Russian Federation. Program for automatic determination of technical and operational characteristics of a cargo delivery system using transformable containers / A. A. Korotkiy, I. V. Yurgin. – No. 2024616734 : declared. 02.04.2024 : published. 12.04.2024.
- 6 Yurgin, I. V. Organization of container stations in the development of a container sharing system / I. V. Yurgin, A. A. Korotkiy // Transport : science, technology, management. Scientific information collection. – 2023. – No. 2. – P. 34–39. – DOI 10.36535/0236-1914-2023-02-6.

7 Патент № 2788837 С1 Российская Федерация, МПК В65D 88/52, В65D 90/48. Контейнер-трансформер / А. А. Короткий, А. В. Панфилов, Э. А. Панфилова, И. В. Юргин. – № 2022122502 ; заявл. 19.08.2022 ; опублик. 24.01.2023, Бюл. № 3. – 21 с.

8 **Моргачев, К. В.** Программное обеспечение автоматизации испытаний / К. В. Моргачев // Нейрокомпьютеры и их применение : XVII Всероссийская научная конференция. Тезисы докладов, Москва, 19 марта 2019 года. – Москва : Московский государственный психолого-педагогический университет, 2019. – С. 343–344.

9 Моделирование информационного обеспечения для оптимизации логистических задач в сфере транспорта с использованием программируемого имитатора контейнер-трансформера / А. А. Короткий, А. А. Масленников, Д. А. Яковлева, И. В. Головки // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 311–316. – DOI 10.23947/2687-1653-2020-20-3-311-316.

10 Проведение испытаний контейнеров // Использование подъемно-транспортного оборудования и транспортных средств для обработки крупнотоннажных контейнеров – Санкт-Петербург : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2022. – С. 69–72. – ISBN 978-5-9509-0468-4.

11 **Вахрушев, С. А.** Определение времени простоя при погрузке и выгрузке подвижного состава грузового автомобильного транспорта в суровых условиях Крайнего Севера / С. А. Вахрушев, Л. С. Трофимова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 24–25 ноября 2022 года. – Омск : СибАДИ, 2022. – С. 193–196.

12 **Витвицкий, Е. Е.** Зависимость выработки автомобиля от времени простоя под погрузкой-выгрузкой в простой автотранспортной системе перевозок грузов мелкими отправлениями / Е. Е. Витвицкий // Автомобильные перевозки и транспортная логистика : теория и практика : Сборник научных трудов кафедры «Организация перевозок и управле-

7 Patent No. 2788837 C1 Russian Federation, IPC B65D 88/52, B65D 90/48. Transformer container / A. A. Korotkiy, A. V. Panfilov, E. A. Panfilova, I. V. Yurgin. – No. 2022122502 ; declared 19.08.2022 ; published 24.01.2023, Bulletin No. 3.– 21 p.

8 **Morgachev, K. V.** Software for test automation / K. V. Morgachev // Neurocomputers and their application : XVII All-Russian scientific conference. Abstracts of reports, Moscow, March 19, 2019. – Moscow : Moscow State University of Psychology and Education, 2019. – P. 343–344.

9 Modeling of information support for optimization of logistics tasks in the field of transport using a programmable simulator of a transforming container / A. A. Korotkiy, A. A. Maslennikov, D. A. Yakovleva, I. V. Golovko // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2020. – Vol. 20, No. 3. – P. 311–316. – DOI 10.23947/2687-1653-2020-20-3-311-316.

10 Conducting container testing // Use of lifting and transport equipment and vehicles for handling large-capacity containers – Saint Petersburg : Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2022 – P. 69–72. – ISBN 978-5-9509-0468-4.

11 **Vakhrushev, S. A.** Determination of downtime during loading and unloading of rolling stock of freight road transport in the harsh conditions of the Far North / S. A. Vakhrushev, L. S. Trofimova // Architectural, construction and road transport complexes : problems, prospects, innovations : Collection of materials of the VII International scientific and practical conference dedicated to the Decade of Science and Technology in the Russian Federation, Omsk, November 24–25, 2022. – Omsk : SibADI, 2022. – P. 193–196.

12 **Vitvitsky, E. E.** Dependence of vehicle performance on downtime during loading and unloading in a simple motor transport system for small-lot cargo transportation / E. E. Vitvitsky // Automobile transportation and transport logistics : theory and practice : Collection of scientific papers of the department “Organization of transportation and management in transport”

ние на транспорте» (с международным участием) / Под научной редакцией Е. Е. Витвицкого. – Омск : СибАДИ, 2021. – С. 13–23.

(with international participation) / Under the scientific editorship of E. E. Vitvitsky. – Omsk : SibADI, 2021. – P. 13–23.

I. V. Yurgin

ABOUT AN APPROACH TO ASSESSING THE RELIABILITY OF A SIMULATION MODEL OF CARGO DELIVERY USING TRANSFORMER CONTAINERS

Abstract. This article considers an approach to assessing the reliability of a simulation model of cargo delivery based on taking into account the location of agents performing technological operations during transportation. Particular attention is paid to reference points such as container loading and unloading, as well as the stages of folding and unfolding a transformable container. Accurately determining the parameters of these processes allows for a more reliable reflection of the real dynamics of the system, taking into account the interaction of various participants in the logistics chain. This makes it possible to conduct experiments with a significantly lower level of capital investment, as well as more flexibly configure the systems being studied. The article determines the level of reliability of a computer simulation model of cargo delivery in an urbanized environment, created in the Anylogic software package.

Keywords: digital mobile device, transforming container, delivery, modeling, experiment, real conditions.

For citation: Yurgin, I. V. About an approach to assessing the reliability of a simulation model of cargo delivery using transformer containers / I. V. Yurgin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 112–120. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_112.

Сведения об авторах

Юргин Иван Владимирович

Донской государственный технический университет (ДГТУ),
кафедра «Эксплуатация транспортных систем и логистика»,
ассистент,
e-mail: cent96v@yandex.ru

Information about the authors

Yurgin Ivan Vladimirovich

Don State Technical University (DSTU),
Chair “Operation of Transport Systems
and Logistics”,
Assistant,
e-mail: cent96v@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 629.423

DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_121

*А. А. Будаев, Е. А. Третьяков***КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ
ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА**

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования возможных неисправностей в электрической части электровоза на основе технологии цифрового двойника с использованием программного обеспечения *Matlab Simulink*. Для апробации разработанного цифрового двойника электрической части электровоза 2ЭС6 выполнена валидация компьютерной модели на основе ретроспективных данных, измеренных с помощью бортового регистратора параметров движения и автоведения (РПДА). Результаты исследований могут использоваться для машинного обучения модели прогнозирования состояния электроподвижного состава, а именно с целью генерирования набора данных с различными параметрами движения электровоза ввиду малого количества записей реальных поездок с РПДА. Перспективы практического применения полученных результатов связаны с разрабатываемой системой прескриптивного мониторинга и диагностики для автоматического предотвращения неисправностей электроподвижного состава в пути следования.

Ключевые слова: цифровой двойник, электроподвижной состав, имитационная модель, прогнозирование, моделирование, машинное обучение.

Для цитирования: Будаев, А. А. Компьютерное моделирование возможных неисправностей в электрической части электровоза на основе технологии цифрового двойника / А. А. Будаев, Е. А. Третьяков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 121–132. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_121.

Введение и постановка задачи

Согласно паспорту комплексной программы инновационного развития холдинга ОАО «РЖД», на период до 2025 г. к реализации запланированы проекты, направленные на создание интеллектуальных систем управления электроподвижным составом, а также цифровых двойников для предиктивного прогнозирования технического состояния подвижного состава [1]. Как известно, цифровой двойник представляет собой виртуальную модель реального физического объекта, системы или процесса и двусторонних связей, которая может использоваться для моделирования, прогнозирования, тестирования, мониторинга, технического обслуживания и др. Взаимодействие двойника с реальным объектом осуществляется с помощью разнообразных датчиков, систем мониторинга и управления [2–4]. Для предотвращения непредвиденных событий с помощью цифрового двойника можно прогнозировать сбои или аварийные ситуации, а также оказывать поддержку и предлагать возможные действия. Представленные возможности реализации цифрового двойника в рассматриваемом контексте существенно шире текущей предиктивной диагностики электроподвижного состава.

В последние годы в ОАО «РЖД» наблюдается стремительный переход от аналоговых технологий к цифровым, что ведет к развитию методов и способов регистрации, обработки и хранения данных бортовых измерительных систем и информационных связей электроподвижного состава в эксплуатации на весь период его жизненного цикла, а также позволяет создать цифровой двойник магистрального электровоза применительно к исследуемым его частям и процессам.

В настоящее время наблюдается большой интерес отечественных и зарубежных исследователей к вопросам внедрения и использования технологии цифрового двойника на электроподвижном составе. В работах Э. Бернала, Э. Крама, С. Сарпа, А. Альхариса и др. [5–8] представлены функциональные схемы, описывающие методологию построения цифровых двойников. Большое внимание в них уделяется взаимосвязи данной технологии с методами искусственного интеллекта для предиктивного обслуживания электроподвижного состава, а также описаны текущее состояние темы и перспективы ее развития.

В публикациях Д. В. Шевченко, А. Д. Обухова, Е. А. Ларченко, Я. И. Никоновой [9–12] представлены результаты исследований, посвященных разработке и применению цифровых двойников на железнодорожном транспорте для предиктивного обслуживания и ремонта локомотивов. Авторами

выполнен обзор существующих работ, выделены преимущества и проблемы внедрения данной технологии.

В работах [13–14] авторами рассматривается потенциал использования технологии цифрового двойника для реостатных испытаний тепловозов на завершающем этапе ремонта, что позволяет выявлять проблемы в работе дизель-генераторной установки и автоматической системы регулирования мощности тягового генератора, а также для улучшения системы технического обслуживания и ремонта локомотивов с возможностью согласования временных характеристик контуров регулирования мощности тягового генератора. В указанных исследованиях компьютерная цифровая модель подвижного состава авторами не представлена.

В работе [15] авторы используют цифровой двойник с целью формирования оптимальных графиков движения для электровозов постоянного тока. Предлагаемый метод основан на исследованиях свойств цифровой модели электровоза 2ЭС6 для получения уравнений движений поезда и набора тяговых характеристик локомотива. Авторами не представлена разработанная цифровая модель электрической части электроподвижного состава.

Целью настоящего исследования является моделирование возможных неисправностей в электрической части магистрального электровоза 2ЭС6 на основе технологии цифрового двойника для прогнозирования параметров и сценариев развития различных ситуаций и событий по данным бортовых измерительных систем в пути следования.

Основные задачи:

- разработка компьютерной цифровой модели электрической части электровоза 2ЭС6 на основе технологии цифрового двойника для реализации поставленной цели;
- моделирование некоторых неисправностей в электрической части электровоза 2ЭС6 с целью создания набора данных для машинного обучения и поиска допустимых состояний;
- валидация разработанной модели на основе данных с бортовых измерительных систем электроподвижного состава.

Материалы и методы исследования

Для обучения модели машинного обучения необходимо смоделировать наборы данных с возможными неисправностями и различными параметрами движения электровоза благодаря разработанной компьютерной цифровой модели электрической части электровоза 2ЭС6. Такая необходимость обусловлена малым количеством файлов реальных поездок с бортового регистратора параметров движения и автоведения (РПДА), где имелись различные неисправности и аварийные ситуации в электрической части электроподвижного состава.

Структурная схема обучающегося модуля с описанием взаимодействия технологии цифрового двойника и методов машинного обучения в контексте решаемых задач представлена на рис. 1.

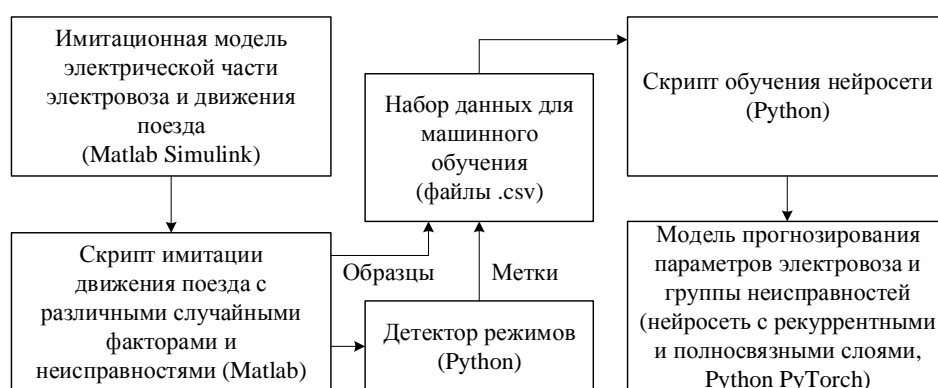


Рис. 1. Структурная схема обучающегося модуля

Представленная схема включает в себя компьютерную цифровую модель электрической части электровоза, а также определенный сценарий (скрипт), с помощью которого происходит запуск имитационной модели с разными параметрами. Скрипт генерирует нужное количество файлов с данными о виртуальных поездках, представляющих собой зависимости параметров движения электровоза от общего времени моделирования. Детектор режимов маркирует каждый файл специальной меткой, которая указывает на наличие или отсутствие неисправностей и недопустимых состояний. Модель прогнозирования параметров электровоза и возможных сценариев развития ситуаций по данным бортовых

измерительных систем в пути следования формируется с помощью методов машинного обучения, где также реализуется поиск допустимых состояний в реальном времени на основе моделирования в рамках прескриптивной диагностики.

Разработка компьютерной цифровой модели электрической части электровоза 2ЭС6

Компьютерная цифровая модель электрической части электровоза 2ЭС6 для С-СП-П-соединения тяговых электродвигателей (ТЭД) разработана в программном обеспечении *Matlab Simulink* и представлена на рис. 2 [16]. Исходными параметрами являются паспортные данные ТЭД ЭДП810, пусковые и шунтирующие сопротивления силовой цепи, токи уставок коммутационного оборудования, а также дискретные данные (напряжение на токоприемнике, позиции переключения пускового реостата, сила тяги и токи возбуждения ТЭД) с бортовых систем РПДА.

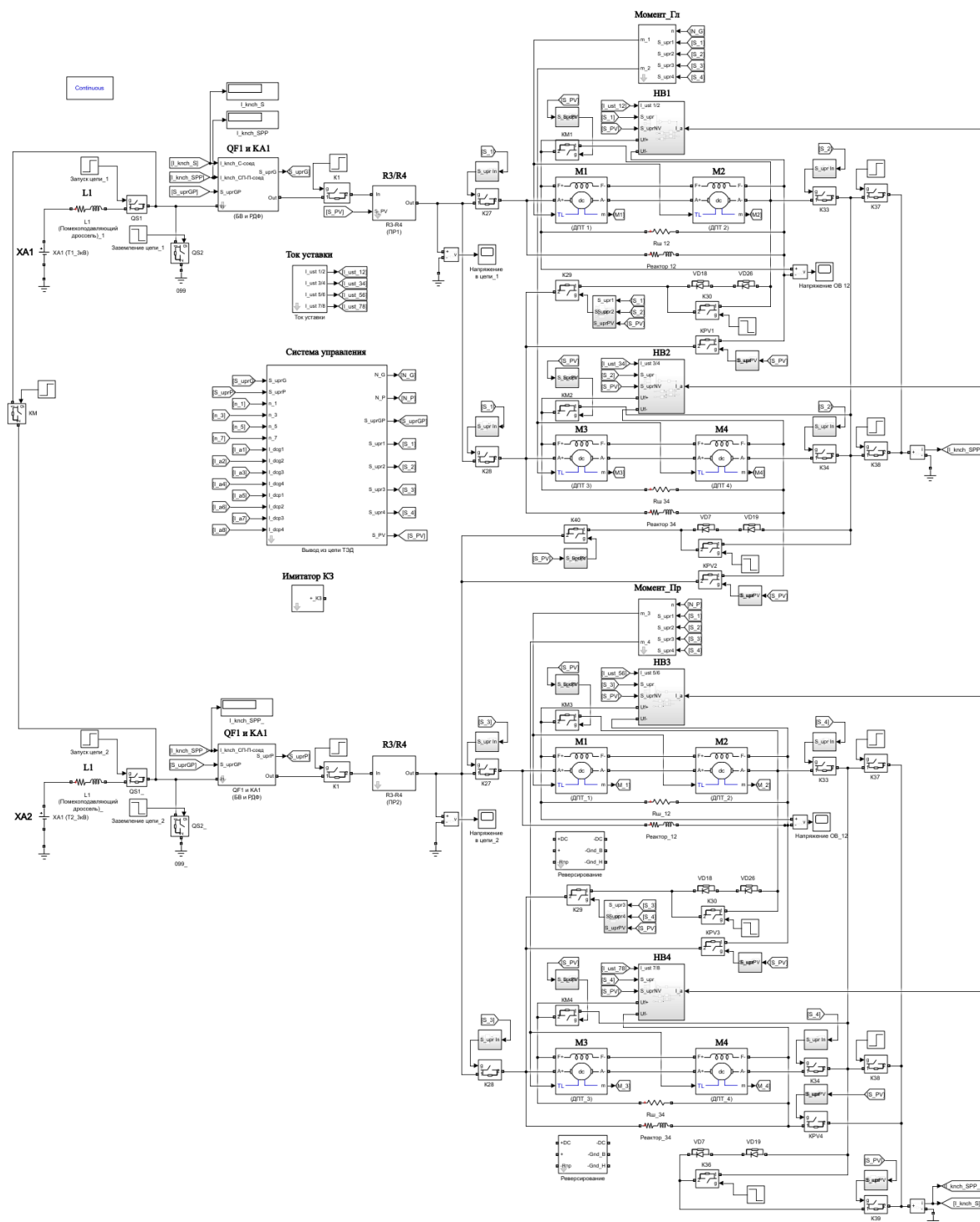


Рис. 2. Компьютерная цифровая модель электрической части электровоза 2ЭС6 для С-СП-П-соединения ТЭД

Модель пускового реостата реализована в виде подсистемы *R3-R4* и состоит из включенных последовательно резисторов *RLC Branch* и контакторов *Ideal Switch*. Момент сопротивления поступает на ТЭД от подсистемы «Момент_Гл/Пр», которая состоит из блоков *Matlab Function*, *Signal Builder* и *Constant*.

Для определения момента сопротивления на валу ТЭД (рис. 3) используются расчетная сила тяги, полученная от РПДА, и тяговый расчет. Среди параметров, которые подключены ко входам подсистемы «Вращающийся момент» и используются для тягового расчета, – блок построителя сигналов «Профиль пути» (уклоны) и обратная связь от тяговых электродвигателей в виде частоты вращения.

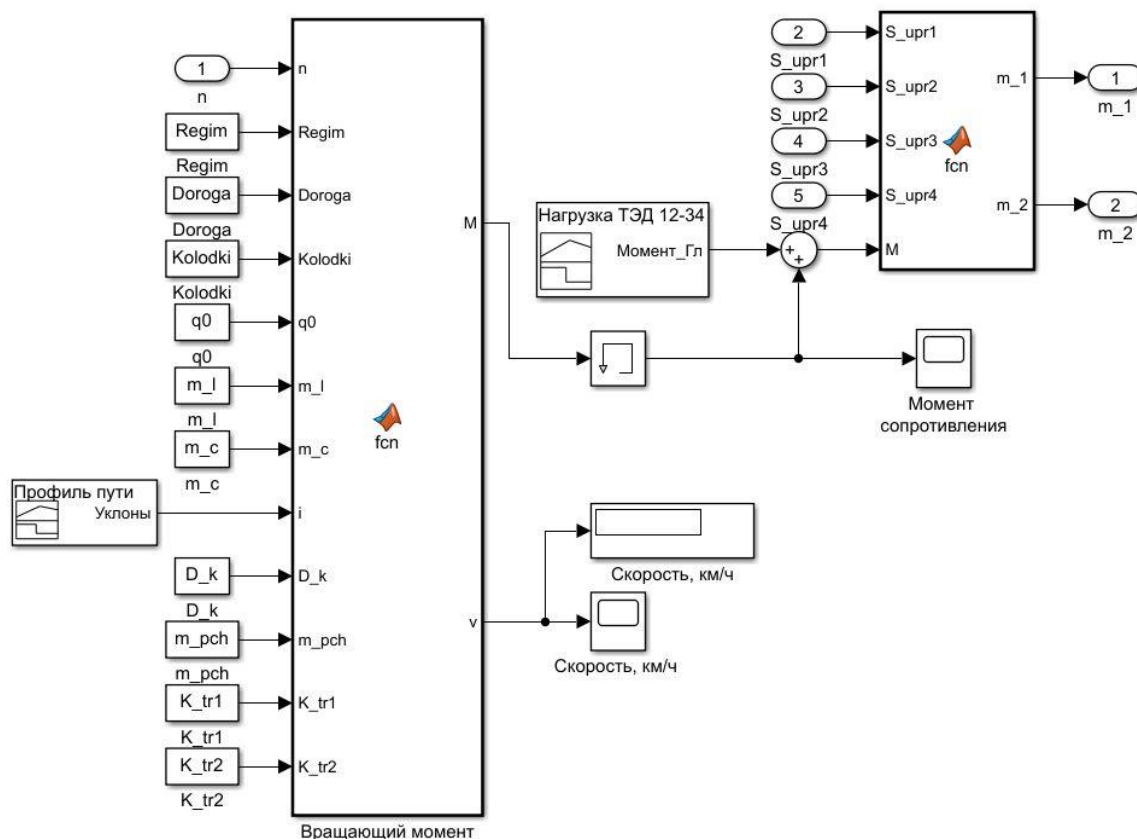


Рис. 3. Подсистема «Момент_Гл/Пр»

Питание обмоток возбуждения (ОВ) тяговых электродвигателей в разработанной цифровой компьютерной модели электрической части электровоза 2ЭС6 осуществляется с помощью разработанной подсистемы «НВ 1/4» (рис. 4), где имеется блок функций *Matlab Function* с реализованным в нем законом для регулирования напряжения ОВ:

$$I_{\text{в}} = I_{\text{в,уст}} + k \cdot I_{\text{я}},$$

где $I_{\text{в,уст}}$ – задаваемый ток уставки возбуждения; k – коэффициент компаундирования обратной связи по току якоря; $I_{\text{я}}$ – ток в обмотках якоря ТЭД.

В разработанной подсистеме «НВ 1/4» имеется возможность для задания тока возбуждения на основе данных с бортовых измерительных систем электровоза.

Для компьютерного моделирования возможных неисправностей в электрической части электровоза 2ЭС6 разработаны коммутационные и защитные аппараты (быстродействующий выключатель ВАБ-55 и дифференциальное реле РДЗ-068 ЭТ), выполненные с помощью подсистем, блоков функций и различных измерительных блоков. При наличии аварийных режимов в электрической части электровоза происходит срабатывание быстродействующего выключателя (БВ) и дифференциального реле (РДФ) с помощью прописанных функций в подсистемах «БВ» и «РДФ» (рис. 5).

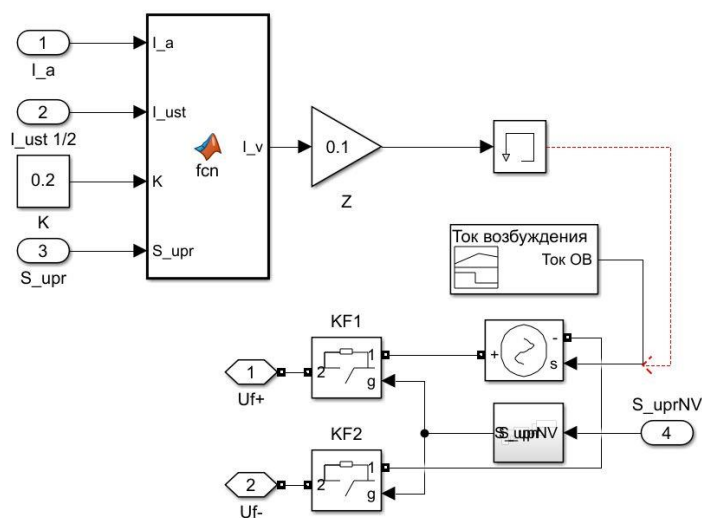


Рис. 4. Подсистема «НВ 1/4»

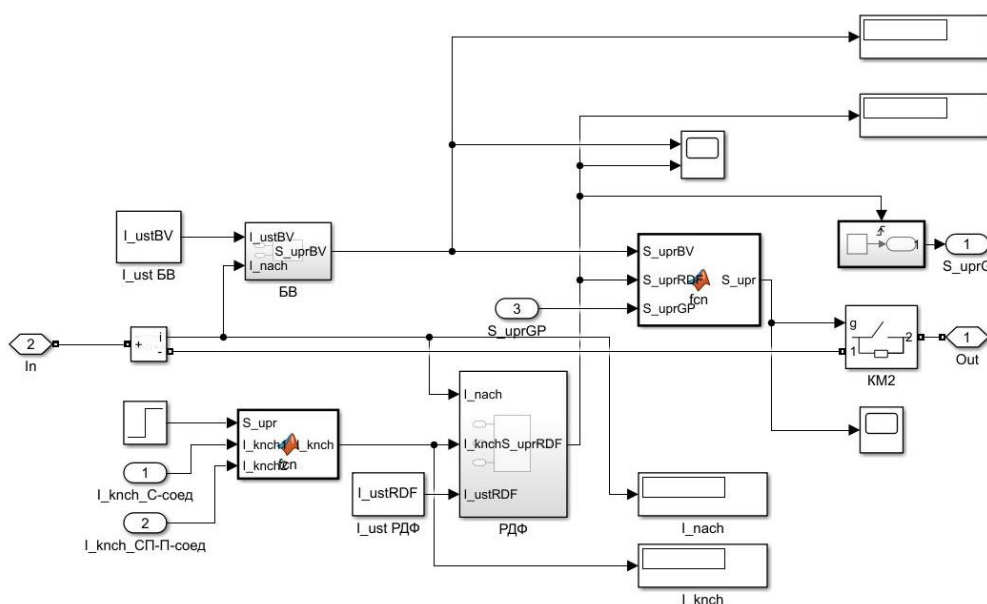


Рис. 5. Быстродействующий выключатель QF1 и дифференциальное реле KA1

Моделирование возможных неисправностей в электрической части электровоза 2ЭС6 с целью будущего генерирования набора данных для машинного обучения и поиска допустимых состояний

В качестве примера смоделированы некоторые из возможных неисправностей, среди которых короткое замыкание (КЗ) в разных частях электрической части электровоза 2ЭС6, а также пробой изоляции между коммутационными аппаратами.

1 При возникновении короткого замыкания в режиме тяги происходит отключение быстродействующего выключателя со срабатыванием дифференциального реле в одной из секций. Устранение неисправности в пути следования осуществляется путем вывода из электрической цепи неисправной пары тяговых электродвигателей. Для создания режима КЗ в электрических цепях разработан блок «Имитатор КЗ», который в данном случае подключен между ТЭД первой пары головной секции (M1 и M2). Вывод неисправных двигателей происходит с помощью блока «Система управления», по получении управляющих сигналов от БВ и РДФ выполняется проверка всех цепей тяговых электродвигателей, при обнаружении режима КЗ сигналы передаются на необходимые контакторы.

После выполнения запуска компьютерной модели на 25-й секунде с помощью блока «Имитатор КЗ» в цепи первой пары ТЭД происходит короткое замыкание. Срабатывают аппараты защиты БВ и РДФ, управляющий сигнал поступает на блок «Система управления», осуществляется автоматическая проверка всех цепей тяговых электродвигателей. Зафиксировав режим короткого замыкания, блок

«Система управления» передает соответствующие сигналы на контакторы К27-29 и К33-34 в головной секции электровоза, тем самым отключая неисправную пару ТЭД.

2 При включении быстродействующего выключателя происходит его отключение в одной из секций со срабатыванием дифференциального реле по причине пробоя изоляции провода 006 от $QF1$ и КА1 до контактора К1. Методом устранения такой неисправности в пути следования является отключение БВ и двигателей неисправной секции. Дальнейшая работа электровоза осуществляется на исправной секции с использованием всех видов соединений ТЭД.

После запуска компьютерной модели на 15-й секунде происходит короткое замыкание на проводе 006 в головной секции, срабатывает быстродействующий выключатель, управляющий сигнал передается на блок «Система управления», где фиксируются параметры ТЭД. После определения неисправной секции соответствующие сигналы поступают на контакторы К27-29, К33-34 и К40, двигатели неисправной секции выводятся из общей цепи, питание оставшейся секции осуществляется через второй источник питания ХА1.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты компьютерного моделирования при наличии и отсутствии режима короткого замыкания в цепях тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 представлены в виде зависимостей параметров от общего времени, которое в данном случае составило 65 секунд (рис. 6 и 7).

После срабатывания блока «Имитатор КЗ» первая пара ТЭД (М1 и М2) была отключена от питания (рис. 6, б). Кроме того, при выводе неисправной пары ТЭД также отключается соответствующий блок питания ОВ (рис. 6, в) электродвигателей (подсистема «НВ 1»).

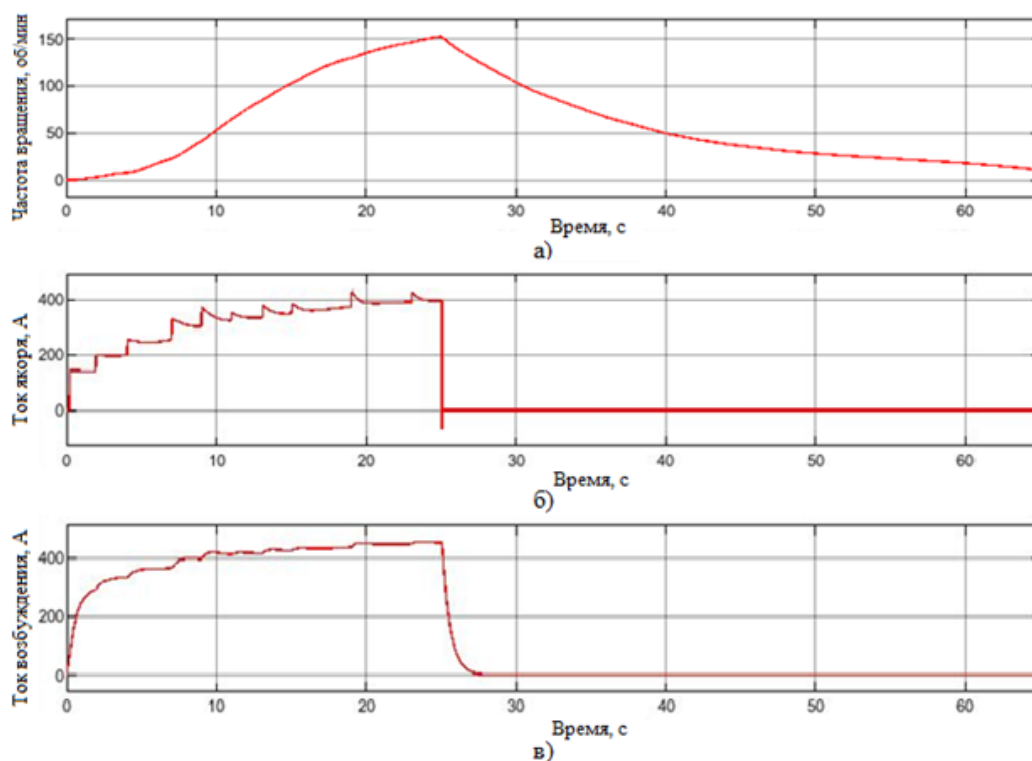


Рис. 6. Измеренные параметры первой пары ТЭД (М1 и М2) головной секции:
а – частота вращения; б – ток якоря; в – ток возбуждения

На 25-й секунде компьютерного моделирования на четвертом двигателе второй пары ТЭД заметен бросок тока (рис. 7, б), связанный с возникновением режима КЗ в цепи первой пары двигателей головной секции.

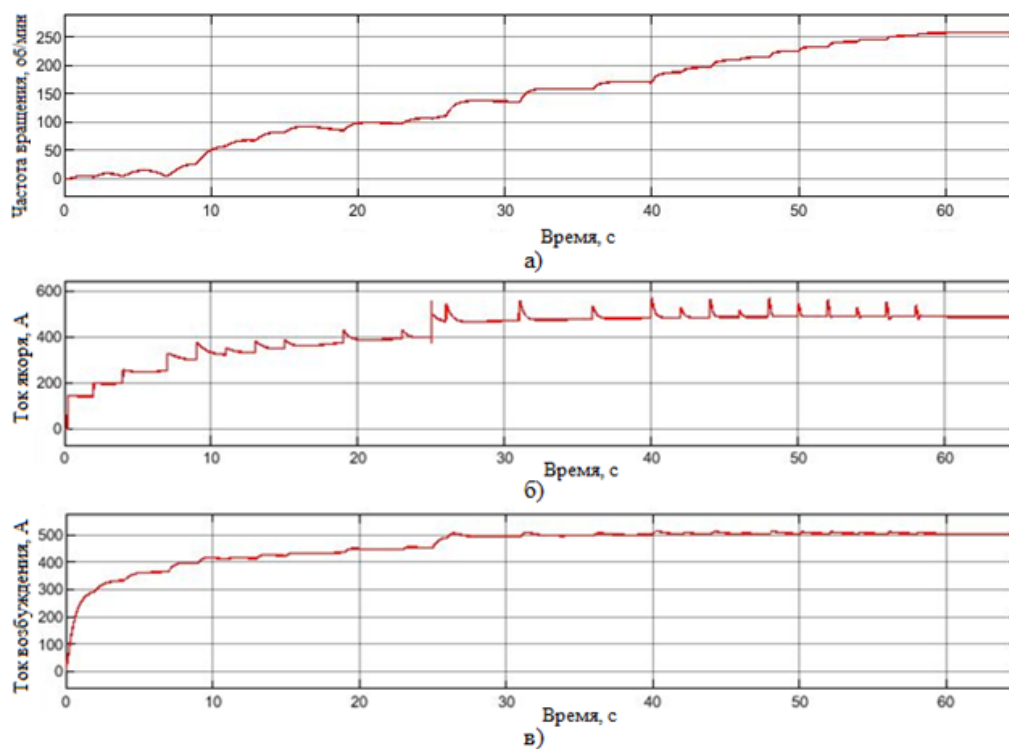


Рис. 7. Измеренные параметры второй пары ТЭД (М3 и М4) головной секции:
а – частота вращения; б – ток якоря; в – ток возбуждения

Результаты моделирования при наличии и отсутствии пробоя изоляции провода 006 в электрической части электровоза 2ЭС6 представлены на рис. 8, 9.

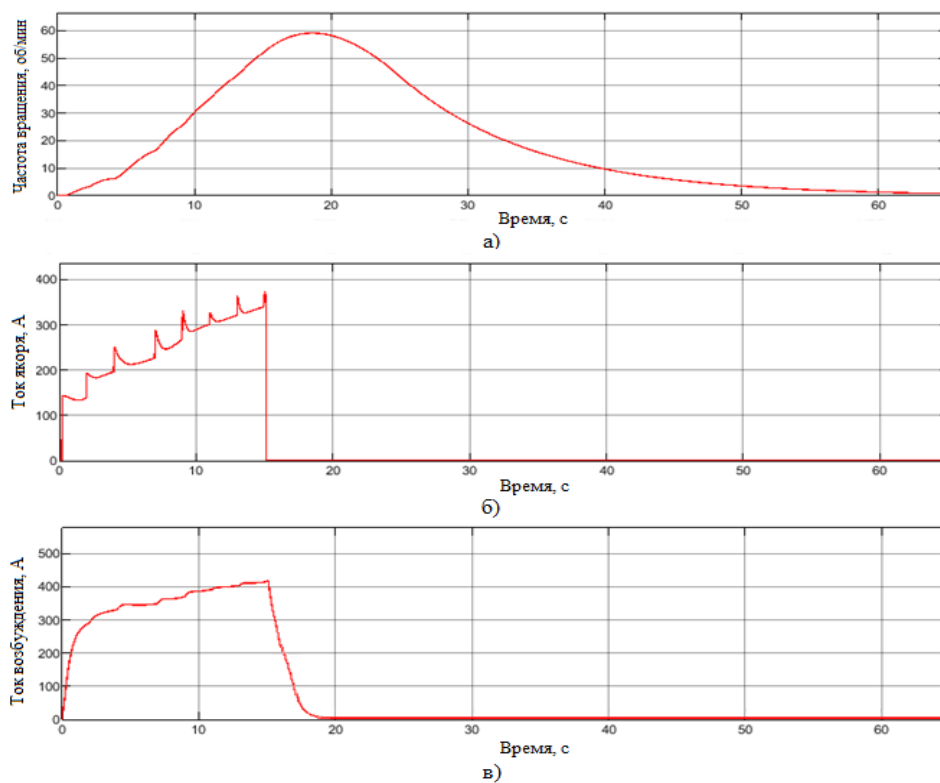


Рис. 8. Измеренные параметры первой пары ТЭД (М1 и М2) головной секции при наличии пробоя изоляции провода 006:
а – частота вращения; б – ток якоря; в – ток возбуждения

После возникновения пробоя изоляции провода 006 между аппаратами защиты и контактором все тяговые электродвигатели и блоки подачи напряжения на ОВ в головной секции были отключены от питания (рис. 8, б и в).

На 15-й секунде после отключения БВ и вывода из цепи неисправной (головной) секции на оставшихся двигателях прицепной секции замечен бросок тока (рис. 9, б), связанный с наличием пробоя изоляции в головной секции электрической части электровоза 2ЭС6.

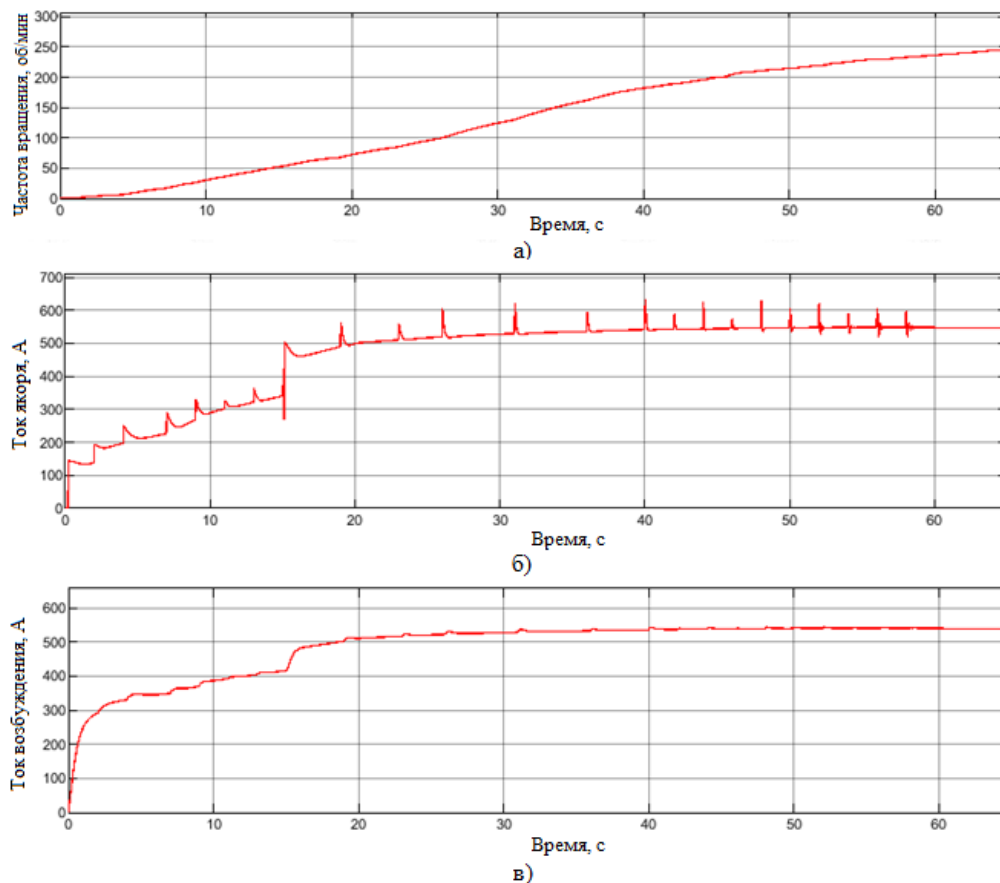


Рис. 9. Измеренные параметры первой пары ТЭД (М1 и М2) прицепной секции:
а – частота вращения; б – ток якоря; в – ток возбуждения

Полученные зависимости отражают изменение параметров в процессе движения электровоза, а также позволяют оценить заложенные алгоритмы работы в разработанных подсистемах и блоках, выполняющих функции защиты и управления.

Валидация разработанной компьютерной модели силовой электрической части электровоза 2ЭС6 по данным РПДА

Валидация разработанной компьютерной модели электрической части электровоза 2ЭС6 выполнена на основе данных, полученных с бортовых измерительных систем электроподвижного состава. Для оценки сходимости результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных в работе использовался коэффициент корреляции Пирсона.

На рис. 10 представлены зависимости рассчитанных и экспериментальных данных от общего времени моделирования (300 секунд), за этот период реализуются 23 позиции С-соединения ТЭД.

Коэффициент корреляции Пирсона для двух массивов данных (частота вращения) составил 0,992 ~99,2 %. Для тока якоря – 0,975 ~97,5 %, а для тока возбуждения – 0,997 ~99,7 %.

Анализ полученных результатов сравнения свидетельствует о достоверности разработанной компьютерной модели электрической части электровоза 2ЭС6.

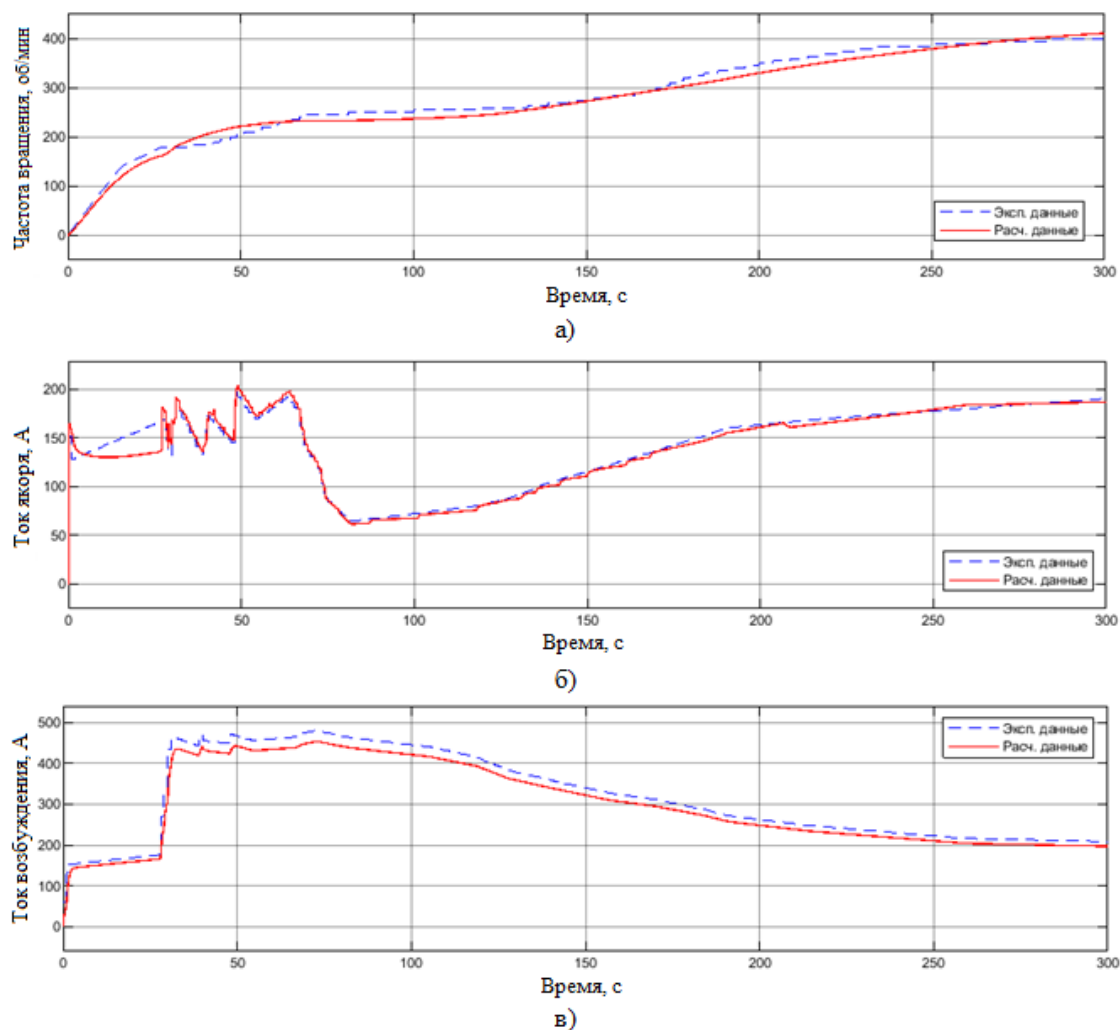


Рис. 10. Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных данных:
а – частота вращения; б – ток якоря; в – ток возбуждения

Выводы

В результате проведенных исследований в *Matlab Simulink* создана компьютерная цифровая модель электрической части электровоза 2ЭС6 с использованием технологии цифрового двойника, с учетом данных бортовых измерительных систем в пути следования.

Выполнено компьютерное моделирование возможных неисправностей в электрической части электровоза 2ЭС6 с их последующим автоматизированным устранением. Представлены графики зависимостей частоты вращения, тока якоря и тока возбуждения от общего времени моделирования, что позволяет оценить заложенные алгоритмы работы в созданных подсистемах и блоках.

Валидация разработанной компьютерной цифровой модели электрической части электровоза 2ЭС6 выполнена с использованием ретроспективных данных, обработанных с реальных РПДА. Рассчитанный коэффициент корреляции Пирсона для всех массивов данных составил более 97 %, что свидетельствует о высокой степени адекватности модели и ее соответствии реальным параметрам работы электровоза.

Сформированный набор данных с различными параметрами движения электроподвижного состава, полученный с помощью технологии цифрового двойника, может быть использован для машинного обучения моделей прогнозирования параметров электровоза и сценариев развития аварийных и предаварийных ситуаций. Кроме этого, такие данные также могут применяться для поиска допустимых состояний в пути следования в рамках прескриптивной аналитики, что и является предметом дальнейших исследований авторов.

Список литературы

1 Распоряжение ОАО «РЖД» от 19.08.2024 № 2009/р «Об утверждении паспорта Комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года». – Текст : электронный // ОАО «РЖД» [сайт]. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9990/page/103290?id=19093> (дата обращения 23.01.2025).

2 Цифровая железная дорога – ERTMS, BIM, GIS, PLM и цифровые двойники / В. П. Куприяновский, В. В. Аленков, А. А. Климов [и др.] // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13, № 3. – С. 129–166. – DOI 10.25559/SITITO.2017.3.546.

3 **Третьяков, Е. А.** Обзор подходов к применению технологии «цифровой двойник» в эксплуатации и ремонте электроподвижного состава / Е. А. Третьяков, А. А. Будаев // Теория и практика современной науки : материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Южно-Сахалинск. – Новокузнецк : Знание-М, 2023. – С. 115–123. – ISBN 978-5-00187-719-6.

4 **Будаев, А. А.** К вопросу об автоматизации процессов диагностики технического состояния и эксплуатационных показателей электроподвижного состава на основе технологии «цифровой двойник» / А. А. Будаев // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 94–99. – ISBN 978-5-94941-344-9.

5 Augmented digital twin for railway systems / E. Bernal, Q. Wu, M. Spiriyagin [et al.] // Vehicle System Dynamics. – 2023. – Vol. 62 (1). – P. 67–83. – DOI 10.1080/00423114.2023.2194543.

6 **Krmac, E.** Digital Twins for Railway Sector : Current State and Future Directions / E. Krmac, B. Djordjevic // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 108597–108615. – DOI 10.1109/ACCESS.2024.3439471.

7 Digitalization of railway transportation through AI-powered services : digital twin trains / S. Sarp, M. Kuzlu, V. Jovanovic [et al.] // European Transport Research Review 16 (1). – 2024. – No. 58. – DOI 10.1186/s12544-024-00679-5.

8 **Alkharis, A.** Development of Smart Factory 4.0 using cyber-physical system-based workshop in Rolling Stock Industry to Support Industry 4.0 / A. Alkharis, R. Nadlifatin // Journal Eduvest. – 2024. – Vol. 4 (7). – P. 6146–6155. – DOI 10.59188/eduvest.v4i7.1547.

References

1 Order of JSC Russian Railways dated 19.08.2024 No. 2009/r “On approval of the passport of the Comprehensive program for innovative development of the Russian Railways holding company for the period up to 2025”. – Text : electronic // JSC Russian Railways [website]. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9990/page/103290?id=19093> (date of access: 01/23/2025).

2 Digital railway – ERTMS, BIM, GIS, PLM and digital twins / V. P. Kupriyanovsky, V. V. Alenkov, A. A. Klimov [et al.] // Modern Information Technologies and IT Education. – 2017. – Vol. 13, No. 3. – P. 129–166. – DOI 10.25559/SITITO.2017.3.546.

3 **Tretyakov, E. A.** Review of approaches to the application of "digital twin" technology in the operation and repair of electric rolling stock / E. A. Tretyakov, A. A. Budaev // Theory and practice of modern science : proceedings of the III All-Russian (national) scientific and practical conference, Yuzhno-Sakhalinsk. – Novokuznetsk : Znanie-M, 2023. – P. 115–123. – ISBN 978-5-00187-719-6.

4 **Budaev, A. A.** On the issue of automation of diagnostic processes of the technical condition and operational indicators of electric rolling stock based on the “digital twin” technology / A. A. Budaev // Innovative projects and technologies in education, industry and transport : proceedings of the scientific conference dedicated to the Day of Russian Science. – Omsk : Omsk State Transport University, 2024. – P. 94–99. – ISBN 978-5-94941-344-9.

5 Augmented digital twin for railway systems / E. Bernal, Q. Wu, M. Spiriyagin [et al.] // Vehicle System Dynamics. – 2023. – Vol. 62 (1). – P. 67–83. – DOI 10.1080/00423114.2023.2194543.

6 **Krmac, E.** Digital Twins for Railway Sector : Current State and Future Directions / E. Krmac, B. Djordjevic // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 108597–108615. – DOI 10.1109/ACCESS.2024.3439471.

7 Digitalization of railway transportation through AI-powered services : digital twin trains / S. Sarp, M. Kuzlu, V. Jovanovic [et al.] // European Transport Research Review 16(1). – 2024. – No. 58. – DOI 10.1186/s12544-024-00679-5.

8 **Alkharis, A.** Development of Smart Factory 4.0 using cyber-physical system-based workshop in Rolling Stock Industry to Support Industry 4.0 / A. Alkharis, R. Nadlifatin // Journal Eduvest. – 2024. – Vol. 4 (7). – P. 6146–6155. – DOI 10.59188/eduvest.v4i7.1547.

9 **Шевченко, Д. В.** Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте / Д. В. Шевченко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – Т. 80, № 2. – С. 91–99. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.

10 **Обухов, А. Д.** Организация предиктивного технического обслуживания локомотивов / А. Д. Обухов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (53). – С. 86–88. – ISSN 1818-5509.

11 **Ларченко, Е. А.** Цифровая трансформация производственной системы управления в локомотиворемонтном комплексе ОАО «РЖД» / Е. А. Ларченко, А. С. Дубинина, А. А. Еременко // Российская экономика в условиях структурной трансформации : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк / под общей редакцией Д. Н. Ганченко, О. А. Цвиркун. – Москва : ООО «Актуальность.РФ», 2023. – С. 131–139. – ISBN 978-5-605-02404-0.

12 **Никонова, Я. И.** Цифровые двойники на железнодорожном транспорте : преимущества и проблемы внедрения / Я. И. Никонова // Муниципальная академия. – 2024. – № 1. – С. 124–133. – DOI 10.52176/2304831X_2024_01_124.

13 **Тарута, В. Ф.** Использование технологии «цифровой двойник» тепловоза при проведении автоматизированных реостатных испытаний / В. Ф. Тарута, Л. В. Милютина, М. В. Глухова // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2021. – С. 148–153. – ISBN 978-5-94941-272-5.

14 **Тарута, В. Ф.** Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта тепловозов с использованием цифровых двойников / В. Ф. Тарута, Л. В. Милютина, М. В. Глухова // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы XVI научной конференции, посвященной Дню Российской науки. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 462–468. – ISBN 978-5-94941-297-8.

15 **Надобных, М. О.** Цифровой двойник силовой цепи электровоза 2ЭС6 в режиме тяги / М. О. Надобных, Д. А. Бережнов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава (Ремонт и Динамика'23) : материалы VI Всероссийской научно-технической конференции

9 **Shevchenko, D. V.** Methodology for constructing digital twins in railway transport / D. V. Shevchenko // Russian Railway Science Journal. – 2021. – Vol. 80, No. 2. – P. 91–99. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.

10 **Obukhov, A. D.** Organization of predictive maintenance of locomotives / A. D. Obukhov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (53). – P. 86–88. – ISSN 1818-5509.

11 **Larchenko, E. A.** Digital transformation of the production management system in the locomotive repair complex of JSC Russian Railways / E. A. Larchenko, A. S. Dubinina, A. A. Eremenko // Russian economy in conditions of structural transformation : collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference, Novokuznetsk / edited by D. N. Ganchenko, O. A. Tsvirkun. – Moscow : LLC “Aktualnost.RF”, 2023. – P. 131–139. – ISBN 978-5-605-02404-0.

12 **Nikonova, Ya. I.** Digital twins in railway transport : advantages and problems of implementation / Ya. I. Nikonova // Municipal Academy. – 2024. – No. 1. – P. 124–133. – DOI 10.52176/2304831X_2024_01_124.

13 **Taruta, V. F.** Using the “digital twin” technology of a diesel locomotive when conducting automated rheostat tests / V. F. Taruta, L. V. Milyutina, M. V. Glukhova // Innovative projects and technologies in education, industry and transport : materials of a scientific conference dedicated to the Day of Russian Science. – Omsk : Omsk State Transport University, 2021. – P. 148–153. – ISBN 978-5-94941-272-5.

14 **Taruta, V. F.** Improving the system of maintenance and repair of diesel locomotives using digital twins / V. F. Taruta, L. V. Milyutina, M. V. Glukhova // Innovative projects and technologies in education, industry and transport : proceedings of the XVI scientific conference dedicated to the Day of Russian Science. – Omsk : Omsk State Transport University, 2022. – P. 462–468. – ISBN 978-5-94941-297-8.

15 **Nadobnykh, M. O.** Digital twin of the power circuit of the 2ES6 electric locomotive in traction mode / M. O. Nadobnykh, D. A. Berezhnov // Technological support for repair and improvement of the dynamic qualities of railway rolling stock (Repair and Dynamics'23) : proceedings of the VI All-Russian scientific and technical conference with international participation. – Omsk :

с международным участием. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 238–244. – ISBN 978-5-94941-334-0.

16 **Будаев, А. А.** Принципы построения имитационных моделей электровозов по технологии «цифровой двойник» / А. А. Будаев, А. Н. Соловьев // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта : сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 39–43. – ISBN 978-5-94614-569-5.

Omsk State Transport University, 2023. – P. 238–244. – ISBN 978-5-94941-334-0.

16 **Budaev, A. A.** Principles of constructing simulation models of electric locomotives using “digital twin” technology / A. A. Budaev, A. N. Solovyov // Research and development of rail and automobile transport : collection of materials of the International scientific and practical conference. – Ekaterinburg : Ural State University of Railway Transport, 2024. – P. 39–43. – ISBN 978-5-94614-569-5.

A. A. Budaev, E. A. Tretyakov

COMPUTER MODELING OF POSSIBLE MALFUNCTIONS IN THE ELECTRIC PART OF AN ELECTRIC LOCOMOTIVE ON THE BASIS OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

Abstract. The results of computer modeling of possible faults in the electrical part of an electric locomotive based on the digital twin technology using Matlab Simulink software are presented. For approbation of the developed digital twin of the electric part of the 2ES6 electric locomotive the validation of the computer model on the basis of retrospective data measured with the help of the onboard recorder of motion parameters and autotracking (RMPA) was carried out. The results of the research can be used for machine learning of the model for predicting of the state of electric rolling stock, namely for the purpose of generating a set of data with different parameters of electric locomotive motion due to the small number of records of real trips with RMPA. Prospects of practical application of the obtained results are related to the developed system of prescriptive monitoring and diagnostics for automatic prevention of electric locomotive faults on the way.

Keywords: digital twin, electric rolling stock, simulation model, prediction, modeling, machine learning.

For citation: Budaev, A. A. Computer modeling of possible malfunctions in the electric part of an electric locomotive on the basis of digital twin technology / A. A. Budaev, E. A. Tretyakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 121–132. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_121.

Сведения об авторах

Будаев Артём Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), кафедра «Подвижной состав электрических железных дорог», аспирант,
e-mail: artem.bydaev2@yandex.ru

Третьяков Евгений Александрович

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

Information about the authors

Budaev Artyom Anatolyevich

Omsk State Transport University (OSTU), Chair “Rolling Stock of Electric Railways”, Postgraduate Student,
e-mail: artem.bydaev2@yandex.ru

Tretyakov Evgeny Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU), Chair “Rolling Stock of Electric Railways”, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: eugentr@mail.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОГРУЖЕНИЯ ЛПП – ОСНОВА СУБЪЕКТНО ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА К ИССЛЕДОВАНИЮ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ *

Аннотация. Осуществлена постановка задачи принятия нетривиальных решений с учетом темперамента, психоэмоционального статуса лица, принимающего решения. Это потребовало уточнения и расширения категориального аппарата исследования. В частности, исследованы понятия субъектно-независимые и субъектно-зависимые признаковые пространства. Проанализированы биоинспирированные методы принятия решений, базовой моделью которых являются конечные автоматы. Введено понятие «конечные автоматы с преимущественным направлением переходов». Разработан механизм идентификации признакового пространства (ПП) исследователя, включающий в себя выбор вида меры близости, алгоритм расчета меры близости. Предложена схема обучения учителя и машины. Показана возможность погружения конечных автоматов в субъектно-зависимое пространство признаков. Названы перспективы исследований, приведены иллюстративные примеры.

Ключевые слова: идентификация признакового пространства моделирования, субъектно-ориентированный подход, субъектно-независимые и субъектно-зависимые признаковые пространства, биоинспирированные методы принятия решений.

Для цитирования: Лябах, Н. Н. Идентификация признакового пространства погружения ЛПП – основа субъектно ориентированного подхода к исследованию сложных объектов / Н. Н. Лябах, Д. М. Инухова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 133–140. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_133.

Введение

Многообразные методы математического моделирования сложных объектов и процессов принятия решений осуществляются в субъектно-независимых информационных пространствах. То есть их свойства не зависят ни от наблюдателя, ни от лица, принимающего решения (ЛПП), например:

– *регрессионный анализ* имеет широкий спектр применения в различных сферах деятельности. На транспорте с помощью регрессионного анализа моделируются многие производственные процессы погрузки-выгрузки, перевозки грузов, всевозможные тренды развития и др., а также процедуры принятия ответственных решений. Например, в исследовании [1] рассмотрены регрессионные факторные модели для оценки рисков на железнодорожном транспорте;

– *задачи линейного и нелинейного программирования* позволяют оптимизировать работу предприятий и протекание производственных процессов. В пособии [2], например, представлены как различные транспортные задачи, решаемые этими методами, так и типичные методы математического программирования;

– *методы классификации и кластеризации объектов и процессов* – действенный инструмент систематизации знаний любой сферы деятельности. В статье [3] проведен кластерный анализ маршрутов новой модели управления наземным городским пассажирским транспортом общего пользования, в исследовании [4] представлена классификация отцепов сортировочной горки различных типов, представлены адаптированные к транспортной тематике методы классификации и кластеризации.

В каждом из перечисленных случаев исследователь формирует признаковое пространство (ПП)

$$(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где n – размерность пространства признаков x_i исследуемого объекта.

Каждый объект исследования в этом ПП задается точкой, классы и кластеры объектов – зонами этого ПП. В некоторых случаях (для процессов) одним из признаков является время t .

* Статья подготовлена при поддержке гранта НП11-2025 ФГБОУ ВО «МГТУ»: «Природоподобные технологии синтеза систем искусственного интеллекта».

Для всех исследователей эти ПП индифферентны к их предпочтениям и психоэмоциональным свойствам, а сами ПП изотропные и имеют нулевую кривизну. Это основа для субъектно-независимого моделирования. В этой постановке есть свои плюсы (универсальность и независимость разрабатываемого инструментария), но в ряде случаев (а для ЛПР их большинство) этот факт сужает возможности принятия решений и деформирует сами решения. Рассмотрим конкретные примеры.

1 Результативность деятельности оператора сортировочной горки существенно зависит от его профессионализма и типа темперамента [4]. Вследствие этого одни и те же практические задачи на сортировочной горке разные операторы решают по-разному. То есть, по сути, они находятся в различных технико-технологических ситуациях (а ситуации задаются точками соответствующего признакового пространства). Если при этом еще учесть процесс приобретения навыков и/или текущее состояние организма оператора (усталость, болезнь, стресс), то ПП и одного оператора, но в разные моменты времени также будет различным.

2 Экспертная оценка (проекта, квалификации специалиста, важности фактора влияния и др.) напрямую определяется индивидуальными характеристиками эксперта. Именно поэтому при анализе одного и того же объекта мнения экспертов, как правило, не совпадают.

Чтобы предсказать решение эксперта (оператора горки) или транслировать их опыт и интуицию интеллектуальному советчику, необходимо погрузиться в соответствующие ПП.

Цели научной разработки

Для идентификации субъектно-зависимого ПП погружения ЛПР необходимы:

– *развитие категориального аппарата исследования.* Новое видение проблемы требует расширения языковых средств для обеспечения возможности полного ее описания. Кроме того, в любых развивающихся теориях категориальный аппарат, как правило, не является общепризнанным и необходимо избегать неоднозначности толкования используемых терминов;

– *разработка механизма идентификации ПП исследователя,* которая включает в себя гипотезы (исходные аксиоматические предположения – ограничения задачи), формализацию (представление метода в виде аналитической модели), алгоритмизацию разрабатываемого механизма;

– *разработка алгоритма обучения учителя и модели.* Как правило, исследуемые процессы на практике нестационарны и соответственно и ЛПР, и машинному интеллекту следует «успевать» за изменением их параметров. То есть необходимо в процедуры моделирования и управления включить этапы обучения. Кроме того, обычно на начальном этапе статистических данных для построения модели недостаточно, они появляются в процессе функционирования объекта. И модель должна «доучиваться» с поступлением новых данных.

Основная часть

1 Развитие категориального аппарата исследования

К методам, указанным во введении, а также иным хорошо разработанным процедурам принятия решений (метод балансов Леонтьева, принцип максимума Понтрягина, динамическое программирование и др.) [5] человек обращается в специальных исследованиях. В обыденной и производственной деятельности он этими методами не пользуется. Как правило, применяют так называемые биоинспирированные (природоподобные) методы и алгоритмы [6, 7], выработанные природой в процессе многовековой эволюции. Они обладают рядом существенных отличительных черт:

– это инстинктивные методы. У человека центр принятия таких решений находится не в коре, а подкорке головного мозга;

– характер принятия решений не логический, а интуитивный. Логические решения приемлемы, если используемая логика адекватна исследуемому процессу и данные, подаваемые на вход избранной логической конструкции, качественны. Если хоть одно из этих условий нарушается, то полученное решение не только будет неверным, но и вредным, так как создается впечатление научной проработки вопроса, и это вводит в заблуждение. Интуитивные решения более консервативные, но опираются на прошлый опыт (в том числе и опыт предшествующих поколений, «защитный» в инстинктах);

– отличаются повышенной скоростью принятия решений;

– такие методы принятия решений свойственны «низшим» организмам, для них они являются базовыми;

– биоинспирированные методы учитывают статус, психоэмоциональные свойства организма. Например, метод серых волков прямо опирается на иерархию внутри стаи [7];

– в природоподобных алгоритмах с многими участниками образуется коллективный интеллект. Это продукт взаимодействия агентов. Возникает синергия взаимодействия агентов, каждый из которых

обладает низким (или вообще нулевым) уровнем интеллекта, но коллективные действия оказываются вполне разумными.

В рамках данного исследования нас интересует возможность «списать» индивидуальные свойства ЛПП для:

– прогноза поведения отдельного ЛПП-оператора в различных сложных производственных ситуациях и коррекции его способностей к принятию решений при необходимости;

– прогноза поведения группы субъектов (например, пассажиров) в экстремальных ситуациях.

Оценить степень их согласованности, убеждаемости, управляемости. Важно при составлении инструкций поведения в нерегламентированных ситуациях;

– синтеза интеллектуальных автоматов-советчиков с индивидуальными свойствами ЛПП-учителя [8].

В нашем обычном пространстве бытия есть массы, которые искривляют это пространство. И чтобы полнее исследовать его (пространство), надо учитывать эту кривизну. Она может быть нулевой, положительной и отрицательной. Кривизна меняет «плотность» пространства, и оно перестает быть изотропным (одинаковые свойства во всех точках и направлениях). Обычная физика (малых скоростей и расстояний) пренебрегает этими свойствами пространства. Но это и ограничивает возможности ее модельных конструкций. Расширение возможностей физики требует перехода в другой модельный ряд – теорию относительности [9].

В признаковом пространстве также есть «массы», например, кластеры объектов, сами объекты. И они также искривляют это пространство – пространство нашего моделирования. До определенной степени, в ситуации, аналогичной предыдущей, мы можем не учитывать это искривление. Но, по крайней мере, надо иметь его в виду.

В настоящей работе сделан первый шаг к осмыслению и модельному учету этого феномена.

Далее под субъектно-независимыми ПП будем понимать изотропные ПП, независимые от свойств ЛПП и от свойств лица, на которое направлено решение.

Субъектно-зависимыми признаковыми пространствами будем называть пространства, структура и параметры которых зависят от субъектов, взаимодействующих в процедуре принятия решений. Изотропными эти пространства в общем случае не являются.

2 Разработка механизма идентификации ПП исследователя

2.1 Выбор вида меры близости

ПП позволяет оценивать позиции объектов, классифицировать их, если задана их мера близости. В настоящее время наиболее распространенными мерами являются:

– обобщенная евклидова мера

$$d(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_i (x_i^A - x_i^B)^2}; \quad (2)$$

– мера Хемминга (мера «таксиста»)

$$d(A, B) = \sum_{i=1}^n \alpha_i |x_i^A - x_i^B|; \quad (3)$$

– обобщенное расстояние Чебышева

$$d(A, B) = \max_i \alpha_i |x_i^A - x_i^B|. \quad (4)$$

Если в соотношениях (2)–(4) весовые коэффициенты признаков $\alpha_i = 1$, то получаем традиционные меры изотропных пространств.

Структуру меры (вид зависимости (2)–(4)) выбирают, исходя из свойств исследуемых задач. Если исследуются энергетические характеристики объекта, то адекватной будет мера (2) – энергия коррелирована с квадратом сигнала, если в приоритете интегральные характеристики объекта (аналоги «массы»), то мера имеет вид (3), наконец, релейные системы порождают меру (4).

Для данного исследования примем меру вида (2). В случае равенства коэффициентов она превращается в обычное евклидово пространство.

2.2 Разработка алгоритма расчета меры близости

2.2.1 Постулируется вид меры близости.

2.2.2 ЛПР формирует на основании своего опыта и интуиции совокупность объектов (процессов): A, B, C, D, \dots , относительно которых оно может с уверенностью и высокой точностью (т.е. непротворечно) высказать свои суждения об их взаимной близости. Они типичны и важны для процесса, представляют собой репрезентативную группу объектов.

2.2.3 На основании своего опыта, интуиции и внутренних предпочтений ЛПР формирует систему неравенств относительно неизвестных коэффициентов выбранной меры. Для меры вида (2) это соотношения

$$d^2(A, B) > d^2(C, D). \quad (5)$$

В этих соотношениях и заложены свойства идентифицируемого нами ПП ЛПР.

2.2.4 Решаем эту систему относительно неизвестных α_i . Возможны три исхода:

2.2.4.1 Система решений не имеет. Это говорит о неверном выборе структуры меры. Противоречивость высказываний эксперта в данном случае исключается по условиям алгоритма. Этот случай может быть исследован в дальнейшем (см. перспективы исследований).

2.2.4.2 Случай единственного решения является маловероятным (случайным) и пограничным. Он сразу дает искомый набор коэффициентов.

2.2.4.3 Система имеет множество решений. Анализируем это множество:

1) если оно физически компактно и соответствует заданному уровню точности, то на этом множестве выбираем единственную точку, определяющую коэффициенты α_i ;

2) в противном случае ЛПР добавляет обучающие точки п. 2 алгоритма и процесс расчета повторяется.

Для оптимизационного выбора единственной точки можно использовать несколько разных алгоритмов (их можно объяснить с помощью рис. 1, а):

а) максиминный подход – точка, для которой минимальное расстояние до границы максимально:

$$A_{01} = \arg \max_A \min_d d(A, G); \quad (6)$$

б) минимизация среднего риска – точка, для которой сумма всех расстояний до границы области максимальна:

$$A_{02} = \arg \max_A \int_0^{2\pi} d(A_1 G) dG; \quad (7)$$

в) центр тяжести выделенной области.

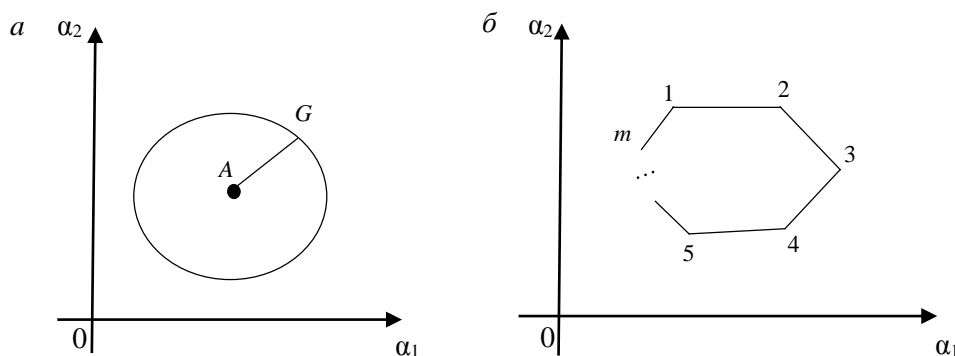


Рис. 1. Иллюстрации выбора оптимальной точки допустимых областей решений:

a – для случаев *a* и *б*; *б* – для случая *в*

Реализация процедур *a* и *б* затруднительна технически, если граница G не имеет «хорошего» вида аналитического задания. В нашем случае структура области G – многоугольник (так как ограничения (5) линейны относительно исследуемых параметров α_i) и в качестве оптимальной точки удобно принять вариант *в* (рис. 1, *б*). Тогда оптимальная точка A_0 имеет координаты

$$\alpha_{0i} = \left(\sum_{j=1}^m \alpha_{ji} \right) / m. \quad (8)$$

Полученные значения коэффициентов характеризуют искомое ПП ЛПР.

Пример

Оператор сортировочной горки для обеспечения интервального и прицельного регулирования отцепов на тормозной позиции использует различные ступени торможения (отражены на оси Ox_1) и различные временные промежутки торможения (откладываются на оси Ox_2). На рис. 2, а представлен набор таких четырех точек: $A(2, 6)$; $B(2, 2)$; $C(4, 2)$; $D(4, 5)$. На рис. 2, б показано отражение «физического» пространства наблюдения. Визуально кажется, что точки A и D находятся в одном классе, а точки B и C – в другом. Но мнение эксперта (ЛПР, оператора горки) иное, он считает, что:

$$d^2(A, B) > d^2(B, C), \text{ а } d^2(A, D) > d^2(D, C). \quad (9)$$

То есть энергетические эффекты торможения от изменения на одну ступень больше, чем увеличение торможения на один такт времени.

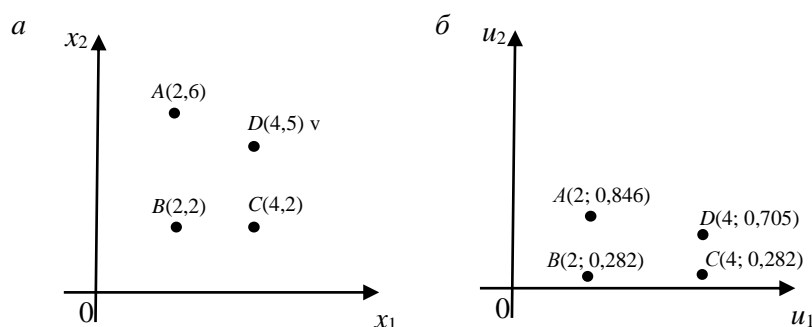


Рис. 2. Геометрическая иллюстрация к примеру:

a – исходное ПП; *б* – преобразованное ПП

Используя модельный вид меры (2) и полученные данные (координаты точек и соотношения (8)), генерируем систему линейных неравенств относительно неизвестных коэффициентов меры α_i . После несложных вычислений, принимая $\alpha_1 = 1$ (в этой задаче важно соотношение коэффициентов, а не их абсолютные значения), получаем

$$0,25 < \alpha_2 < 0,5. \quad (10)$$

В данном случае область G представлена отрезком $[0,25; 0,5]$. Все три случая оптимизационного выбора единственной точки – *a*, *б*, и *в* – вырождаются в отрезок и дают одно решение $\alpha_2 = 0,375$. Мера эксперта имеет вид

$$d(A, B) = ((x_1^A - x_1^B)^2 + 0,375(x_2^A - x_2^B)^2)^{0,5}. \quad (11)$$

Коэффициент $\alpha_2 = 0,375$ «деформирует» исходное пространство признаков (см. рис. 2, *a*), и в новых координатах (u_1, u_2), где $u_1 = x_1$ и $u_2 = 0,141x_2$, заданные точки имеют иное структурное расположение (на рис. 2, *a* точки группируются по близости A с D и B с C , а на рис. 2, *б* – A с B и C с D). Координаты точек на рис. 2, *б* соответственно равны: $A(2; 0,846)$, $B(2; 0,282)$, $C(4; 0,282)$, $D(4; 0,705)$.

3 Связь природоподобных методов принятия решений с субъектно-зависимым ПП

Биоинспирированные методы принятия решений хорошо описываются модельными конструкциями конечных автоматов (КА) [10, 11]. В их составе выделяют детерминированные и вероятностные КА. Первые обеспечивают однозначные переходы между состояниями при заданных входных сигналах, вторые допускают вариативность переходов. На рис. 2 исследуемые точки A, B, C, D можно интерпретировать как возможные состояния тормозной позиции горочной системы. Для обеспечения безопасности торможения (например, исключения «выдавливания отцепа из замедлителя»), точности вытормаживания отцепов необходимо реализовать плавный переход между заданными состояниями. Он возможен только в том случае, если оператору горки (им может быть и робот) известно «истинное»

расположение точек (состояний КА) в ПП. В противном случае управление может оказаться неустойчивым, небезопасным и неточным. Введенное нами понятие «субъектно-зависимое ПП» обеспечивает такое видение ситуации.

4 Обучение учителя и машины

Представленный выше механизм идентификации субъектно-зависимого ПП позволяет предложить алгоритм обучения ЛПР и машины в период функционирования системы (рис. 3).

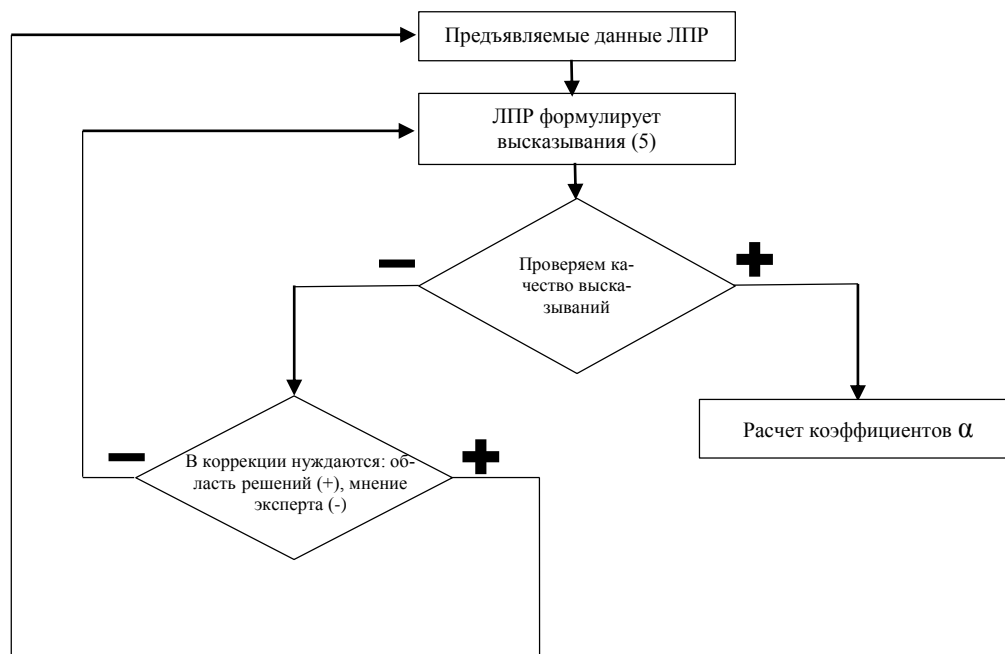


Рис. 3. Алгоритм обучения принятию решений в субъектно-зависимом ПП

Исследователю предъявляется набор тестовых точек (типичных объектов) ПП. Сформировать этот набор можно двумя способами:

- выбирая типичные для исследуемого процесса ситуации (наблюдая реальный процесс принятия решений). В этом случае хорошо отражается рабочая область ПП, но некоторые области ПП могут быть не представлены в модели;
- рассчитывая тестовые точки методами теории активного эксперимента [4] и преследуя цель равномерно (равнозначно) покрыть ПП. Тогда точки, имеющие неравнозначное значение, будут представлены без учета частоты их встречаемости.

Если к выбору структуры меры нет вопросов, то множество тестовых точек возвращается ЛПР для повторного анализа и установления новых зависимостей вида (5).

Это этап обучения ЛПР. Оно анализирует (ищет противоречия) свое предыдущее решение и обновляет его.

Выводы

- 1 Введены понятия: природно-подобные методы принятия решений, субъектно-независимое и субъектно-зависимое моделирование признакового пространства погружения ЛПР и объекта управления.
- 2 Проанализированы преимущества биоинспирированных методов принятия решений.
- 3 Разработан механизм расчета параметров субъектно-зависимого ПП.
- 4 Предложена схема обучения принятию решений ЛПР и машины.

Перспективы исследований

Для дальнейших исследований необходимо:

- рассмотреть возможность идентификации субъектно-зависимого ПП при противоречивых высказываниях ЛПР, т.е. разработать метод, аналогичный обобщенному регрессионному анализу;
- создать программное обеспечение метода с доступным языковым интерфейсом;
- сформулировать перечень практических задач, решаемых в рамках выстроенного подхода.

Список литературы

- 1 **Горяинов, А. В.** Регрессионные факторные модели для оценки рисков на железнодорожном транспорте / А. В. Горяинов, Ю. С. Кан, Е. Н. Платонов // Труды и пленарные доклады участников конференции УКИ'12. – Москва : ИПУ РАН, 2012. – С. 314–320. – ISBN 978-5-91450100-3.
- 2 Математические методы в организации транспортных процессов : методические указания по разделу «Линейное программирование» дисциплин «Математические методы в организации транспортных процессов», «Математическое моделирование» для всех форм обучения и направлений подготовки / составитель Ю. А. Захарова. – Нижневартовск, 2023. – 34 с.
- 3 **Кудряшов, М. А.** Кластерный анализ маршрутов новой модели управления наземным городским пассажирским транспортом общего пользования / М. А. Кудряшов, Р. С. Айриев, Г. М. Овнанян // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17, № 4. – С. 182–195. – ISSN 1992-3252.
- 4 **Лябах, Н. Н.** Техническая кибернетика на железнодорожном транспорте : учебник / Н. Н. Лябах, А. Н. Шабельников. – Ростов-на-Дону : СКНЦ ВШ, 2002. – 232 с. – ISSN 1560-3644.
- 5 **Интрилигатор, М.** Математические методы оптимизации и экономическая теория / М. Интрилигатор. – Москва : Айрис-Пресс, 2002. – 564 с. – ISBN 5-8112-0042-0.
- 6 **Котенко, И. В.** Анализ биоинспирированных подходов для защиты компьютерных систем и сетей / И. В. Котенко, А. В. Шоров, Ф. Г. Нестерук // Труды СПИИРАН. – Москва, 2011. – № 3 (18). – С. 19–73.
- 7 Звериные алгоритмы: какими представителями животного мира вдохновлялись исследователи для создания алгоритмов. – URL: habr.com/ru/companies/rshb/articles/749930 (дата обращения: 01.03.2025).
- 8 **Розенберг, И. Н.** Системы управления сортировочными процессами в рамках идеологии цифровой железной дороги : монография / И. Н. Розенберг, А. Н. Шабельников, Н. Н. Лябах ; Российская академия наук, ВИНТИ РАН. – Москва : ВИНТИ РАН, 2019. – 243 с. – ISBN 978-5-902928-82-9.
- 9 **Пенской, А. В.** Классическая дифференциальная геометрия / А. В. Пенской. – URL: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/kdg-seminars-penskoy-MK.pdf?ysclid=m7fxqw6a4i66147865> (дата обращения: 22.02.2025).
- 10 **Mateus, P.** On the complexity of minimizing probabilistic and quantum automata / P. Mateus, D. Qiu, L. Li // Information and Computation. – 2012. – Vol. 218. – P. 36–53.

References

- 1 **Goryainov, A. V.** Regression factor models for risk assessment in railway transport / A. V. Goryainov, Yu. S. Kan, E. N. Platonov // Proceedings and plenary reports of the participants of the UKI'12 conference. – Moscow : IPU RAS, 2012. – P. 314–320. – ISBN 978-5-91450100-3.
- 2 Mathematical methods in organizing transport processes : guidelines for the section "Linear programming" of the disciplines "Mathematical methods in organizing transport processes", "Mathematical modeling" for all forms of training and areas of training / compiled by Yu. A. Zakharova. – Nizhnevartovsk, 2023. – 34 p.
- 3 **Kudryashov, M. A.** Cluster analysis of routes of a new model for managing ground-based urban public passenger transport / M. A. Kudryashov, R. S. Airiyev, G. M. Ovnanyan // World of Transport and Transportation. – 2019. – Vol. 17, No. 4. – P. 182–195. – ISSN 1992-3252.
- 4 **Lyabakh, N. N.** Technical cybernetics in railway transport : textbook / N. N. Lyabakh, A. N. Shabelnikov. – Rostov-on-Don : SKNC VSh, 2002. – 232 p. – ISSN 1560-3644.
- 5 **Intriligator, M.** Mathematical methods of optimization and economic theory / M. Intriligator. – Moscow : Iris-Press, 2002. – 564 p. – ISBN 5-8112-0042-0.
- 6 **Kotenko, I. V.** Analysis of bioinspired approaches to protecting computer systems and networks / I. V. Kotenko, A. V. Shorov, F. G. Nesteruk // Proceedings of SPIIRAS. – Moscow, 2011. – No. 3 (18). – P. 19–73.
- 7 Animal Algorithms: which representatives of the animal world inspired researchers to create algorithms. – URL: habr.com/ru/companies/rshb/articles/749930 (date of access: 03/01/2025).
- 8 **Rosenberg, I. N.** Control systems for sorting processes within the framework of the digital railway ideology: monograph / I. N. Rosenberg, A. N. Shabelnikov, N. N. Lyabakh ; Russian Academy of Sciences, VINITI RAS. – Moscow : VINITI RAS, 2019. – 243 p. – ISBN 978-5-902928-82-9.
- 9 **Penskoy, A. V.** Classical differential geometry / A. V. Penskoj. – URL: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/kdg-seminars-penskoy-MK.pdf?ysclid=m7fxqw6a4i66147865> (date of access: 02/22/2025).
- 10 **Mateus, P.** On the complexity of minimizing probabilistic and quantum automata / P. Mateus, D. Qiu, L. Li // Information and Computation. – 2012. – Vol. 218. – P. 36–53.

11 Abstract Probabilistic Automata / B. Delahaye, J.-P. Katoen, K. G. Larsen [et al.] // Information and Computation. – 2013. – Vol. 232. – P. 66–116.

11 Abstract Probabilistic Automata / B. Delahaye, J.-P. Katoen, K. G. Larsen [et al.] // Information and Computation. – 2013. – Vol. 232. – P. 66–116.

N. N. Lyabakh, D. M. Inukhova

IDENTIFICATION OF THE FEATURE SPACE OF IMMERSION OF THE DECISION-MAKER – THE BASIS OF THE SUBJECT-ORIENTED APPROACH TO THE STUDY OF COMPLEX OBJECTS

Abstract. The problem of making non-trivial decisions taking into account the temperament and psycho-emotional status of the decision maker has been formulated. This required clarification and expansion of the categorical apparatus of the study. In particular, the concepts of subject-independent and subject-dependent feature spaces have been studied. Bioinspired methods of decision making, the basic model of which is finite state machines, have been analyzed. The concept of "finite state machines with a preferential direction of transitions" has been introduced. A mechanism for identifying the feature space (FS) of the researcher has been developed, including: selection of the type of proximity measure, an algorithm for calculating the proximity measure. A scheme for training a teacher and a machine has been proposed. The possibility of immersing finite state machines in a subject-dependent feature space has been shown. Research prospects and illustrative examples are given.

Keywords: identification of the feature space of modeling, subject-oriented approach, subject-independent and subject-dependent feature spaces, bio-inspired decision-making methods.

For citation: Lyabakh, N. N. Identification of the feature space of immersion of the decision-maker – the basis of the subject-oriented approach to the study of complex objects / N. N. Lyabakh, D. M. Inukhova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 133–140. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_133.

Сведения об авторах

Лябах Николай Николаевич

Майкопский государственный технологический университет (МГТУ),
научный руководитель
Научно-исследовательского центра цифровых,
интеллектуальных и инновационных
технологий,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: liabakh@rambler.ru

Инухова Джанета Муратовна

Майкопский государственный технологический университет (МГТУ),
аспирант,
e-mail: inukhova2001@mail.ru

Information about the authors

Lyabakh Nikolay Nikolaevich

Maikop State Technological University
(MSTU),
Scientific Director of “Research Center for
Digital, Intelligent and Innovative
Technologies”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: liabakh@rambler.ru

Inukhova Dzhaneta Muratovna

Maikop State Technological University
(MSTU),
Postgraduate Student,
e-mail: inukhova2001@mail.ru

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 21.316.825 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_141

*Н. П. Воронова***ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ**

Аннотация. Рассматривается связь конструктивной особенности сильноточных полупроводниковых терморезисторов (ПТР) с некоторыми характеристиками материала его тела. Целью настоящего исследования является изучение неравномерного поля температур в массе терморезистора, так как при определенных условиях это может влиять на устойчивость его работы. Получены результаты, подтверждающие положение о том, что градиенты температур в полупроводниковой массе терморезистора подчиняются линейному закону как относительно тока, так и относительно расстояния от оси терморезистора. В результате исследований подтверждено теоретическое утверждение о том, что градиенты температур определяются только конструктивными параметрами. Как следствие, терморезисторы коаксиального типа удовлетворяют основным требованиям повышения надежности работы ПТР.

Ключевые слова: терморезистор, температура, резистор, задача, градиент температур, температурное поле, коаксиальный терморезистор, неравномерность, теплоотдача, ось симметрии, интеграл.

Для цитирования: Воронова, Н. П. Принципы конструирования сильноточных полупроводниковых терморезисторов / Н. П. Воронова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 141–150. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_141.

Введение

Сильноточные терморезисторы в отличие от широко распространенных слаботочных обладают большой активной массой, что сопряжено со значительными выделениями тепла внутри резистора. Если в слаботочных резисторах вследствие малых тепловыделений температуру в разных точках массы можно считать одинаковой, то в сильноточных необходимость отвода значительного количества тепла приводит к появлению резко выраженных градиентов температуры. Таким образом, основной, совершенно обязательной, характеристикой сильноточных терморезисторов является наличие неравномерного поля температур в их массе, без этого они работать не могут.

Материал терморезистора обладает отрицательным температурным коэффициентом. Это обстоятельство, при наличии неравномерного поля температур, может вызвать нарушение устойчивости его работы, выражающееся в том, что в некоторых зонах материал может нагреваться до недопустимых температур и резистор через эти зоны замыкает электрическую цепь накоротко. При этом остальная масса материала охлаждается почти до температуры окружающей среды, возникают большие термические напряжения, и резистор разрушается. Таким образом, основным требованием, которое необходимо предъявлять к конструкциям терморезистора, является упорядочение температурных полей.

Конструкция терморезистора

В существующих конструкциях терморезисторов описанной выше их особенности уделяется недостаточно большое внимание, в силу чего распределение температур внутри терморезистора в значительной мере подчинено фактору случайности [1–6]. Так, например, в терморезисторах сотовой конструкции при интенсивном охлаждении в различных местах могут возникать перегревы, не поддающиеся прогнозированию.

Для уменьшения влияния фактора случайности и достижения оптимальных результатов необходимо принудительно организовать форму температурного поля, что прежде всего и следует учитывать при конструировании терморезистора [7].

Очевидно, одним из оптимальных вариантов решения задачи является такой, при котором направление вектора градиента температур согласовано с требованиями интенсификации теплоотдачи.

Из возможных форм мощных терморезисторов с принудительно направленным вектором градиента температуры рассмотрим конструкцию, получившую название *коаксиального резистора* [8–10].

Терморезистор коаксиального типа представляет собой два цилиндрических металлических (латунь, бронза) соосных электрода с полупроводниковым заполнением (рис. 1).

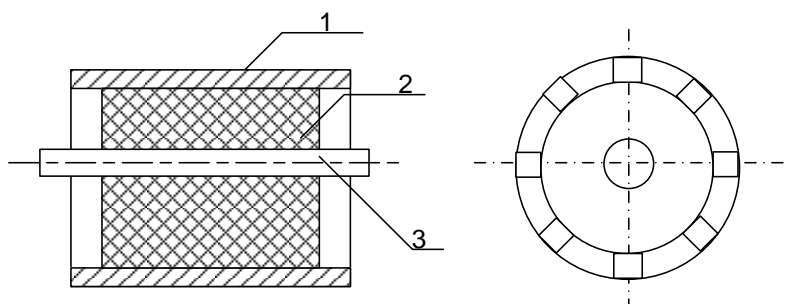


Рис. 1. Устройство терморезистора:

1 – внешний электрод; 2 – внутрипроводниковое заполнение; 3 – внутренний электрод.

Электроды изготавливаются из металла, стойкого к температурам порядка 700 К, обладающего хорошей электропроводностью и довольно высокой упругой деформацией. Внешний электрод снабжается рядом отверстий, наличие которых обусловлено технологическими причинами. Такая конструкция отличается тем, что поле плотностей тока внутри терморезистора в плоскости нормальной к оси является принципиально неравномерным и, следовательно, неравномерны поля удельных тепловыделений, температур и всех физических характеристик материала.

На первый взгляд неравномерность полей кажется дефектом конструкции, однако в действительности это не так.

Во-первых, конструкция коаксиальных терморезисторов органически обуславливает принудительное и совершенно определенное распределение плотности тока по сечению терморезистора и в связи с этим такое же определенное, четкое распределение температур, т. е. здесь удовлетворяется указанное выше требование к конструкции.

Во-вторых, градиенты температур внутри терморезистора направлены от центрального электрода к наружному, теплоотдающему электроду, т. е. соблюдается требование оптимизации условий охлаждения.

В-третьих, направления градиента температур, и, следовательно, тепловых потоков совпадают с линиями плотности тока, что еще больше способствует принудительной организации полей физических величин внутри резистора.

В-четвертых, поля температур внутри терморезистора являются плоскопараллельными, т. е. во всех плоскостях нормальных к оси терморезистора форма температурных полей одинакова (если пренебрегать концевыми эффектами и неравномерностью структуры терморезистора). Это освобождает от необходимости борьбы с термическими напряжениями, направленными вдоль оси терморезистора.

Ввиду наличия осевой симметрии и плоскопараллельного характера полей физических величин задача распределения температур и определения их градиентов в полупроводниковом заполнении может быть введена дополнительно к задаче распределения температур вдоль одной оси, что и использовано в дальнейших рассуждениях.

Вектор плотностей тока вследствие осевой симметрии направлен по радиусу терморезистора, и его модуль равен:

$$\delta = \frac{I}{2\pi r l}, \quad (1)$$

где I – ток;
 r – радиус рассматриваемого элементарного кольца;
 l – длина активной части терморезистора (рис. 2).

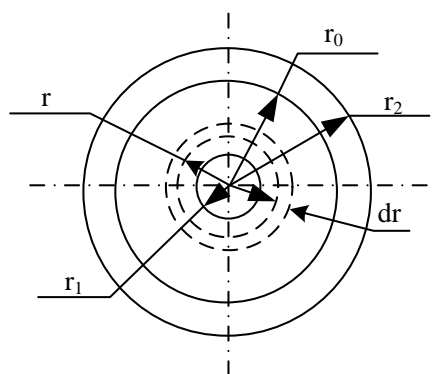


Рис. 2. Рассматриваемое элементарное кольцо

Очевидно, что величина плотностей тока обратно пропорциональна расстоянию данного элемента от оси резистора. Удельная мощность, выделяемая током, еще более неравномерна – она обратно пропорциональна квадрату расстояния от оси:

$$P = \delta^2 \rho = \frac{I^2 \rho}{2\pi r^2 l^2}. \quad (2)$$

Здесь ρ – удельное сопротивление активной массы резистора. Следовательно, резко неравномерным должно быть и поле температур.

Это обстоятельство является одним из важнейших факторов, ограничивающих мощность коаксиальных терморезисторов [11–13].

Однако имеются обстоятельства, значительно смягчающие эффект неравномерности. При полупроводниковой активной массе терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом зависимость температур от радиуса будет более сложной.

Действительно, удельное сопротивление полупроводника

$$\rho = \rho_{\infty} l_x P^{\frac{B}{T}}, \quad (3)$$

где T – температура полупроводника, К;
 ρ_{∞} – удельное сопротивление при $T = \infty$;
 B – температурная характеристика материала.

Как видно, ρ является резко выраженной функцией температуры, и поэтому температура в данных точках полупроводника является функцией двух противоположно действующих факторов: плотности тока, уменьшающейся с увеличением радиуса, и удельного сопротивления, возрастающего с увеличением того же радиуса. Суммарное воздействие этих двух взаимно противоположных факторов резко снижает эффект неравномерности, приводя его к величинам, дающим практически рациональное решение.

Так как от распределения температур внутри терморезистора зависят все его свойства (сопротивление, допустимая мощность, термостойкость и т. д.), то представляется весьма интересным выяснение зависимости $T = f(r)$ (температуры от радиуса слоя). Эта зависимость является одной из важнейших.

Дифференциальное уравнение, описывающее энергетические процессы в элементарном объеме внутри терморезистора

$$-\lambda \nabla^2 dV + \rho \delta^2 dV = 0, \quad (4)$$

где λ – удельная теплопроводность материала;
 V – объем.

Имея в виду осевую симметрию и пренебрегая концевыми эффектами, уравнение (4) можно привести к следующему виду:

$$-\lambda 2\pi r l \frac{d^2 T}{dr^2} dr + \left(\frac{I}{2\pi r l} \right)^2 \rho^2 \pi r l dr = 0. \quad (5)$$

Отсюда

$$\frac{d^2 T}{dr^2} dr = \frac{I^2}{(2\pi r l)^2} \frac{\rho^2}{r^2} dr. \quad (6)$$

Интегрируя (6) по dr , получим градиент температуры

$$\frac{dT}{dr} dr = \frac{I^2}{(2\pi)^2 \lambda} \cdot \int \frac{\rho}{r^2} dr + K_1, \quad (7)$$

где K_1 – постоянная интегрирования.

Этот интеграл непосредственно взять нельзя, т. к. зависимость $\rho = f(r)$ является неизвестной. Таким образом, градиент температур внутри резистора является сложной функцией радиуса данного элементарного кольцевого сечения.

Количество тепла, выделившегося в элементарном объеме полупроводника:

$$dV = 2\pi r l dr. \quad (8)$$

За единицу времени (т. е. мощность в объеме dV) примем

$$d\rho = \delta^2 \rho dV = \frac{I^2 \rho}{2\pi r l} dr; \quad (9)$$

то же по всей массе полупроводника

$$P = \frac{I^2}{2\pi l} \int \frac{\rho}{r} dr + K_2, \quad (10)$$

где K_2 – постоянная интегрирования.

Интеграл $\frac{\rho}{r} dr$ можно представить в следующем виде:

$$\int \frac{\rho}{r} dr = r \int \frac{\rho}{r^2} dr - f \left(\int \frac{\rho}{r^2} dr \right). \quad (11)$$

Используя (7), получим:

$$\int \frac{\rho}{r} dr = \left(\frac{dT}{dr} - K_1 \right) \frac{(2\pi l)^2 \lambda}{I^2}. \quad (12)$$

Совместно решим (11) и (12):

$$\int \frac{\rho}{r} dr = \frac{(2\pi l)^2 \lambda}{I^2} \left[r \left(\frac{dT}{dr} - K_1 \right) - \int \left(\frac{dT}{dr} - K_1 \right) dr \right], \quad (13)$$

$$\int \frac{\rho}{r} dr = \frac{(2\pi l)^2 \lambda}{I^2} \left(r \frac{dT}{dr} - K_1 \right) = \frac{(2\pi l)^2 \lambda}{I^2} \frac{rdT - Tdr}{r^2 d^2} r^2. \quad (14)$$

Отсюда

$$\int \frac{\rho}{r} dr = \frac{(2\pi l)^2 \lambda}{I^2} \cdot \frac{d(\text{grad}T)^2}{dr}. \quad (15)$$

Подставим выражение (15) в (10):

$$P = 2\pi r^2 l \lambda \frac{d(\text{grad}T)r}{dr} + K_2, \quad (16)$$

здесь $P \neq f(r)$, т. к. это полная мощность, выделяемая резистором.

$$\frac{d(\text{grad}T)_r}{dr} = \frac{P - K_2}{2\pi l \lambda} \cdot \frac{1}{r^2}, \quad (17)$$

$$d(\text{grad}T)_r = \frac{P - K_2}{2\pi l \lambda} \cdot \frac{dr}{r^2}. \quad (18)$$

Выполним интегрирование:

$$d(\text{grad}T)_r = \frac{dT}{dr} = -\frac{P - K_2}{2\pi l \lambda} \cdot \frac{1}{r} + K_3, \quad (19)$$

где K_3 – постоянная интегрирования.

Интегрируем еще раз:

$$T = -\frac{P - K_2}{2\pi l \lambda} \ln r + K_3 r + K_4. \quad (20)$$

Следует иметь в виду, что видимая сравнительно простая структура управления (20) является кажущейся, так как постоянные интегрирования K_3 и K_4 являются постоянными только для резистора с определенным материалом и отношением диаметров, т. е. для определенной связи $\rho = f(T)$ и, следовательно, $\rho = f(r)$.

Определим постоянные интегрирования.

Рассмотрим уравнение (16).

При $r = 0$; $P = 0$.

В силу осевой симметрии и отсутствия тепловыделения при $r = 0$ $(\text{grad}T)_{r=0} = 0$.

$$\frac{d(\text{grad}T)_{r=0}}{dr} \neq \infty,$$

$$K_2 = 0 \text{ и } P = 2\pi l \lambda r^2 \frac{d(\text{grad}T)_r}{dr},$$

$$T = -\frac{P}{2\pi l \lambda} \ln r + K_3 r + K_4. \quad (21)$$

Считая, что равны и соответствующие температуры $T_2 = T_3$ (что справедливо с достаточной степенью точности), мощность теплового потока, рассеиваемого резистором за счет охлаждения, можно определить следующим образом:

$$P = \alpha F (T_2 - T_{ox}) = \alpha 2\pi l r^2 (T_2 - T_{ox}), \quad (22)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от поверхности резистора к воздуху;

F – поверхность охлаждения;

T_{ox} – температура охлаждающего воздуха в К;

$r = r_2$ из уравнения (21).

$$T_2 = -\frac{P}{2\pi l \lambda} \ln r_2 + K_3 r_2 + K_4. \quad (23)$$

Решая совместно (22) и (23), определим

$$K_4 = \frac{P}{2\pi l \lambda} \ln r^2 + \frac{P}{2\pi l \lambda_2 r_2} - K_3 r_2 + T_{\text{ок}}.$$

Тогда из (21)

$$T = -\frac{P}{2\pi l \lambda} \ln \frac{r_1}{r_2} - K_3(r_2 - r) + \frac{P}{2\pi l \lambda_2 r_2} + T_{\text{ок}}. \quad (24)$$

Постоянную интегрирования K_3 можно определить только экспериментально. У реальных резисторов отношение $\frac{r_1}{r_2}$ может находиться в сравнительно узких пределах – от 0,35 до 1,0.

Зависимость $\ln \frac{r_1}{r_2} = f\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$ изображена на рис. 3.

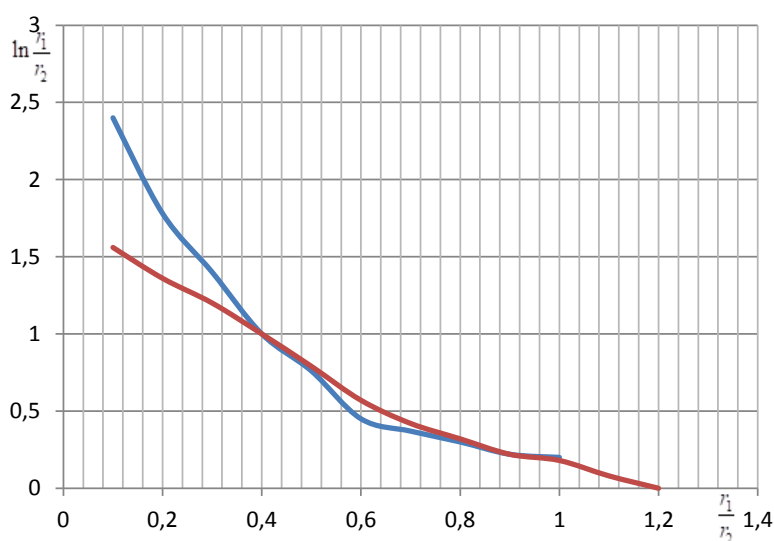


Рис. 3. Зависимость $\ln \frac{r_1}{r_2} = f\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$:

$$\ln \frac{r_1}{r_2} = -a \frac{r_1}{r_2} + b; \quad a=1,63; \quad b=1,60, \quad \text{т. е.} \quad \ln \frac{r_1}{r_2} = -1,63 \frac{r_1}{r_2} + 1,60$$

В пределах $0,4 \leq \frac{r_1}{r_2} \leq 1,0$ эту кривую можно интерпретировать с достаточной степенью точности уравнением прямой.

Максимальная погрешность, возникающая при использовании этого уравнения, не превышает 3,5 %.

Используя последнюю зависимость (25), уравнение (24) можно представить в следующем виде:

$$T = -\frac{P}{2\pi l \lambda} \left(-a \frac{r_1}{r_2} + b\right) + \frac{P}{2\pi l \lambda_2 r_2} - K_3(r_2 - r) + T_{\text{ок}}$$

или

$$T = \left(\frac{Pa}{2\pi l \lambda r_2} + K_3\right) r + \frac{P}{2\pi l} \left(\frac{1}{r_2 \lambda_2} - \frac{b}{\lambda} r\right) + (T_{\text{ок}} - K_3 r_2). \quad (25)$$

Уравнение (25) является линейным, т. е. $T = \lambda r + \beta P + \gamma$,

$$\text{где } \lambda = \frac{P_a}{2\pi l \lambda r_2} + K_3; \beta = \frac{P}{2\pi l} \left(\frac{1}{r_2 \lambda_2} - \frac{b}{\lambda} \right); \quad \gamma = T_{\text{ок}} - K_3 r_2.$$

Таким образом, видно, что с достаточно высокой степенью точности температура в данной точке зависит линейно от радиуса слоя и линейно от мощности, т. е. градиент температур в этой конструкции оказывается не слишком велик и подчиняется простой, четко выраженной зависимости, что является огромным достоинством коаксиальных терморезисторов по сравнению с другими известными конструкциями. Это в конечном итоге предопределяет достаточно высокую термостойкость резисторов [14–17].

Так как вопрос о форме зависимости $T = f(r)$ имеет кардинальное значение, а теоретические выводы содержат значительное количество допущений, полученная зависимость была проверена экспериментально,

Испытания проводились в установившемся режиме при различных значениях тока, поскольку этот режим является наиболее опасным с точки зрения распределения температур, и поэтому применительно именно к нему рассмотрена вышеизложенная теория.

В результате обработки данных опытов получена зависимость

$$T = 1,98I - \frac{43,3r}{r_1} + 471K,$$

где I – ток в амперах.

Значительный интерес представляет также зависимость температуры различных точек терморезистора от диаметра внешнего электрода, по температуре которого можно контролировать перегрев в процессе эксплуатации [18].

Приведенные результаты относятся к группе точек, расположенных в средней части терморезистора, в остальных сечениях картина аналогичная.

Таким образом, опыт подтвердил теоретические выводы, причем, сравнивая опытные данные с теоретическими формулами, можно получить коэффициенты λ , β и γ :

$$\lambda = -\frac{43,3}{r_2}; \quad \beta = \frac{19,8}{U}; \quad \gamma = 4,71.$$

Выводы

1 Несмотря на резко неравномерное поле плотностей тока, разбег температур в массе терморезисторов не очень велик и подчинен линейному закону по отношению как к току, так и к расстоянию от оси терморезистора.

2 Градиенты температур в полупроводниковой массе терморезистора не зависят от тока и определяются только конструктивными параметрами.

3 Численные результаты проведенных исследований можно переносить только на геометрически подобные резисторы; полученные же функциональные связи (управления в общем виде) и сделанные общие выводы могут быть распространены на любые типы коаксиальных резисторов.

4 Терморезисторы коаксиальной конструкции удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к конструкциям терморезисторов в части обеспечения упорядоченности полей физических величин и повышения надежности работы терморезисторов.

Список литературы

1 Колпахчян, П. Г. Особенности создания асинхронного тягового электропривода магистральных электровозов / П. Г. Колпахчян, А. А. Зарифьян // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2007. – № 2 (11). – С. 160–169. – ISSN 1815-588X.

References

1 Kolpakhchyan, P. G. Features of the creation of an asynchronous traction electric drive of mainline electric locomotives / P. G. Kolpakhchyan, A. A. Zarifian / Proceedings of Petersburg Transport University. – 2007. – No. 2 (11). – P. 160–169. – ISSN 1815-588X.

2 Математическое моделирование и определение параметров регулирования линейной электрической машины возвратно-поступательного действия / П. Г. Колпахчян, В. Г. Щербakov, А. Е. Кочин, А. Р. Шайхiev // Электротехника. – 2007. – № 5. – С. 18–24. – ISSN 0013-5860.

3 **Ворон, О. А.** Совершенствование системы электроснабжения изотермического подвижного состава / О. А. Ворон, М. М. Туляганов, А. Д. Петрушин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (53). – С. 28–32. – ISSN 1818-5509.

4 **Швалов, Д. В.** Существующие и перспективные методы контроля технического состояния стрелочных электродвигателей постоянного тока / Д. В. Швалов, Е. А. Булат // Цифровые инфокоммуникационные технологии : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 184–187. – EDN QOHNON.

5 **Зарифьян, А. А.** Моделирование тягового электропривода локомотива в ПК MATLAB/SIMULINK / А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян, В. В. Сироткин // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Т. 1. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2017. – С. 131–135. – EDN YSNZFFQ.

6 **Патент на изобретение RU 2058604 C1.** Полупроводниковый терморезистор / К. А. Тузовский, В. М. Андреев, Д. В. Зиновьев, А. А. Гришаев. – № 93031956/07 ; заявл. 16.06.1993 ; опубл. 20.04.1996.

7 Моделирование тепловых процессов в терморезисторах с положительным коэффициентом сопротивления / В. Н. Шут, С. Р. Сырцов, Е. Л. Гавриленко, А. В. Гаврилов // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, № 4. – С. 97–101. – ISSN 0021-0285.

8 **Косминов, Т. Р.** Терморезисторы на основе гидроксипатита / Т. Р. Косминов, Е. А. Тарасов, Ю. В. Зайцев // Новая наука: теоретический и практический взгляд. – 2016. – № 2–2 (63). – С. 212–215. – ISSN 2412-9720.

9 Электрические и тепловые процессы в электрических цепях с терморезисторами / А. С. Богатин, В. Н. Богатина, С. А. Ковригина, И. О. Носачев // Проблемы учебного физического эксперимента : сборник научных трудов / Российская академия образования. – Глазов, 2017. – С. 59–60. – EDN ZBDCGR.

10 **Гаврилов, А. В.** Методы повышения устойчивости терморезисторов к электрическим нагрузкам / А. В. Гаврилов // Актуальные проблемы прочности : сборник материалов 50-го

2 Mathematical modeling and determination of control parameters of a linear electric reciprocating machine / P. G. Kolpakhchyan, V. G. Shcherbakov, A. E. Kochin, A. R. Shaikhiev // Electrical Engineering. – 2007. – No. 5. – P. 18–24. – ISSN 0013-5860.

3 **Voron, O. A.** Improving the power supply system of isothermal rolling stock / O. A. Voron, M. M. Tulyaganov, A. D. Petrushin // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (53). – P. 28–32. – ISSN 1818-5509.

4 **Shvalov, D. V.** Existing and promising methods for monitoring the technical condition of DC pointer electric motors / D. V. Shvalov, E. A. Bulat // Digital Infocommunication Technologies : collection of scientific papers. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 184–187. – EDN QOHNON.

5 **Zarifyan, A. A.** Modeling of locomotive traction electric drive in the MATLAB/SIMULINK PC / A. A. Zarifyan, P. G. Kolpakhchyan, V. V. Sirotkin // Transport : Science, Education, Production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference. Vol. 1. – Rostov-on-Don : RSTU, 2017. – P. 131–135. – EDN YSNZFFQ.

6 **Patent for invention RU 2058604 C1.** Semiconductor thermistor / K. A. Tuzovsky, V. M. Andreev, D. V. Zinoviev, A. A. Grishaev. – No. 93031956/07 ; declared 16.06.1993 ; publ. 20.04.1996.

7 Modeling of thermal processes in thermistors with a positive resistance coefficient / V. N. Shut, S. R. Syrtsov, E. L. Gavrilenko, A. V. Gavrilov Gavrilov // Engineering Physics Journal. – 2005. – Vol. 78, No. 4. – P. 97–101. – ISSN 0021-0285.

8 **Kosminov, T. R.** Hydroxyapatite-based thermistors / T. R. Kosminov, E. A. Tarasov, Yu. V. Zaitsev // New Science: Theoretical and Practical View. – 2016. – No. 2–2 (63). – P. 212–215. – ISSN 2412-9720.

9 Electrical and thermal processes in electrical circuits with thermistors / A. S. Bogatin, V. N. Bogatina, S. A. Kovrigina, I. O. Nosachev // Problems of Educational Physical Experiment : collection of scientific papers / Russian Academy of Education. – Glazov, 2017. – P. 59–60. – EDN ZBDCGR.

10 **Gavrilov, A. V.** Methods for increasing the resistance of thermistors to electrical loads / A. V. Gavrilov // Current Problems of Strength : collection of materials of the 50th International Scientific Symposium. – Vitebsk, 2010. – P. 35–38.

Международного научного симпозиума. – Витебск, 2010. – С. 35–38.

11 **Шут, В. Н.** Влияние конфигурации электродов на термоупругие напряжения в ПТКС терморезисторах / В. Н. Шут, А. В. Гаврилов, Д. А. Ильющенко // Актуальные проблемы прочности : материалы 53-й Международной научной конференции : в 2 ч. – Витебск, 2012. – С. 34–37.

12 **Носков, В. Н.** Использование термозависимых поликристаллических сопротивлений в пусковых устройствах электрических двигателей подъемно-транспортных машин / В. Н. Носков, Н. П. Воронова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 3 (100). – С. 39–45. – DOI 10.30987/1999-8775-2021-3-39-45.

13 Эффективные устройства защиты от аварийных режимов работы / С. В. Оськин, Г. М. Оськина, А. В. Мирошников, А. С. Макаренко // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2018. – № 1 (33). – С. 118–126. – ISSN 2305-6843.

14 **Воронова, Н. П.** Влияние геометрических параметров и электрофизических характеристик на работу полупроводниковых терморезисторов коаксиального типа / Н. П. Воронова // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 17–22. – ISBN 978-5-907295-50-6.

15 **Тутов, Е. А.** Особенности проводимости поликристаллического ванадия на переменном токе / Е. А. Тутов, П. И. Крюков, В. П. Зломанов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2014. – Т. 16, № 2. – С. 220–224. – ISSN 1606-867X.

16 **Воронова, Н. П.** Поликристаллические термозависимые полупроводниковые сопротивления коаксиального типа и пусковые устройства на их основе / Н. П. Воронова, М. А. Трубицин, Е. Ю. Микаэлян // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823 (дата обращения: 29.11.2024).

17 **Воронова, Н. П.** Электрофизические и тепловые характеристики полупроводниковых термосопротивлений коаксиального типа / Н. П. Воронова, М. А. Трубицин // Инженерный вестник Дона, 2018. – № 2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823 (дата обращения: 27.11.2024).

18 **Воронова, Н. П.** Оптимизация пусковых процессов с использованием полупроводниковых терморезисторов / Н. П. Воронова, М. А. Трубицин // Инженерный вестник Дона. –

11 **Shut, V. N.** Influence of electrode configuration on thermoelastic stresses in PTCS thermistors / V. N. Shut, A. V. Gavrilov, D. A. Ilyushchenko // Current Problems of Strength : materials of the 53rd International Scientific Conference : in 2 parts. – Vitebsk, 2012. – P. 34–37.

12 **Noskov, V. N.** Use of temperature-dependent polycrystalline resistances in starting devices of electric motors of hoisting-and-transport machines / V. N. Noskov, N. P. Voronova // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2021. – No. 3 (100). – P. 39–45. – DOI 10.30987/1999-8775-2021-3-39-45.

13 Effective devices for protection against emergency operating modes / S. V. Oskin, G. M. Oskina, A. V. Miroshnikov, A. S. Makarenko // Emergencies: Industrial and Environmental Safety. – 2018. – No. 1 (33). – P. 118–126. – ISSN 2305-6843.

14 **Voronova, N. P.** Influence of geometric parameters and electrophysical characteristics on the operation of coaxial semiconductor thermistors / N. P. Voronova // Transport Power Engineering. Topical problems and tasks : collection of scientific papers of the V International scientific and practical conference. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 17–22. – ISBN 978-5-907295-50-6.

15 **Tutov, E. A.** Features of the conductivity of polycrystalline vanadium on alternating current / E. A. Tutov, P. I. Kryukov, V. P. Zlomanov // Condensed Matter and Interphases. – 2014. – Vol. 16, No. 2. – P. 220–224. – ISSN 1606-867X.

16 **Voronova, N. P.** Polycrystalline temperature-dependent semiconductor resistances of coaxial type and starting devices based on them / N. P. Voronova, M. A. Trubitsyn, E. Yu. Mikaelyan // Engineering Journal of Don. – 2015. – No. 3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823 (date of access: 11/29/2024).

17 **Voronova, N. P.** Electrophysical and thermal characteristics of coaxial semiconductor thermal resistors / N. P. Voronova, M. A. Trubitsin // Engineering Journal of Don, 2018. – No. 2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4823 (date of access: 11/27/2024).

18 **Voronova, N. P.** Optimization of starting processes using semiconductor thermistors / N. P. Voronova, M. A. Trubitsin // Engineering Journal of Don. – 2020. – No. 8 (68). – P. 77–84. – URL:

2020. – № 8 (68). – С. 77–84. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6585 (date of access: 11/25/2024).
(дата обращения: 25.11.2024).

N. P. Voronova

PRINCIPLES OF DESIGNING HIGH-CURRENT SEMICONDUCTOR THERMISTORS

Abstract. The connection of the design feature of high-current semiconductor thermistors (SCT) with some characteristics of the material of their body is considered. The purpose of this research is to study the non-uniform temperature field in the mass of a thermistor, since under certain conditions this can affect the stability of its operation. The results obtained confirm the position that the temperature gradients in the semiconductor mass of the thermistor obey a linear law both with respect to current and with respect to the distance from the axis of the thermistor. As a result of the research, the theoretical statement that temperature gradients are determined only by design parameters has been confirmed. As a consequence, coaxial type thermistors meet the basic requirements for improving the reliability of the SCT.

Keywords: thermistor, temperature, resistor, problem, temperature gradient, temperature field, coaxial thermistor, non-uniformity, heat transfer, symmetry axis, integral.

For citation: Voronova, N. P. Principles of designing high-current semiconductor thermistors / N. P. Voronova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 141–150. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_141.

Сведения об авторах

Воронова Наталья Павловна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы
электротехники»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: voronova044@inbox.ru

Information about the authors

Voronova Natalya Pavlovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Foundations of Electrical
Engineering”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: voronova044@inbox.ru

О. В. Кубкина

ОЦЕНКА ПРОТЯЖЕННОСТИ ЗОН ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ 25 кВ

Аннотация. В современных условиях эксплуатации тяговой сети возникает необходимость в надежной защите от коротких замыканий. Эффективным решением данной задачи стало внедрение микропроцессорных релейных защит, которые интегрированы в состав программируемых логических контроллеров. Эти устройства обладают высокой степенью автоматизации и способны быстро реагировать на изменения в электрической сети, что существенно повышает уровень безопасности. Однако, несмотря на высокую степень надежности таких систем, существует ряд вопросов, касающихся их функциональности. В статье рассмотрена возможность и целесообразность функционального диагностирования релейных защит путем увеличения числа измерительных блоков, входящих в систему защиты. В качестве критериев оценки эффективности предлагаемого способа приняты вероятность выявления отказа срабатывания измерительного блока до момента, когда он должен выполнять свои функции и вероятность выявления ложного (излишнего) срабатывания. Первый критерий помогает оценить изменения в аппаратной и программной надежности системы защиты при внедрении функционального контроля. Второй необходим для оценки эффективности контроля с точки зрения изменения функциональной надежности защиты, а также логической и информационной совместимости защиты с другими функциями автоматизации.

Ключевые слова: электротяговые сети, релейная защита, функциональная диагностика, короткое замыкание.

Для цитирования: Кубкина, О. В. Оценка протяженности зон функционального диагностирования релейной защиты тяговой сети 25 кВ / О. В. Кубкина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 151–158. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_151.

Введение

В современных условиях для защиты тяговой сети от коротких замыканий широко применяются микропроцессорные релейные защиты в составе программируемых логических контроллеров. Многофункциональность таких устройств, а также их технические характеристики предопределяют тенденцию расширения состава (увеличение числа) дополнительных защит и защит ближнего резервирования, применяемых для защиты от коротких замыканий в системе тягового электроснабжения 25 кВ. Кроме того, необходимо отметить, что применение в качестве базовых для построения релейной защиты открытых программируемых устройств, предусматривающих сетевое взаимодействие, упрощает решение задачи организации продольных и поперечных связей между защитами основной и смежных межподстанционных зон.

В связи с этим представляется интересным рассмотрение возможности и целесообразности функционального диагностирования, по результатам которого могут быть выявлены неверные действия релейной защиты (отказы в срабатывании, ложные или излишние срабатывания) при коротком замыкании на межподстанционной зоне.

Теоретически увеличение числа измерительных блоков, входящих в систему защиты, должно привести к увеличению эффективности диагностирования. Необходимо отметить, что в качестве критериев эффективности могут рассматриваться:

– вероятность выявления отказа срабатывания измерительного блока до момента возникновения необходимости выполнения им своих функций. Применение данного критерия позволяет оценить изменение аппаратной и программной надежности системы защиты при применении функционального контроля [1–2];

– вероятность выявления ложного (излишнего) срабатывания. Данный критерий необходим для оценки эффективности контроля с точки зрения изменения функциональной надежности защиты, а также логической и информационной совместимости защиты с другими функциями автоматизации [3–5].

Статья посвящена рассмотрению данного вопроса.

Логические зависимости выявления неверных действий релейной защиты

Принципы функционального контроля релейной защиты тяговой сети, основанные на логическом анализе состава «сработавших» и не «сработавших» на короткое замыкание измерительных блоков, имеющих различные границы защищаемых зон, изложены в [6–7]. Методика оценки эффективности контроля [8] основана на соотношении и протяженности зон диагностирования. При этом под зоной диагностирования понимается участок межподстанционной зоны, при коротком замыкании на котором выявляется соответствующий вид неверного действия контролируемого измерительного блока.

Для определения зон диагностирования необходимо классифицировать измерительные блоки и сформировать систему логических уравнений определения неверных действий релейной защиты. Наиболее просто задача решается путем построения и анализа графика селективности защит рассматриваемой межподстанционной зоны.

Рассмотрим абстрактную защиту, функциональный состав которой и протяженности зон действия измерительных блоков определены в соответствии с [9]. На рис. 1. представлены узловая схема питания межподстанционной зоны АВ (а) и графики селективности защит присоединений контактной сети на тяговой подстанции А (б) и на посту секционирования ПС (в). В состав защит присоединений подстанции и поста секционирования входят: токовая отсечка (ТО), дистанционная защита первой ступени (ДЗ1), дистанционная защита второй ступени (ДЗ2), дистанционная защита третьей ступени (ДЗ3), дистанционная защита четвертой ступени (ДЗ4). Комплект защит поста секционирования дополнен защитой минимального напряжения (ЗМН), Δt – выдержка времени срабатывания защиты.

Зоны действия защит со стороны подстанции В симметричны по отношению к приведенным на рис. 1. При определении протяженности зон диагностирования необходимо учитывать зоны действия защит подстанций и постов секционирования смежных по отношению к рассматриваемой межподстанционных зон.

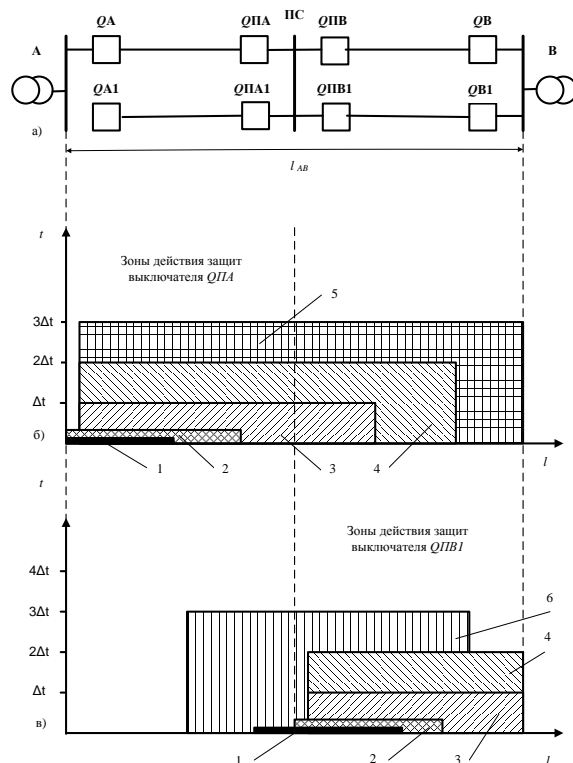


Рис. 1. Схема питания межподстанционной зоны (а) и графики селективности защит присоединений контактной сети на тяговой подстанции А (б) и на посту секционирования ПС (в):

1 – зона действия ТО; 2 – зона действия ДЗ1; 3 – зона действия ДЗ2; 4 – зона действия ДЗ3; 5 – зона действия ДЗ4; 6 – зона действия ЗМН

В табл. 1 приведен состав и протяженность зон действия измерительных блоков. Необходимо учитывать, что очевидная нестабильность приведенных значений протяженности зон действия ограничена требованием выполнения принципов селективности и устойчивости функционирования.

Таблица 1

Протяженность зон действия измерительных защит

Место установки	Наименование защиты	Направленность действия	Защищаемая зона
Подстанция А	Токовая отсечка	-	не более $0,5 \cdot l_{АП}$
	Дистанционная защита первой ступени	+	не более $0,8 \cdot l_{АП}$
	Дистанционная защита второй ступени	+	не более $1,2 \cdot l_{АП}$
	Дистанционная защита третьей ступени	+	не менее $1,5 \cdot l_{АВ}$
	Дистанционная защита четвертой ступени	-	не менее $0,7 \cdot l_{АП}$
Пост секционирования	Токовая отсечка	-	не более $0,5 \cdot l_{ПВ}$
	Дистанционная защита первой ступени	+	не более $0,9 \cdot l_{ПВ}$
	Дистанционная защита второй ступени	+	не менее $1,2 \cdot l_{ПВ}$
	Дистанционная защита третьей ступени	+	не менее $1,5 \cdot l_{ПВ}$

Как уже отмечалось выше, для определения протяженности зон диагностирования релейных защит рассматриваемой межподстанционной зоны необходимо сформировать систему логических уравнений идентификации неверных действий измерительных блоков защит. Формирование уравнений и последующую оценку протяженности зон диагностирования в зависимости от состава и объема первичной информации будем производить применительно к защитах присоединения $QA1$ (см. рис. 1). Симметричность графика селективности позволяет предположить аналогичность результатов оценки для защит других присоединений. При формировании логических зависимостей приняты следующие обозначения:

- С – срабатывание измерительного блока;
- Н – несрабатывание измерительного блока;
- ПА – защита присоединения подстанции А;
- ПВ – защита присоединения подстанции В;
- ПС – защита присоединения поста секционирования;
- ПС_А – защита присоединения поста секционирования с защищаемой зоной в сторону подстанции А;
- ПС_В – защита присоединения поста секционирования с защищаемой зоной в сторону подстанции В;
- П_{Алев} – защита присоединения подстанции «слева» от подстанции А;
- ПС_{Впр} – защита присоединения поста секционирования «справа» от подстанции В с защищаемой зоной в сторону подстанции В;
- ПС_{Алев} – защита присоединения поста секционирования «слева» от подстанции А, с защищаемой зоной в сторону подстанции А.

Логические зависимости выявления отказов в срабатывании и ложных срабатываний измерительных блоков защит, установленных на присоединениях подстанции А представлены в табл. 2.

Таблица 2

Логические зависимости выявления неверных действий релейной защиты

Измерительный блок	Неверное действие	Логические зависимости
1	2	3
ТО	ложное срабатывание	$S(ТО ПА) \wedge N((ДЗ 1 ПА) \vee (ДЗ 2 ПА) \vee (ДЗ 3 ПА) \vee (ДЗ 4 ПА)) \wedge N((ДЗ 1 ПА) \vee (ДЗ 2 ПА) \vee (ДЗ 3 ПА) \vee (ДЗ 4 ПА) \vee ДЗ 1 ПС_A)$
	отказ в срабатывании	$N(ТО ПА) \wedge S((ДЗ 1 ПА) \vee (ДЗ 2 ПА) \vee (ДЗ 3 ПА) \vee (ДЗ 4 ПА)) \wedge N((ТО ПС_A \vee (ДЗ 1 ПС_A))$
ДЗ 1	ложное срабатывание	$S(ДЗ 1 ПА) \wedge N((ТО ПА) \vee (ДЗ 1 ПА) \vee (ДЗ 2 ПА) \vee (ДЗ 3 ПА) \vee (ДЗ 4 ПА)) \wedge N((ТО ПА) \vee (ДЗ 1 ПА) \vee (ДЗ 2 ПА) \vee (ДЗ 3 ПА) \vee (ДЗ 4 ПА) \vee (ТО ПС_A) \vee (ДЗ 1 ПС_A))$
	отказ в срабатывании	$N(ДЗ 1 ПА) \wedge S((ТО ПА) \vee (ДЗ 4 ПА)) \wedge S((ДЗ 3 ПА) \vee (ДЗ 2 ПА) \vee (ДЗ 2 ПС_{Алев}) \vee (ДЗ 3 ПС_{Алев}) \vee (ТО ПС_A) \vee (ДЗ 1 ПС_A) \vee (ДЗ 2 ПС_A) \vee (ДЗ 3 ПС_A) \vee (ДЗ 3 ПВ) \vee (ДЗ 3 П_{Алев}))$ $N(ДЗ 1 ПА) \wedge S((ТО ПА) \vee (ДЗ 4 ПА)) \wedge N(ДЗ 2 ПВ)$

Окончание табл. 2

1	2	3
ДЗ 2	ложное срабатывание	$S(DЗ 2 ПА) \wedge H((ТО ПА) \wedge H((DЗ 1 ПА) \vee (DЗ 3 ПА) \vee (DЗ 4 ПА) \vee (ТО ПС_A) \vee (DЗ 1 ПС_A) \vee (ТО ПС_B) \vee (DЗ 1 ПС_B) \vee (ТО ПВ) \vee (DЗ 1 ПВ) \vee (DЗ 2 ПВ) \vee (DЗ 3 ПВ))) \wedge H((ТО ПА) \wedge H((DЗ 1 ПА) \vee (DЗ 3 ПА) \vee (DЗ 4 ПА) \vee (ТО ПС_A) \vee (DЗ 1 ПС_A) \vee (ТО ПС_B) \vee (DЗ 1 ПС_B) \vee (ТО ПВ) \vee (DЗ 1 ПВ) \vee (DЗ 2 ПВ) \vee (DЗ 3 ПВ)))$ $S(DЗ 2 ПА) \wedge S((DЗ 3 ПА) \vee (ТО ПС_A) \vee (DЗ 1 ПС_A) \vee (DЗ 2 ПС_A) \vee (DЗ 3 ПС_A)) \wedge H(DЗ 1 ПВ)$
	отказ в срабатывании	$H(DЗ 2 ПА) \wedge S((ТО ПА) \vee (DЗ 1 ПА) \vee (DЗ 4 ПА) \vee (ТО ПС_A) \vee (DЗ 1 ПС_A)) \wedge S((DЗ 3 ПА) \vee (ТО ПС_B) \vee (DЗ 1 ПС_B) \vee (DЗ 2 ПС_B) \vee (DЗ 3 ПС_B) \vee (DЗ 1 ПВ) \vee (DЗ 2 ПВ))$
ДЗ 3	ложное срабатывание	$S(DЗ 3 ПА) \wedge H((ТО ПА) \vee (DЗ 1 ПА) \vee (DЗ 2 ПА) \vee (DЗ 4 ПА) \vee (ТО ПС_A) \vee (DЗ 1 ПС_A) \vee (ТО ПС_B) \vee (DЗ 1 ПС_B) \vee (DЗ 2 ПС_B) \vee (DЗ 3 ПС_B) \vee (ТО ПВ) \vee (DЗ 1 ПВ) \vee (DЗ 2 ПВ) \vee (DЗ 4 ПВ)) \wedge H((ТО ПА) \vee (DЗ 1 ПА) \vee (DЗ 2 ПА) \vee (DЗ 4 ПА) \vee (ТО ПС_A) \vee (DЗ 1 ПС_A) \vee (ТО ПС_B) \vee (DЗ 1 ПС_B) \vee (DЗ 2 ПС_B) \vee (DЗ 3 ПС_B) \vee (ТО ПВ) \vee (DЗ 1 ПВ) \vee (DЗ 2 ПВ) \vee (DЗ 4 ПВ))$
	отказ в срабатывании	$H(DЗ 3 ПА) \wedge S((ТО ПА) \vee (DЗ 1 ПА) \vee (DЗ 2 ПА) \vee (DЗ 4 ПА) \vee (ТО ПС_A) \vee (DЗ 1 ПС_A) \vee (ТО ПС_B) \vee (DЗ 1 ПС_B) \vee (DЗ 2 ПС_B) \vee (DЗ 3 ПС_B) \vee (ТО ПВ) \vee (DЗ 1 ПВ) \vee (DЗ 2 ПВ) \vee (DЗ 4 ПВ)) \wedge S((ТО ПА) \vee (DЗ 1 ПА) \vee (DЗ 2 ПА) \vee (DЗ 4 ПА) \vee (ТО ПС_A) \vee (DЗ 1 ПС_A) \vee (ТО ПС_B) \vee (DЗ 1 ПС_B) \vee (DЗ 2 ПС_B) \vee (DЗ 3 ПС_B) \vee (ТО ПВ) \vee (DЗ 1 ПВ) \vee (DЗ 2 ПВ) \vee (DЗ 4 ПВ))$
ДЗ 4	ложное срабатывание	$S(DЗ 4 ПА) \wedge H((ТО ПА) \vee (DЗ 1 ПА) \vee (DЗ 2 ПА) \vee (DЗ 3 ПА) \vee (ТО ПС_A) \vee (DЗ 1 ПС_A) \vee (DЗ 2 ПС_A) \vee (DЗ 3 ПС_A) \vee (DЗ 3 ПВ)) \wedge H((ТО ПА) \vee (DЗ 1 ПА) \vee (DЗ 2 ПА) \vee (DЗ 3 ПА) \vee (ТО ПС_A) \vee (DЗ 1 ПС_A) \vee (DЗ 2 ПС_A) \vee (DЗ 3 ПС_A) \vee (DЗ 3 ПВ))$
	отказ в срабатывании	$H(DЗ 4 ПА) \wedge S((ТО ПА) \wedge S((DЗ 1 ПА) \vee (DЗ 2 ПА) \vee (DЗ 3 ПА)))$ $H(DЗ 4 ПА) \wedge S((ТО ПА) \vee (DЗ 1 ПА) \vee (DЗ 2 ПА) \vee (DЗ 3 ПА) \wedge H((ТО ПС_A) \vee (DЗ 1 ПС_A))$

Оценка зон диагностирования измерительных блоков защит

Основными параметрами, влияющими на эффективность диагностирования, применительно к рассматриваемому способу, являются: надежность характеристики защиты и частота проверок, которая определяется интенсивностью коротких замыканий на межподстанционной зоне и протяженностью зоны диагностирования. Анализ логических зависимостей выявления неверных действий защиты позволяет определить протяженность зоны диагностирования каждого измерительного блока. Логические зависимости сформированы по результатам рассмотрения графика селективности защит присоединений, питающих три межподстанционных зоны: зону между подстанциями А и В, с постом секционирования посередине (контрольная) и аналогичные по структуре и схеме питания межподстанционные зоны слева и справа от нее. Очевидно, что протяженность зон диагностирования определяется числом защит, реакция которых на короткое замыкание в пределах контрольной зоны принимается в рассмотрение. Исходя из этого, в соответствии с [6–7] были определены различные варианты формирования массивов первичной диагностической информации (МПДИ) (табл. 3).

Таблица 3

Варианты формирования массивов первичной диагностической информации

Номер варианта формирования МПДИ	Источники формирования первичной информации
1	присоединение ПА
2	присоединение ПА + ПС + ПВ
3	присоединение ПА + ПС + ПВ + ПС _{Алев.}
4	присоединение ПА + ПС + ПВ + ПС _{Алев.} + ПС _{Впр.}
5	присоединение ПА + ПС + ПВ + ПС _{Алев.} + ПС _{Впр.} + П _{Алев.}

Протяженности зон диагностирования защит присоединения подстанции А представлены на рис. 2.

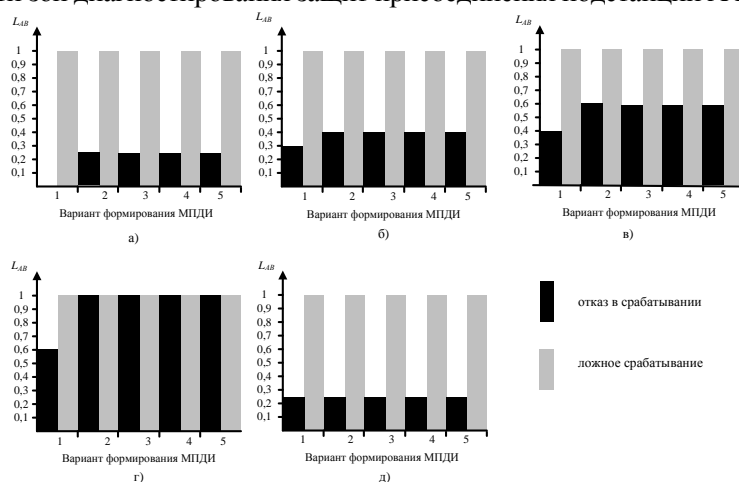


Рис. 2. Протяженность зон диагностирования ТО (а), ДЗ 1 (б), ДЗ 2 (в), ДЗ 3 (г), ДЗ 4 (д)

В соответствии с [8] рассчитаны вероятности осуществления одной проверки, выявляющей отказ в срабатывании соответствующей защиты, в зависимости от сезонного потока коротких замыканий. Вероятность безотказной работы защиты в режиме поступления требования на срабатывание принималась равной 0,99. Полученные зависимости представлены на рис. 3.

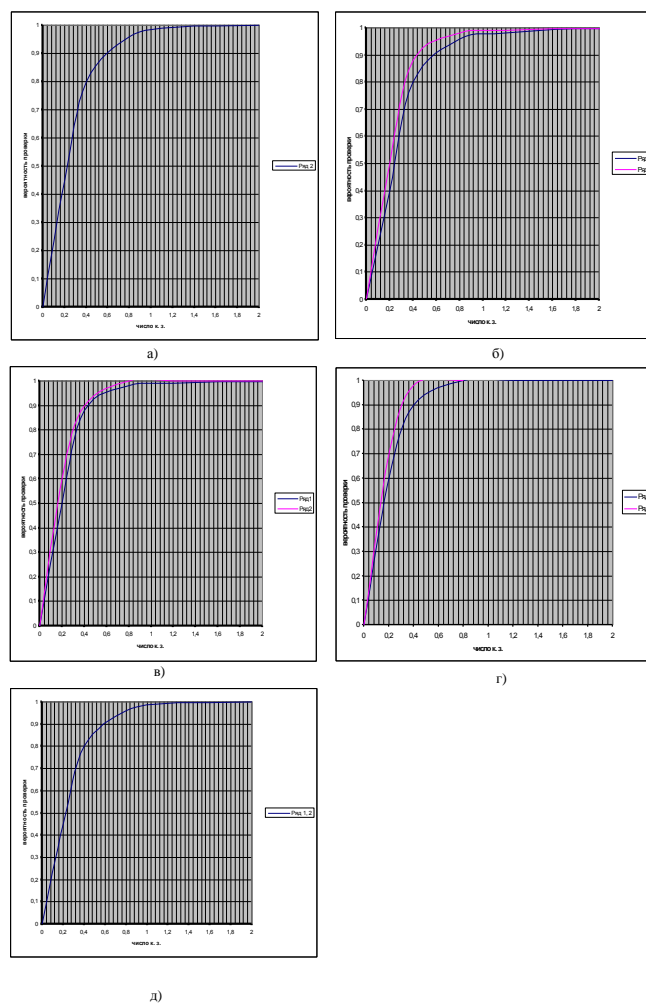


Рис. 3. Зависимости вероятности проверки от потока коротких замыканий ТО (а), ДЗ 1 (б), ДЗ 2 (в), ДЗ 3 (г), ДЗ 4 (д):

ряд 1 – первый вариант формирования МПДИ; ряд 2 – второй вариант формирования МПДИ

Выводы

Определена зависимость протяженности зоны диагностирования защиты от числа измерительных блоков, входящих в ее состав и от мест сбора первичной информации. Практическая реализация рассматриваемых вариантов формирований МПДИ возможна при наличии на участке дороги современных средств автоматизации, взаимодействующих друг с другом с применением сетевых технологий [10].

Доказано предположение о том, что увеличение структурной избыточности защит и объемов обрабатываемой первичной диагностической информации повышает эффективность выявления неверных действий защиты. Как следует из рис. 2, максимальная эффективность контроля обеспечивается вторым способом формирования МПДИ. Затраты ресурсов на реализацию 3, 4 и 5 способов нецелесообразны.

Полученные результаты позволяют оценить целесообразность и эффективность применения рассматриваемого способа выявления неверных действий релейной защиты применительно к реальному участку тяговой сети 25 кВ.

Список литературы

- 1 **Типикина, А. П.** Оценка программной надежности микропроцессорных релейных защит / А. П. Типикина, Л. С. Певцова // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Т. 7, № 2. – DOI 10.15862/74TVN215.
- 2 Анализ надежности электроснабжения транспортных систем в зависимости от состояния устройств релейной защиты и автоматики / А. А. Лундалин, Е. Ю. Пузина, И. А. Худонов, В. В. Кашковский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 3 (63). – С. 127–135. – DOI 10.26731/1813-9108.2019.3(63).127-135.
- 3 Комплексное решение прикладных технологических задач автоматизации тягового электроснабжения / Ю. И. Жарков, О. В. Кубкина, В. Г. Лысенко, Н. А. Попова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (81). – С. 130–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_130.
- 4 **Лысенко, В. Г.** Алгоритм автоматического повторного включения тяговой сети переменного тока / В. Г. Лысенко, О. В. Кубкина // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт-2014». Часть 2. Технические науки. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2014. – С. 287–289. – ISBN 978-5-88814-360-5.
- 5 **Лысенко, В. Г.** Определение границ участка тяговой сети с устойчивым коротким замыканием / В. Г. Лысенко, О. В. Кубкина, Н. А. Попова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (77). – С. 145–152. – ISSN 0201-727X.
- 6 **Лысенко, В. Г.** Автоматический контроль правильности функционирования релейной защиты тяговой сети / В. Г. Лысенко, О. В. Кубкина, М. В. Кирпинская // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 3. – С. 142–146. – ISSN 0201-727X.

References

- 1 **Tipikina, A. P.** Evaluation of software reliability of microprocessor relay protection / A. P. Tipikina, L. S. Pevtsova // Internet journal "Naukovedeniye". – 2015. – Vol. 7, No. 2. – DOI 10.15862/74TVN215.
- 2 Analysis of the reliability of power supply of transport systems depending on the state of relay protection and automation devices / A. A. Lundalin, E. Yu. Puzina, I. A. Khudonogov, V. V. Kashkovsky // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2019. – No. 3 (63). – P. 127–135. – DOI 10.26731/1813-9108.2019.3(63).127-135.
- 3 Integrated solution of applied technological problems of traction power supply automation / Yu. I. Zharkov, O. V. Kubkina, V. G. Lysenko, N. A. Popova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (81). – P. 130–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_130.
- 4 **Lysenko, V. G.** Algorithm for automatic reconnection of AC traction network / V. G. Lysenko, O. V. Kubkina // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Transport-2014". Part 2. Technical sciences. – Rostov-on-Don : RSTU, 2014. – P. 287–289. – ISBN 978-5-88814-360-5.
- 5 **Lysenko, V. G.** Determination of the boundaries of a traction network section with a stable short circuit / V. G. Lysenko, O. V. Kubkina, N. A. Popova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 1 (77). – P. 145–152. – ISSN 0201-727X.
- 6 **Lysenko, V. G.** Automatic control of the correct functioning of the relay protection of the traction network / V. G. Lysenko, O. V. Kubkina, M. V. Kirpinskaya // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2013. – No. 3. – P. 142–146. – ISSN 0201-727X.

7 **Жарков, Ю. И.** Автоматизация диагностирования систем релейной защиты и автоматики электроустановок / Ю. И. Жарков, В. Г. Лысенко, Е. А. Стороженко. – Москва : Маршрут, 2005. – 178 с. – ISBN 5-89035-253-9.

8 **Лысенко, В. Г.** Оценка эффективности контроля правильности функционирования устройств релейной защиты / В. Г. Лысенко, О. В. Кубкина // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2016. – С. 287–289. – ISBN 978-5-88814-446-6.

9 Стандарт ОАО «РЖД». Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока. СТО РЖД 07.021.4–2015 : утвержден Распоряжением ОАО «РЖД» от 07.04.2016 № 615р.

10 **Доманский, В. В.** Информационные технологии режимов работы тягового электроснабжения и питающих их систем / В. В. Доманский, Г. А. Доманская, В. А. Васенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3 (79). – ISSN 0201-727X.

7 **Zharkov, Yu. I.** Automation of diagnostics of relay protection systems and automation of electrical installations / Yu. I. Zharkov, V. G. Lysenko, E. A. Storozhenko. – Moscow : Marshrut, 2005. – 178 p. – ISBN 5-89035-253-9.

8 **Lysenko, V. G.** Evaluation of the efficiency of monitoring the correct functioning of relay protection devices / V. G. Lysenko, O. V. Kubkina // Transport : science, education, production : collection of scientific papers. – Rostov-on-Don : RSTU, 2016. – P. 287–289. – ISBN 978-5-88814-446-6.

9 Standard of JSC “Russian Railways”. Protection of railway power supply systems from short circuits and overload. Part 4. Methodology for selecting protection settings in an AC traction power supply system. STO RZD 07.021.4–2015 : approved by the Order of JSC “Russian Railways” dated 07.04.2016 No. 615r.

10 **Domansky, V. V.** Information technologies of operating modes of traction power supply and their supply systems / V. V. Domansky, G. A. Domanskaya, V. A. Vasenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 3 (79). – ISSN 0201-727X.

O. V. Kubkina

ASSESSMENT OF THE EXTENSION OF FUNCTIONAL DIAGNOSTICS ZONES OF RELAY PROTECTION OF THE 25 kV TRACTION NETWORK

Abstract. In modern conditions of operation of the traction network, there is a need for reliable protection against short circuits. An effective solution to this problem was the introduction of microprocessor relay protections, which are integrated into programmable logic controllers. These devices have a high degree of automation and are able to quickly respond to changes in the electrical network, which significantly increases the level of safety. However, despite the high degree of reliability of such systems, there are a number of questions regarding their functionality. The article considers the possibility and expediency of functional diagnostics of relay protection by increasing the number of measuring units included in the protection system. The criteria for assessing the effectiveness of the proposed method are the probability of detecting a failure to operate a measuring unit before the moment when it should perform its functions and the probability of detecting a false (excessive) operation. The first criterion helps to assess changes in the hardware and software reliability of the protection system when implementing functional control. The second is necessary to assess the effectiveness of control from the point of view of changing the functional reliability of protection, as well as the logical and information compatibility of protection with other automation functions.

Keywords: electric traction networks, relay protection, functional diagnostics, short circuit.

For citation: Kubkina, O. V. Assessment of the extension of functional diagnostics zones of relay protection of 25 kV traction network / O. V. Kubkina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 151–158. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_151.

Сведения об авторах**Кубкина Ольга Владимировна**

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Электроэнергетика и электромеханика
транспорта»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kybkina@yandex.ru

Information about the authors**Kubkina Olga Vladimirovna**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Electrical Power Engineering
and Electromechanics of Transport”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: kybkina@yandex.ru

А. И. Осипова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ОПТОВОЛОКОННОГО КАБЕЛЯ, ВМОНТИРОВАННОГО В ГРОЗОЗАЩИТНЫЙ ТРОС, ТОКАМИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Аннотация. Рассмотрен подход к определению возможности интеграции волоконно-оптического кабеля с проводящей оболочкой в систему группового заземления в средства повышения надежности и безопасности работы железной дороги постоянного тока. Критерием для принятия решения является температура нагрева элементов кабеля, определяемая в зависимости от величины протекающего тока и времени срабатывания релейной защиты. В качестве инструмента для расчета температуры всех элементов кабеля, включая оптический модуль с оптическими волокнами, предложена программа, использующая в качестве основного алгоритма метод конечных элементов. Исходными данными для выполнения моделирования являются ток в кабеле, данные о конструкции кабеля, а также технические характеристики элементов кабеля.

Ключевые слова: токи короткого замыкания, волоконно-оптический кабель, групповое заземление опор, термическая деградация, тепловой импульс.

Для цитирования: Осипова, А. И. Моделирование процесса нагрева оптоволоконного кабеля, вмонтированного в грозозащитный трос, токами короткого замыкания / А. И. Осипова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 159–166. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_159.

Введение

Внедрение волоконно-оптических линий связи в качестве структурного элемента электрифицированных железных дорог, начавшееся в 90-е годы прошлого столетия, на сегодняшний день активно продолжается. Эксплуатирующими компаниями ведется как прокладка новых линий связи, так и модернизация существующих, с учетом новых возможностей и достижений науки и техники. Исследования рынка кабельной продукции для волоконно-оптических линий связи последних лет показывает активное снижение отпускной цены кабелей с металлической оболочкой при одновременном росте стоимости самонесущих кабелей, в качестве усиливающего элемента которых используется кевларовая нить. Для ряда образцов кабельной продукции кабели с металлической оболочкой имеют цену равную либо ниже стоимости диэлектрических кабелей, содержащих в своей структуре кевлар. При этом следует отметить, что построенные ранее и сооружаемые в настоящее время линии связи выполняются, как правило, именно самонесущим кабелем, что в текущей экономической обстановке является экономически нецелесообразным.

Основная часть

Использование в качестве волоконно-оптического кабеля для линий связи железной дороги металлического кабеля типа ОКГТ – оптического кабеля, вмонтированного в грозозащитный трос [1–3], открывает целый ряд дополнительных перспектив для повышения надежности и безопасности функционирования электрифицированных железных дорог постоянного тока [5]. Примером такого использования является интеграция существующей системы группового заземления опор с проводящей оболочкой ОКГТ [4]. Такое техническое решение позволит одновременно решить несколько серьезных проблем, а именно: повысить токи удаленных коротких замыканий, тем самым улучшив условия работы релейных защит, снизить величину напряжения прикосновения к опоре при аварии и повысить показатели надежности собственно системы группового заземления [6–9]. Однако для принятия решения о такой интеграции возникает вопрос о возможном негативном влиянии токов короткого замыкания, протекающих по оболочке кабеля на срок службы оптических волокон [11–14]. Для решения этой проблемы и получения однозначного ответа на вопрос возможности такого технического решения необходимо разработать подход, позволяющий выполнять подобные исследования.

При разработке алгоритма и методики анализа термической стойкости оптических волокон оптоволоконного кабеля будем полагать, что токи, протекающие по металлической части кабеля при аварии известны. Руководствуясь величиной этих токов, необходимо определить, вызовет ли их про-

течение по кабелю негативные изменения оптических волокон вследствие нагрева структуры всего кабеля. Очевидно, что процесс нагревания будет носить нестационарный характер, что определит выбор методики его исследования. При этом следует отметить, что вся кабельная продукция, выпускаемая промышленностью как нашей страны, так и зарубежными производителями среди прочих характеризуется таким параметром как значение теплового импульса, являющимся по сути значением интеграла Джоуля:

$$\int_0^{\Delta t} i^2 dt = \Delta t \cdot I^2. \quad (1)$$

Данная величина используется проектными организациями на стадии принятия решения о прокладке того или иного типа кабеля ОКГТ, выполняющего функцию не только линии связи, но и грозо-защитного троса. Такой кабель, по своей конструкции способен выдерживать прямой удар молнии, причем без потери качества связи. Однако величина теплового импульса не используется на стадии проектирования систем грозостойкости линий, а необходима для сравнения с предельными значениями токов короткого замыкания, протекающих по ОКГТ в случае аварийных ситуаций на опорах воздушных линий. Возникновение коротких замыканий на ВЛ-110 кВ и выше, где применяется ОКГТ явление нечастое, в отличие от системы тягового электроснабжения, где ввиду особенностей конструкции возможность возникновения коротких замыканий с последующим действием АПВ более вероятно. Эта особенность может привести к повторному воздействию токов КЗ на еще нагретый волоконно-оптический кабель при неуспешном АПВ и его перегревы выше критически допустимой температуры. Нормативной документацией [11] оговаривается максимально допустимая длительная температура оптического модуля ВОК, которая не должна превышать 85 °С.

В данной работе в качестве платформы для исследования тепловых процессов в структуре ОКГТ выбрана программа, разработанная российскими программистами из Санкт-Петербурга, получившая название *Elcut Professional 6.3*. Это весьма универсальная платформа, предназначенная для решения целого ряда инженерных задач, в том числе и задачи нестационарной теплопередачи, решение которой необходимо в рамках проводимого исследования.

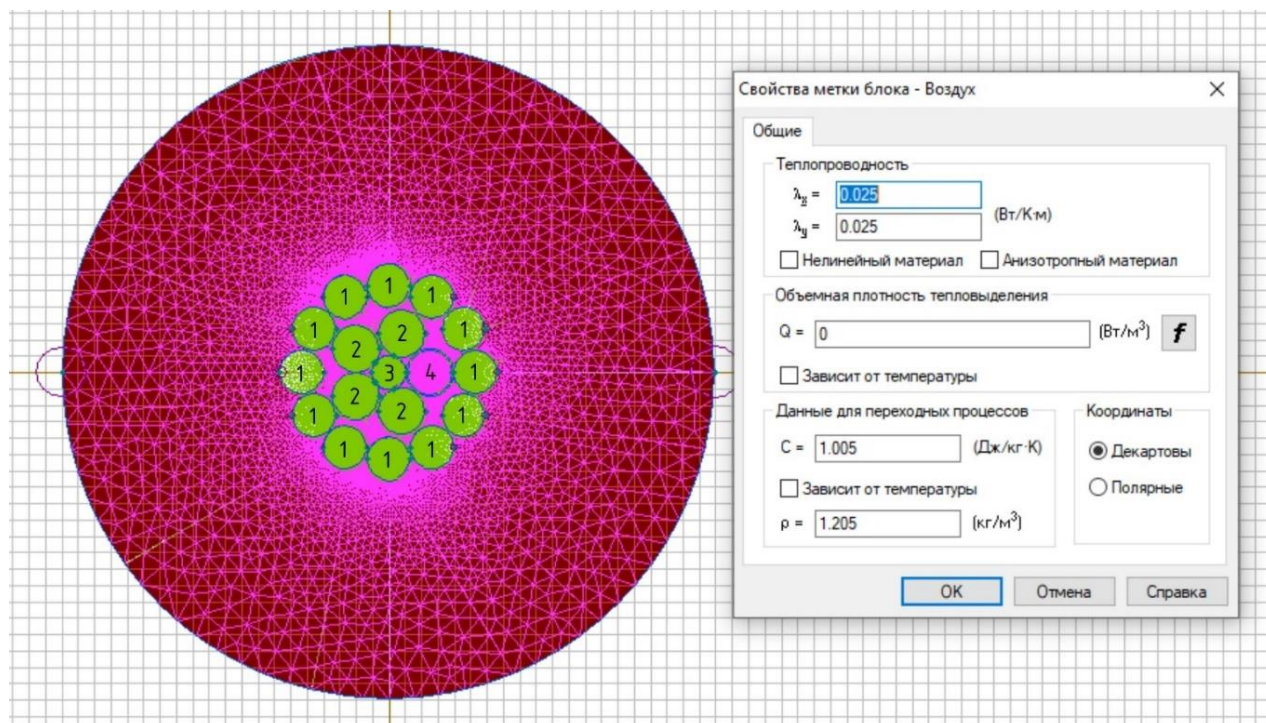


Рис. 1. Пример модели в среде *Elcut Professional 6.3*

В статье в качестве примера выбран оптоволоконный кабель, широко применяющийся на ЛЭП, марка ОКГТ–1–24(16 G.652/8 G.655)–13,3/94, расчетная модель показана на рис. 1. Ниже приводятся некоторые параметры кабеля, публикуемые заводом-изготовителем:

- эквивалентное сечение стали – 73,88 мм²;
- эквивалентное сечение алюминиевого сплава – 26,42 мм²;

- цифрой 1 обозначены проволоки из стального сплава, их диаметр 2,7 мм;
- цифрой 2 обозначены проволоки из алюминиевого сплава, их диаметр 2,9 мм;
- цифрой 3 обозначен центральный стальной элемент, его диаметр 2,1 мм.

Разработанная математическая модель объединяет три среды: алюминий, сталь и воздух. Материал каждой из этих сред обладает физическими параметрами, отличающимися от двух других. В расчете задаются параметры теплопроводности, теплоемкости и плотности для каждой среды. Среда, которая соответствует воздуху, окружающему исследуемый кабель, показана на рис. 1 сиреневым цветом. Полый оптический модуль с помещенными внутри него оптическими волокнами обозначен цифрой 4. Параметры материалов, перечисленных выше, приведены в таблице [15].

Технические характеристики материалов

Материал срезы	Теплопроводность, Вт/К·м	Теплоемкость, Дж/кг·К	Плотность, кг/м ³
Сталь	47	500	7870
Алюминий	204	920	2700
Воздух	0,025	1,005	1,205

Нагрев кабеля осуществляется за счет протекания по нему электрического тока, и мощность, выделяемая на его элементах в соответствии с законом Ленца – Джоуля, будет разогревать весь проводник. В областях конструкции кабеля, где металлических элементов нет, источники тепла также будут отсутствовать. Так как нагрев осуществляется постоянным током, следует учитывать только активную составляющую полного сопротивления всех составляющих кабеля ОКГТ. Для стальных проволок значение удельного сопротивления будет равно $\rho_{ст} = 0,11 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, алюминиевые элементы будут обладать сопротивлением $\rho_{ал} = 0,027 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$. Очевидно, что ток короткого замыкания будет неравномерно распределен в пределах сечения кабеля ОКГТ вследствие неоднородности сопротивления его элементов. Из курса теоретической электротехники известно, что ток в параллельных ветвях распределяется обратно пропорционально сопротивлению, а следовательно, для принятого типа кабеля получим:

$$\frac{I_{AL}}{I} = \frac{\rho_{СТАЛИ}/S_{СТАЛИ}}{\rho_{СТАЛИ}/S_{СТАЛИ} + \rho_{AL}/S_{AL}} = \frac{0,11/73,88}{0,11/73,88 + 0,027/26,42} = 0,593.$$

$$\frac{I_{СТАЛИ}}{I} = \frac{\rho_{AL}/S_{AL}}{\rho_{СТАЛИ}/S_{СТАЛИ} + \rho_{AL}/S_{AL}} = \frac{0,027/26,42}{0,11/73,88 + 0,027/26,42} = 0,407.$$

С учетом того, что и стальная, и алюминиевая части кабеля ОКГТ не являются монолитными, а состоят из проволок, определим долю тока в одной алюминиевой проволоке, здесь n – число алюминиевых проволок в повиве, для выбранного типа кабеля $n = 4$:

$$I_{AL} = \frac{I \cdot 0,593}{n} = \frac{I \cdot 0,593}{4} = 0,148 \cdot I.$$

Стальная часть кабеля представлена центральным стальным модулем, доля тока в котором будет определяться как

$$I_{CS} = 0,407 \cdot I \cdot \pi \cdot \left(\frac{2,1}{2}\right)^2 / S_{СТАЛИ} = 0,407 \cdot I \cdot \pi \cdot \left(\frac{2,1}{2}\right)^2 / 73,88 = 0,019 \cdot I,$$

а также двенадцатью стальными проволоками с долей тока

$$I_S = I \cdot \frac{0,407}{m} \cdot \left[1 - \pi \cdot \left(\frac{2,1}{2}\right)^2 / S_{СТАЛИ}\right] = I \cdot \frac{0,407}{12} \cdot \left[1 - \pi \cdot \left(\frac{2,1}{2}\right)^2 / 73,88\right] = 0,0323 \cdot I.$$

Выполним моделирование процесса нагрева кабеля постоянным током величиной 8200 А. Для работы модели необходимо определить объемную плотность тепловыделения:

$$Q = \frac{I^2 R}{V} = \frac{I^2}{\pi \cdot R^2 l} \cdot \frac{\rho}{\pi \cdot R^2}.$$

– Расчет для алюминиевой компоненты кабеля:

$$Q_{AL} = \frac{I_{AL}^2}{\pi \cdot R_{AL}^2} \cdot \frac{\rho_{AL}}{\pi \cdot R_{AL}^2} = \frac{(0,148 \cdot 8200)^2}{\pi \cdot (1,45 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \frac{0,027}{\pi \cdot 1,45^2} = 9,15 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3.$$

– Расчет для центрального силового элемента:

$$Q_{CS} = \frac{I_{CS}^2}{\pi \cdot R_{CS}^2} \cdot \frac{\rho_{СТАЛИ}}{\pi \cdot R_{CS}^2} = \frac{(0,019 \cdot 8200)^2}{\pi \cdot (1,05 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \frac{0,11}{\pi \cdot 1,05^2} = 2,24 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3.$$

– Расчет для стальной компоненты кабеля:

$$Q_{CS} = \frac{I_S^2}{\pi \cdot R_S^2} \cdot \frac{\rho_{СТАЛИ}}{\pi \cdot R_S^2} = \frac{(0,0323 \cdot 8200)^2}{\pi \cdot (1,35 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \frac{0,11}{\pi \cdot 1,35^2} = 2,33 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3.$$

Процесс моделирования запустим, положив начальную температуру среды и кабеля равной 20 °С, с интервалами 0,1 секунды. Результат моделирования для различных временных интервалов показан на рис. 2.

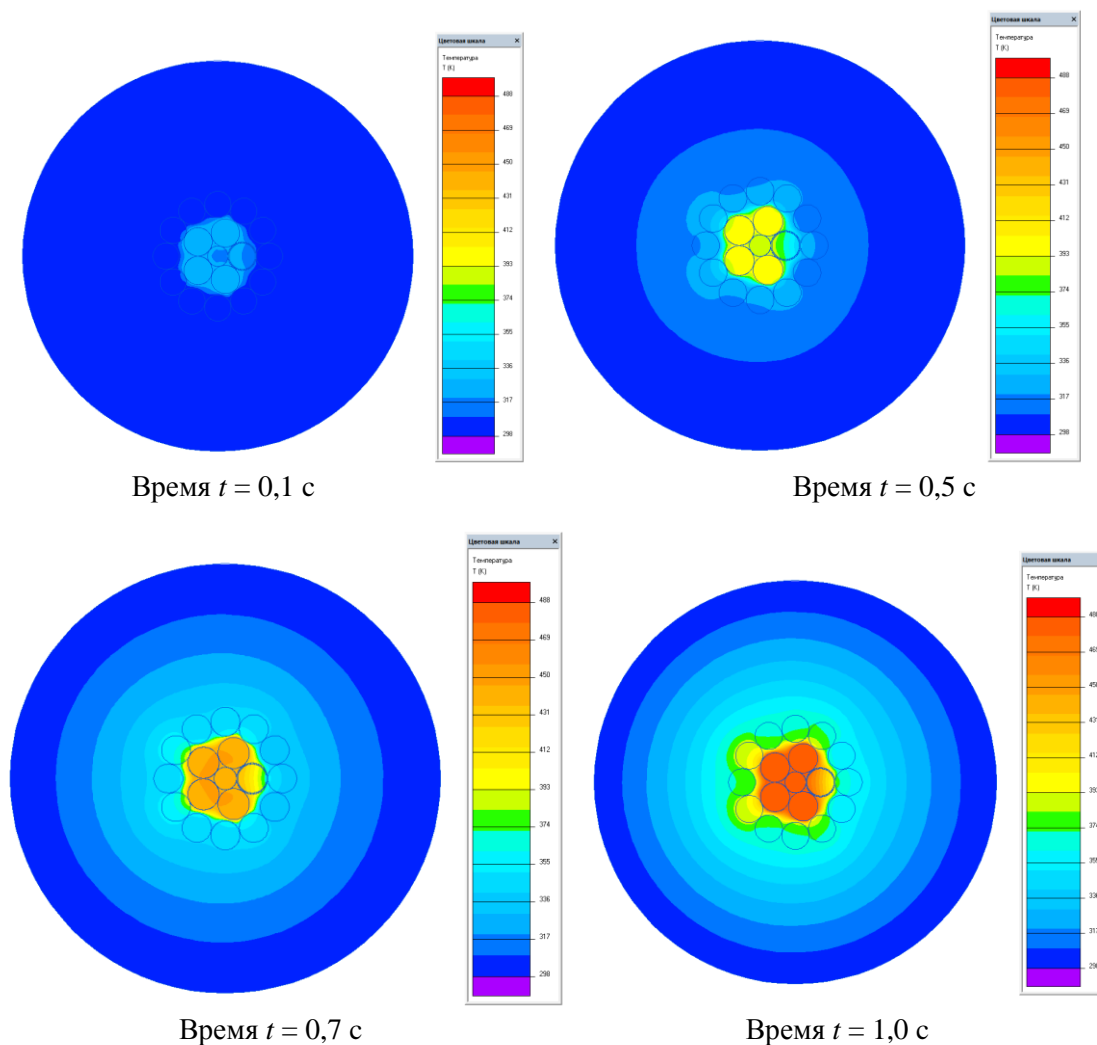


Рис. 2. Процесс нагрева кабеля ОКГТ током короткого замыкания

На рис. 3 представлена совмещенная с моделью кабеля диаграмма изменения температуры вдоль сечения кабеля для различных значений времени нагрева. Расчет выполнен с интервалом времени в одну десятую доли секунды, однако средства моделирования в среде *Elcut Professional 6.3* позволяют варьировать это значение в широком диапазоне для каждого конкретного случая.

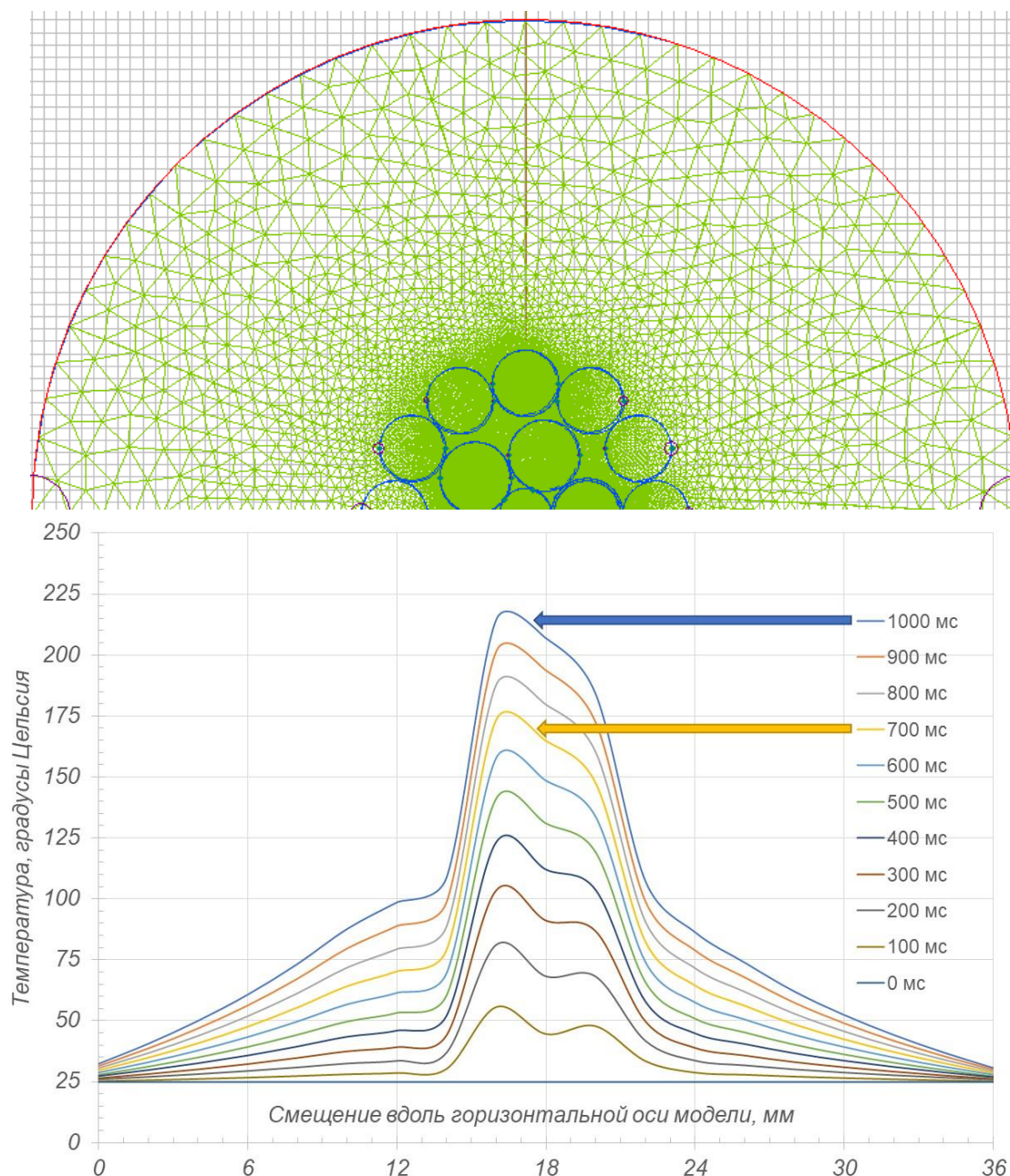


Рис. 3. График нагрева током короткого замыкания элементов кабеля ОКГТ

Полученные данные позволяют утверждать, что за время равное 1 секунде оптический модуль нагреется до температуры равной 200 °С, и это подтверждается характеристиками ОКГТ, приводимыми заводом. Этот факт позволяет говорить о том, что принятая модель дает правильный результат. Используя данные, полученные в результате моделирования, можно установить интервал времени, для которого нагрев не превысит 85 °С, тем самым обеспечив безопасные условия работы для ОКГТ. Изменяя значения токов короткого замыкания, протекающие в кабеле, следует изучить возможные интервалы времени и сделать вывод о том, могут ли нанести токи КЗ повреждение оптическим волокнам ОКГТ или нет. Также следует проанализировать процесс нагрева кабеля токами КЗ при неуспешном АПВ. В этом случае следует задать начальные значения температуры элементов, смоделировав процесс их остывания на открытом воздухе.

Выводы

Используя методику моделирования, описанную в статье, можно провести проверку практически любого типа проводящего кабеля на нагрев как токами короткого замыкания, так и токами при иных воздействиях. Результат, полученный в результате такой работы, позволит однозначно судить о возможности интеграции ОКГТ в ту или иную систему, где имеется потенциальная возможность для протекания токов. Руководствуясь результатами модельного эксперимента и данными о времени срабатывания всех ступеней релейной защиты, а также о времени и кратности срабатывания АПВ, можно сделать вывод об интеграции кабеля ОКГТ с системой группового заземления опор контактной сети на электрифицированных железных дорогах постоянного тока.

Список литературы

- 1 Кабель ОКГТ от «Инкаб» – грозотрос с оптическим волокном // Сайт компании «Инкаб». – URL: <https://incab.ru/optical-cable/opgw/> (дата обращения: 31.03.2025).
- 2 Кабель ОКГТ-с // Сайт компании «Саранскабель-Оптика». – URL: <https://sarko.ru/okgt-s-cable.html> (дата обращения: 31.03.2025).
- 3 ОКГТ. Оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос // Сайт компании «ЛЭП-Инжиниринг». – URL: <https://energoteh-ek.ru/catalog/grozozashhitnyij-tros> (дата обращения: 31.03.2025).
- 4 **Капкаев, А. А.** Интеграция экранирующего провода в системе тягового электроснабжения с волоконно-оптической линией связи : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 05.22.07 / Капкаев Андрей Андреевич. – Ростов-на-Дону, 2017. – 208 с.
- 5 **Осипова, А. И.** Особенности организации альтернативной схемы заземления опор контактной сети постоянного тока / А. И. Осипова, В. А. Осипов // Сборник научных трудов V Международной научно-технической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 45–47. – ISBN 978-5-907295-50-6.
- 6 **Осипова, А. И.** Моделирование и расчёт токов короткого замыкания в системе постоянного тока с дополнительным тросом группового заземления опор контактной сети / А. И. Осипова, В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 4. – С. 127–133. – ISSN 0201-727X.
- 7 **Жарков, Ю. И.** Проблемы организации защиты тяговой сети постоянного тока от коротких замыканий при повышенных токовых нагрузках / Ю. И. Жарков, Е. П. Фигурнов // Электрификация транспорта. – 2014. – № 7. – С. 28–31. – ISSN 2307-4221.
- 8 Параметры совместных схем замещения систем внешнего и тягового электроснабжения при коротком замыкании в контактной сети / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Л. А. Герман [и др.] // Электрические станции. – 2021. – № 7 (1080). – С. 20–26. – ISSN 0201-4564.

References

- 1 OPGW cable from “Incab” – a ground wire with optical fiber // “Incob” company website. – URL: <https://incab.ru/optical-cable/opgw/> (date of access: 03/31/2025).
- 2 OPGW-s cable // “Saranskabel-Optika” company website. – URL: <https://sarko.ru/okgt-s-cable.html> (date of access: 03/31/2025).
- 3 OPGW. Optical cable embedded into a ground wire // “LEP-Engineering” company website. – URL: <https://energoteh-ek.ru/catalog/grozozashhitnyij-tros> (date of access: 03/31/2025).
- 4 **Капкаев, А. А.** Integration of the shielding wire in the system of the traction power supply with the fiber-optic communication line : dissertation for the degree of candidate of technical sciences 05.22.07 / Kapkaev Andrey Andreevich. – Rostov-on-Don, 2017. – 208 p.
- 5 **Osipova, A. I.** Peculiarities of the organization of the alternative grounding scheme of the DC contact network supports / A. I. Osipova, V. A. Osipov // Collection of scientific papers of the V International scientific and technical conference “Transport Energy. Actual problems and tasks”. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 45–47. – ISBN 978-5-907295-50-6.
- 6 **Osipova, A. I.** Modeling and calculation of short-circuit currents in the DC system with an additional cable of the group grounding of the contact network supports / A. I. Osipova, V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 4. – P. 127–133. – ISSN 0201-727X.
- 7 **Zharkov, Yu. I.** Problems of protection organization of the DC traction network from short circuits at the increased current loads / Yu. I. Zharkov, E. P. Figurnov // Electrification of transport. – 2014. – No. 7. – P. 28–31. – ISSN 2307-4221.
- 8 Parameters of the joint substitution schemes of the external and traction power supply systems at a short circuit in the contact network / E. P. Figurnov, Yu. I. Zharkov, L. A. German [et al.] // Electrical stations. – 2021. – No. 7 (1080). – P. 20–26. – ISSN 0201-4564.

9 **Дынькин, Б. Е.** Анализ отказов релейных защит путем статистического моделирования их работы / Б. Е. Дынькин // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» / Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 24–28. – ISBN 978-5-88814-992-8.

10 СТО «Руководство по расчёту режимов плавки гололеда на грозозащитном тросе со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ) и применению распределенного контроля температуры ОКГТ в режиме плавки»: утверждено и введено в действие приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 18.05.2012 № 264. – URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1743404135&tld=ru&lang=ru&name=s3o8hishtn0zeebuhtyglpbxwe3vmfwr.pdf&> (дата обращения: 31.03.25).

11 СТО 56947007-33.180.10.173-2014. Методические указания по расчету термического воздействия токов короткого замыкания и термической устойчивости грозозащитных тросов и оптических кабелей, встроенных в грозозащитный трос, подвешиваемых на воздушных линиях электропередачи. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», утвержденные приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 21.05.2014 г. № 237. – URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1743404605&tld=ru&lang=ru&name> (дата обращения: 31.03.25).

12 Инструкция по технической эксплуатации волоконно-оптических линий передачи ОАО «РЖД»: утверждена Первым вице-президентом ОАО «РЖД» В. Н. Морозовым 18.12.2013. – URL: <http://scbist.com/scb/uploaded/docs/2013/dekabr-2013/5051-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-18-12-2013-n-2792r.htm> (дата обращения: 31.03.25).

13 Снижение влияния электрического поля высоковольтных линий электропередачи на волоконно-оптические линии связи / Е. А. Стороженко, Д. Е. Стороженко, А. С. Кляморов, К. С. Гукасов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2 (25). – С. 56. – eISSN 2073-8633.

14 Влияние переменных электромагнитных полей высокой напряженности на интенсивность деградиационных процессов в структуре волоконно-оптических кабелей / А. С. Бочев, Г. Е. Соловьев, В. А. Осипов, О. В. Невретдинова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 2 (34). – С. 94–99. – ISSN 0201-727X.

15 **Лариков, Л. Н.** Тепловые свойства металлов и сплавов: справочник / Л. Н. Лариков, Ю. Ф. Юрченко – Киев: Наукова думка, 1985. – 437 с.

9 **Dynkin, B. E.** Analysis of relay protection failures by statistical modeling of their operation / B. E. Dynkin // Collection of scientific papers of the International scientific and practical conference “Energy of Transport. Actual problems and tasks” / Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don, 2019. – P. 24–28. – ISBN 978-5-88814-992-8.

10 STO "Guide to calculating ice melting modes on a ground wire with a built-in optical cable (OPGC) and the use of distributed temperature control of the OPGC in the melting mode": approved and put into effect by order of JSC "FGC UES" dated 18.05.2012 No. 264. – URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1743404135&tld=ru&lang=ru&name=s3o8hishtn0zeebuhtyglpbxwe3vmfwr.pdf&> (date of access: 03/31/2025).

11 STO 56947007-33.180.10.173-2014. Methodological guidelines for calculating the thermal effect of short-circuit currents and thermal stability of lightning protection cables and optical cables embedded into the lightning protection cable suspended on overhead power lines. Standard of the organization of JSC "FGC UES", approved by the order of JSC "FGC UES" from 21.05.2014 No. 237. – URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1743404605&tld=ru&lang=ru&name> (date of access: 03/31/2025).

12 Instruction for the technical operation of fiber-optic transmission lines of JSC "Russian Railways": approved by the First Vice President of JSC "Russian Railways" V. N. Morozov 18.12.2013. – URL: <http://scbist.com/scb/uploaded/docs/2013/dekabr-2013/5051-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-18-12-2013-n-2792r.htm>. (date of access: 03/31/2025).

13 Reducing the influence of the electric field of high-voltage power lines on fiber-optic communication lines / E. A. Storozhenko, D. E. Storozhenko, A. S. Klyamorov, K. S. Gukasov // Engineering Journal of Don. – 2013. – No. 2 (25). – P. 56. – eISSN 2073-8633.

14 The influence of alternating electromagnetic fields of high intensity on the intensity of degradation processes in the structure of fiber-optic cables / A. S. Bochev, G. E. Soloviev, V. A. Osipov, O. V. Nevretdinova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2009. – No. 2 (34). – P. 94–99. – ISSN 0201-727X.

15 **Larikov, L. N.** Thermal properties of metals and alloys: a reference book / L. N. Larikov, Yu. F. Yurchenko – Kiev: Naukova Dumka, 1985. – 437 p.

A. I. Osipova

**MODELING OF THE HEATING PROCESS OF THE FIBER-OPTIC
CABLE EMBEDDED INTO LIGHTNING PROTECTION CABLE
BY SHORT-CIRCUIT CURRENTS**

Abstract. The paper considers an approach to determining the possibility of integrating a fiber-optic cable with a conductive sheath into a group grounding system as a means of increasing the reliability and safety of DC railroad operation. The criterion for decision making is the heating temperature of the cable elements, determined depending on the magnitude of the flowing current and the time of relay protection operation. As a tool for calculating the temperature of all cable elements, including the optical module with optical fibers, a program using the finite element method as the main algorithm is proposed. The initial data for performing the modeling are the current in the cable, data on the cable design, as well as the technical characteristics of the cable elements.

Keywords: short-circuit currents, fiber-optic cable, group grounding of supports, thermal degradation, thermal pulse.

For citation: Osipova, A. I. Modeling of the heating process of the fiber-optic cable embedded into the lightning protection cable by short-circuit currents / A. I. Osipova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 159–166. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_1_159.

Сведения об авторах

Осипова Анна Ивановна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Автоматизированные системы
электрообеспечения»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: nyshka79@mail.ru

Information about the authors

Osipova Anna Ivanovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Automated Systems of Power
Supply”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: nyshka79@mail.ru

В. А. Осипов

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПОДХОД К СООРУЖЕНИЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Аннотация. Рассмотрен вопрос возможности и целесообразности сооружения волоконно-оптических линий связи железных дорог оптоволоконным кабелем, вмонтированным в грозозащитный трос. Приведены результаты сравнения стоимости 1 км кабеля, применяемого в настоящее время, и кабеля, предлагаемого в качестве альтернативного решения. В качестве источника информации в статье использованы результаты деловой переписки с производителем кабельной продукции, а также сведения, находящиеся в открытом доступе в сети Интернет. Обоснована целесообразность смены типа волоконно-оптического кабеля на проводящий, показан экономический эффект, основанный на снижении себестоимости и повышении надежности линий связи. Такое решение позволяет повысить технико-экономические показатели участков электрифицированных железных дорог переменного тока за счет интеграции в систему тягового электроснабжения проводящей оболочки волоконно-оптического кабеля ОКГТ.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия связи, энергоэффективность, тяговая сеть, групповое заземление.

Для цитирования: Осипов, В. А. Альтернативный подход к сооружению волоконно-оптических линий связи железных дорог переменного тока / В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 167–173. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_167.

Введение

Электрифицированные железные дороги Российской Федерации представляют собой высокотехнологичный комплекс объектов, интегрирующий разработки, связывающие различные отрасли науки и техники. Эффективная работа железной дороги в целом зависит от целого ряда факторов, к которым в том числе следует отнести надёжность существующих каналов связи и качество использования информационных технологий, внедряемых на различных уровнях взаимодействия различных подразделений. В настоящее время продолжается работа по созданию каналов связи, средой распространения сигналов в которых является волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС). Прокладка таких линий осуществляется с конца XX века и технически может выполняться различными способами. Чаще всего это прокладка в земле либо подвеска волоконно-оптического кабеля (ВОК) с полевой стороны опор контактной сети. На начальном этапе строительства было отдано предпочтение варианту прокладки ВОЛС по опорам контактной сети самонесущим кабелем, в качестве силового элемента которого использовался кевлар. Основным аргументом в пользу такого решения был тот факт, что кабель выполняется из полностью диэлектрических компонентов и не подвержен, по мнению разработчиков, влиянию электромагнитных полей тяговой сети электрифицированной железной дороги. Ключевой причиной, определившей данное решение, также является себестоимость 1 км самонесущего оптоволоконного кабеля. На момент начала выполнения работ использование кабельной продукции, имеющей металлическую оболочку, было экономически неэффективно, так как стоимость диэлектрического кабеля была почти в десять раз ниже стоимости кабеля с металлической оболочкой.

В настоящее время ситуация на рынке оптоволоконного кабеля кардинально изменилась. Основной силовой элемент самонесущих кабелей типа ОКСН значительно подорожал, что неизбежно привело к удорожанию и самого кабеля. Одновременно с этим изменившиеся технологии производства кабеля с металлической оболочкой позволили снизить себестоимость кабелей типа ОКГТ. В данной статье рассмотрена возможность прокладки линии связи кабеля с проводящей оболочкой, показаны открывающиеся перспективы для усиления системы тягового электроснабжения, а также для повышения надёжности работы линий связи железных дорог Российской Федерации.

Основная часть

Самонесущий оптоволоконный кабель типа ОКСН, используемый при сооружении ВОЛС железных дорог, представляет собой многослойную диэлектрическую конструкцию, в состав которой входит полиэтилен, кевлар, совол, поликарбонат и собственно оптические волокна (рис. 1). В настоящее время на железных дорогах применяют самонесущие кабели типа ОКМС-ПТА-4/2(2,4)Сп-16(2),

ОКМС-ПТА-8(2,4)Ср-32(2)8 кН, ОКМС-ПТА-8(2,4)Сп-32(2) производства компании ТРАНСВОК. Основные составляющие кабеля показаны на рис. 1: 1 – внешняя полиэтиленовая трекинговая оболочка; 2 – упрочняющий элемент – пучок кевларовых нитей; 3 – внутренняя оболочка из полиэтилена; 4 – центральный силовой элемент; 5 – оптический модуль с оптическими волокнами, заполненный гидрофобным гелем.

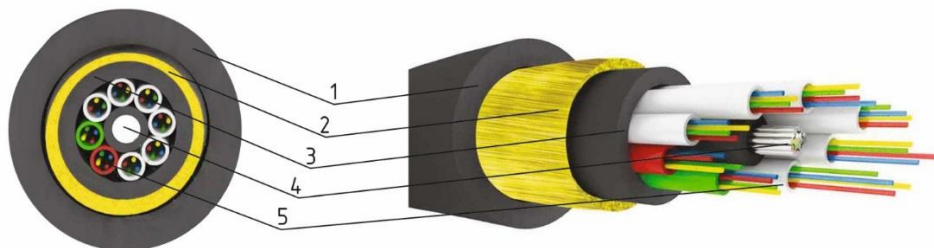


Рис. 1. Конструкция самонесущего кабеля типа ОКМС

В процессе эксплуатации подобных кабельных линий регулярно наблюдаются [1–2] места локального пережога оболочки 1 с последующим разрывом упрочняющих нитей 2 и полным обрывом кабеля. Такой процесс происходит не мгновенно, в ряде случаев в рамках регулярных верховых осмотров ВОЛС аварийная ситуация выявляется работниками линейных служб на раннем этапе и локализуется. Однако статистика обрывов таких линий за последние несколько лет позволяет утверждать, что, в частности, на полигоне Северо-Кавказской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» за последние два года наблюдалось около 200 обрывов, вызванных в том числе пережогами ВОК. Применение различных мер, направленных на снижение вредного разрушающего влияния мощного электромагнитного поля, создаваемого тяговой сетью – внедрение трекинговых оболочек, перевеска ВОК в точки с меньшим расчетным значением потенциала, оказалось малоэффективным. В настоящее время основным методом прокладки подобных линий связи является метод прокладки кабеля в земле. Отказ от подвески линии связи на опорах приводит к целому ряду сложностей, но позволяет полностью исключить влияние электрического поля высокой напряженности на элементы кабеля. Как показали проведенные исследования [3–4], основной причиной обрывов кабеля являются поляризационные процессы, протекающие в сложной многослойной структуре кабеля, в частности, в кевларовых пучках. Помещение кабеля в проводящую среду позволило практически свести к нулю опасность возникновения таких процессов. Данное решение очевидно позволит решить возникшую проблему кардинально, но в современных условиях, по мнению автора, не является оптимальным.

Как было указано ранее, ключевой причиной выбора диэлектрического кабеля стала цена, в связи с этим было выполнено сравнение стоимости кабельной продукции с аналогичными параметрами, но различным конструктивным исполнением. Для исследования вопроса изменения ценовой политики на рынке был подан запрос на завод, осуществляющий выпуск широкой номенклатуры ВОК – ООО «Инкаб». В качестве самонесущего диэлектрического ВОК специалистами завода были предложены ВОК марок ДПТ-Э-16У (2×8) – 8 кН и ДПТ-Э-16У (4×8) – 8 кН, параметры которых подобны параметрам ВОК, применяемым в настоящее время на железных дорогах. Для сравнения также были выбраны два образца ВОК, вмонтированного в грозозащитный трос (ОКГТ), кабеля, имеющего металлическую оболочку. В конструкциях этих кабелей используются стальные проволоки, плакированные алюминием, что позволяет гарантировать нормативный срок эксплуатации кабеля типа ОКГТ не менее пятидесяти лет. Такой срок эксплуатации обеспечивается высокой коррозионной стойкостью элементов кабеля к внешним погодным явлениям, высокой эффективностью отвода тепла при коротком замыкании. На рис. 2 показана конструкция кабеля ОКГТ-Ц-16 G.652D-7,0 мм-3 кА²·с-31 кН. Здесь 1 – стальная проволока, плакированная алюминием; 2 – полый модуль из нержавеющей стали; 3 – оптические волокна, расположенные внутри полого металлического модуля, находящиеся в гидрофобном геле. Результаты сравнения отпускной цены, полученные в коммерческом предложении завода, приведены в таблице.

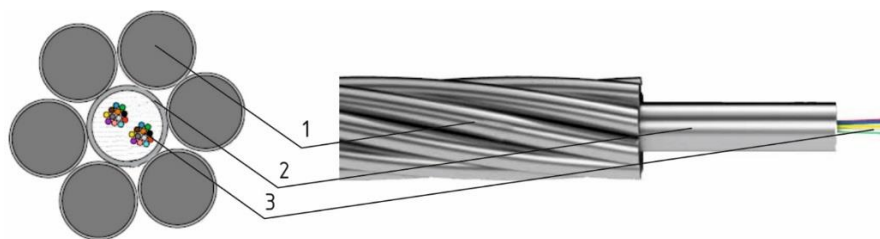


Рис. 2. Конструкция самонесущего кабеля типа ОКГТ

Стоимость ВОК

№ п/п	Марка	Количество, км	Цена, руб./км, без НДС	Стоимость, руб./км, с НДС 20 %
1	ОКГТ-Ц-16 G.652D-7,0 мм-3 кА ² ·с-31 кН	1	125 435,85	150 523,02
2	ОКГТ-Ц-32 G.652D-7,8 мм-5 кА ² ·с-37 кН	1	154 609,58	185 531,50
3	ДПТ-Э-16У (2×8)-8 кН (12,3 мм)	1	111 068,06	133 281,67
4	ДПТ-Э-32У (4×8)-8 кН (12,4 мм)	1	135 391,54	162 469,85

Представленные заводом данные позволяют говорить о том, что на сегодняшний день стоимость кабелей типа ОКГТ, применяемых в качестве линии связи на высоковольтных ЛЭП, практически сравнялась со стоимостью самонесущих диэлектрических кабелей. Используя данные, публикуемые в сети Интернет, например [5], можно наблюдать, что продавец предлагает приобрести кабель ОКМС-ПТА-4/2(2,4)Сп-16(2) «8 кН» за 372 000 руб.км. Следовательно, предложение о приобретении ОКГТ будет более выгодным.

Таким образом, возникает вполне законное предложение рассмотреть возможность использования ОКГТ в качестве ВОК при сооружении ВОЛС железных дорог. Кроме очевидного преимущества – цены кабеля такое предложение открывает ряд дополнительных преимуществ ВОЛС, сооружаемых кабелем ОКГТ по отношению к линиям, сооружаемым диэлектрическим кабелем [6]. Основным фактором, по мнению автора, является практически полное отсутствие влияния электромагнитного поля на элементы кабеля. Этот факт позволяет говорить о том, что ВОЛС на базе ОКГТ не будут подвержены электротермической деградации оболочки, следовательно, будут исключены обрывы, связанные с поляризационными процессами [7] в структуре кевлара ОКГТ, станут невозможными обрывы, вызванные горением сухой травы и камыша. Также в значительной степени уменьшатся обрывы, вызванные хулиганскими действиями граждан. Очевидно, что применение иной конструкции кабеля вызовет необходимость изменения технологии монтажа и обслуживания. Наличие проводящего кабеля на опорах контактной сети, размещаемого с полевой стороны, согласно инструкции ЦЭ-191, подразумевает его обязательное заземление с целью обеспечения действующих норм электробезопасности. В зависимости от используемой на участке системы автоблокировки следует принимать решение о заземлении кабеля. Заземление может быть выполнено как на индивидуальные заземлители, так и на рельсовую цепь. В случае, если заземление выполняется на рельсы и на участке используются двухниточная система автоблокировки и изолирующие стыки, заземление следует выполнять на нулевые точки путевых дроссель-трансформаторов, по схеме через два – на третий. Это позволит минимизировать влияние сплошного проводника – кабеля ОКГТ на работу системы автоблокировки. В бесстыковых рельсовых цепях заземление может осуществляться непосредственно на рельс.

Подвеска на опоре заземленного проводника очевидно положительно скажется на электромагнитной обстановке вблизи железной дороги, а конкретно приведет к снижению уровня наводимого потенциала электрическим полем контактной сети. Для оценки величины потенциала могут быть использованы различные расчетные методы, в том числе метод конечных элементов. Для расчета картины поля в пролете, на достаточном удалении от опор контактной сети с достаточно высокой точностью может быть использован метод зеркальных отображений. Несмотря на то что данный метод базируется на группе формул Максвелла и по определению разработан для расчета электростатических полей, полей постоянных токов и полей переменных токов низкой частоты, его использование также обоснованно [8].

Рассмотрим двухпутный участок железной дороги переменного тока, на котором размещается ВОЛС, которая подвешена на высоте 6 м над землей на кронштейне с полевой стороны левой (рис. 3) опоры контактной сети. Вначале положим, что ВОЛС выполнена диэлектрическим кабелем ОКШН, кабель новый, влияние ОКШН на картину поля отсутствует. Система уравнений для расчета картины поля по методу зеркальных изображений будет иметь вид

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \dot{\tau}_1\alpha_{11} + \dot{\tau}_2\alpha_{12} + \dot{\tau}_3\alpha_{13} + \dot{\tau}_4\alpha_{14}; \\ \dot{\phi}_2 = \dot{\tau}_1\alpha_{21} + \dot{\tau}_2\alpha_{22} + \dot{\tau}_3\alpha_{23} + \dot{\tau}_4\alpha_{24}; \\ \dot{\phi}_3 = \dot{\tau}_1\alpha_{31} + \dot{\tau}_2\alpha_{32} + \dot{\tau}_3\alpha_{33} + \dot{\tau}_4\alpha_{34}; \\ \dot{\phi}_4 = \dot{\tau}_1\alpha_{41} + \dot{\tau}_2\alpha_{42} + \dot{\tau}_3\alpha_{43} + \dot{\tau}_4\alpha_{44}. \end{cases}$$

В уравнениях индекс 1 относится к несущему тросу первого пути, индекс 2 относится к контактному проводу первого пути, индекс 3 относится к несущему тросу второго пути, индекс 4 относится к контактному проводу второго пути. Собственный и взаимные потенциальные коэффициенты определяют по известным выражениям:

$$\alpha_{km} = \frac{1}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{b_{km}}{a_{km}}; \quad \alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{2h_k}{r_k}.$$

Здесь a_{km} – расстояние между проводником k и проводником m ; b_{km} – расстояние между проводником k и зеркальным отображением проводника m ; h_k – высота подвеска проводника k ; r_k – радиус проводника k . Результат расчета по приведенной выше методике показан на рис. 3. Отметим, что непосредственно под кабелем ОКШН на высоте 2 м над поверхностью земли расчетное значение потенциала составило 3463 В, а на удалении на 4 м влево (граница зоны расчета) значение потенциала составляет 2000 В.

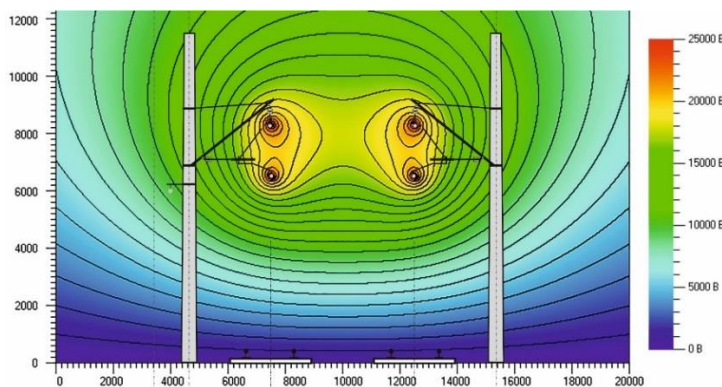


Рис. 3. Расчет картины потенциалов двухпутного участка железной дороги (используется диэлектрический ВОК ОКШН)

При подвеске металлического ВОК система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \dot{\tau}_1\alpha_{11} + \dot{\tau}_2\alpha_{12} + \dot{\tau}_3\alpha_{13} + \dot{\tau}_4\alpha_{14} + \dot{\tau}_5\alpha_{15}; \\ \dot{\phi}_2 = \dot{\tau}_1\alpha_{21} + \dot{\tau}_2\alpha_{22} + \dot{\tau}_3\alpha_{23} + \dot{\tau}_4\alpha_{24} + \dot{\tau}_5\alpha_{25}; \\ \dot{\phi}_3 = \dot{\tau}_1\alpha_{31} + \dot{\tau}_2\alpha_{32} + \dot{\tau}_3\alpha_{33} + \dot{\tau}_4\alpha_{34} + \dot{\tau}_5\alpha_{35}; \\ \dot{\phi}_4 = \dot{\tau}_1\alpha_{41} + \dot{\tau}_2\alpha_{42} + \dot{\tau}_3\alpha_{43} + \dot{\tau}_4\alpha_{44} + \dot{\tau}_5\alpha_{45}; \\ \dot{\phi}_5 = \dot{\tau}_1\alpha_{51} + \dot{\tau}_2\alpha_{52} + \dot{\tau}_3\alpha_{53} + \dot{\tau}_4\alpha_{54} + \dot{\tau}_5\alpha_{55}. \end{cases}$$

Все индексы соответствуют ранее указанным, индекс 5 присвоен кабелю ОКГТ, потенциал этого кабеля необходимо принять равным 0, и внесение заземленного проводника в электрическое поле очевидно изменит его конфигурацию (рис. 4).

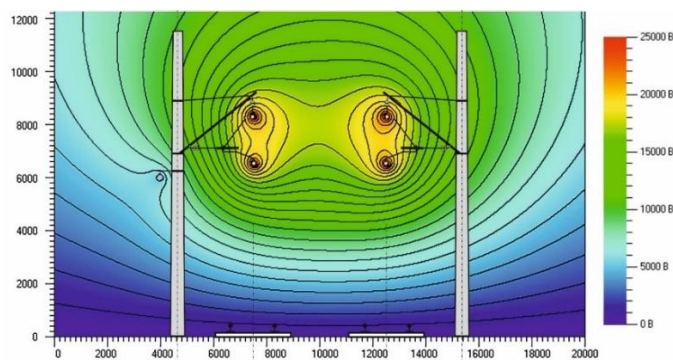


Рис. 4. Расчет картины потенциалов двухпутного участка железной дороги (используется ВОК ОКГТ)

На рис. 4 хорошо видна область подвески кабеля ОКГТ. Искажение картины электрического поля вблизи заземленного кабеля благоприятно скажется на изменении электромагнитной обстановки вблизи поверхности земли. Непосредственно под кабелем ОКГТ на высоте 2 м над поверхностью земли расчетное значение потенциала составило 2441 В, а на удалении на 4 м влево (граница зоны расчета) значение потенциала составляет 1610 В. Налицо существенное снижение значения наводимого потенциала на уровне головы человека, находящегося вблизи железнодорожного полотна.

Выводы

Подводя итог сказанному в статье следует отметить, что прокладка кабеля типа ОКГТ вместо диэлектрического кабеля ОКСН (и ему подобных) открывает большие возможности для усиления тяговой сети и повышения безопасности участка железной дороги. Внедрение кабеля ОКГТ в систему группового заземления опор, использование его в качестве грозозащитного троса, а также снижение реактивного сопротивления тяговой сети – вот некоторые предложения по интеграции ОКГТ с системой тягового электроснабжения переменного тока. При таком подходе одновременно решаются несколько задач, а именно: снижение себестоимости и повышение надёжности ВОЛС при прокладке линий по опорам контактной сети, обеспечение повышенной грозостойкости участка железной дороги, снижение потерь напряжения и повышение пропускной способности участка. Основой предлагаемого решения является комплексный подход, позволяющий прокладкой одного проводника решить сразу несколько важных задач, минимизируя капитальные затраты. Дальнейшее развитие технологий изготовления ВОК с металлической оболочкой открывает для электрифицированных железных дорог широкие перспективы развития. Ввиду значительного объема вопросам расчета сопротивления тяговой сети с интегрированным в нее проводящим оптоволоконным кабелем, а также вопросам организации грозозащиты будет посвящена отдельная работа.

Список литературы

- 1 Электротермическая деградация оптического кабеля на участках железных дорог переменного тока / Ю. И. Филиппов, Э. Е. Асс, Л. Е. Попов [и др.] // *Lightwave. Russian Edition.* – 2006. – № 3. – С. 20–24. – ISSN 0741-5834.
- 2 Оплавление диэлектрического оптического кабеля, подвешенного на железнодорожных опорах под действием электротермической деградации / И. Н. Чернов, В. И. Муратов, С. М. Куценко, С. А. Зеленев // *Lightwave. Russian Edition.* – 2007. – № 2. – С. 34–35. – ISSN 0741-5834.
- 3 Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения / В. А. Осипов, Г. Е. Соловьев, Е. В. Гороховский, А. А. Капкаев // *Инженерный вестник Дона.* – 2013. – № 1. –

References

- 1 Electrothermal degradation of optical cable on sections of AC railways / Yu. I. Filippov, E. E. Ass, L. E. Popov [et al.] // *Lightwave. Russian Edition.* – 2006. – No. 3. – P. 20–24. – ISSN 0741-5834.
- 2 Melting of a dielectric optical cable suspended on railway supports under the influence of electrothermal degradation / I. N. Chernov, V. I. Muratov, S. M. Kutsenko, S. A. Zelenev // *Lightwave. Russian Edition.* – 2007. – No. 2. – P. 34–35. – ISSN 0741-5834.
- 3 Problems of electrothermal degradation of fiber-optic communication lines and promising directions for their solution / V. A. Osipov, G. E. Soloviev, E. V. Gorokhovskiy, A. A. Kapkaev // *Engineering Journal of Don.* – 2013. – No. 1. – URL:

URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539 (дата обращения: 26.03.2025). – ISSN 2073-8633.

4 **Гороховский, Е. В.** Условия электропроводности самонесущего волоконно-оптического кабеля. Экспериментальные данные / Е. В. Гороховский // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1968 (дата обращения: 26.03.2025). – ISSN 2073-8633.

5 Кабель Иркутск : сайт. – URL: https://kabelirkutsk.ru/shop/goods/kabel_opticheskiy_opticheskiy_okms_pta_4_2_24_sp_16_2_8kn_-102479 (дата обращения: 26.03.2025).

6 **Осипова, А. И.** Расчет токов короткого замыкания сети постоянного тока при использовании двухуровневой системы группового заземления опор / А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489 (дата обращения: 26.03.2025). – ISSN 2073-8633.

7 Техника высоких напряжений / И. М. Богатенков, Ю. Н. Бочаров, Н. И. Гумерова [и др.] ; под общей редакцией Г. С. Кучинского. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 606 с. – ISBN 5-283-04757-1.

8 **Микаэльян, Е. Ю.** Моделирование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока / Е. Ю. Микаэльян, В. Н. Черных // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (дата обращения: 26.03.2025). – ISSN 2073-8633.

9 **Лысенко, В. Г.** Определение границ участка тяговой сети с устойчивым коротким замыканием / В. Г. Лысенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1. – С. 145–152. – ISSN 0201-727X.

10 **Безуглый, А. В.** Актуальные проблемы повышения энергетической эффективности в современных условиях / А. В. Безуглый, В. Н. Черных // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство». Т. 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 16–19. – ISBN 978-5-907295-89-6.

11 **Трубицин, М. А.** Продление срока службы электрооборудования / М. А. Трубицин // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство». Т. 3. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. – С. 51–54. – ISBN 978-5-907295-68-1.

ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539 (date of access: 03/26/2025). – ISSN 2073-8633.

4 **Gorokhovskiy, E. V.** Conditions of electrical conductivity of self-supporting fiber-optic cable. Experimental data / E. V. Gorokhovskiy // Engineering journal of Don. – 2013. – No. 4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1968 (date of access: 03/26/2025). – ISSN 2073-8633.

5 Kabel Irkutsk : website. – URL: https://kabelirkutsk.ru/shop/goods/kabel_opticheskiy_opticheskiy_okms_pta_4_2_24_sp_16_2_8kn_-102479 (date of access: 03/26/2025).

6 **Osipova, A. I.** Calculation of short-circuit currents of a DC network using a two-level system of group grounding of supports / A. I. Osipova, Yu. I. Zharkov // Engineering Journal of Don. – 2023. – No. 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489 (date of access: 03/26/2025). – ISSN 2073-8633.

7 High Voltage Engineering / I. M. Bogatenkov, Yu. N. Bocharov, N. I. Gumerova [et al.] ; under the general editorship of G. S. Kuchinsky. – Saint Petersburg : Energoatomizdat. Saint Petersburg branch, 2003. – 606 p. – ISBN 5-283-04757-1.

8 **Mikaelyan, E. Yu.** Modeling of electromagnetic fields of an alternating current railway section / E. Yu. Mikaelyan, V. N. Chernykh // Engineering journal of Don. – 2019. – No. 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (date of access: 03/26/2025). – ISSN 2073-8633.

9 **Lysenko, V. G.** Determination of the boundaries of a traction network section with a stable short circuit / V. G. Lysenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 1. – P. 145–152. – ISSN 0201-727X.

10 **Bezugly, A. V.** Actual problems of increasing energy efficiency in modern conditions / A. V. Bezugly, V. N. Chernykh // Collection of scientific papers "Transport : science, education, production". Vol. 2. – Rostov-on-Don : RSTU, 2023. – P. 16–19. – ISBN 978-5-907295-89-6.

11 **Trubitsin, M. A.** Extending the service life of electrical equipment / M. A. Trubitsin // Collection of scientific papers "Transport : science, education, production". Vol. 3. – Rostov-on-Don : RSTU, 2022. – P. 51–54. – ISBN 978-5-907295-68-1.

V. A. Osipov

AN ALTERNATIVE APPROACH TO THE CONSTRUCTION OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES OF AC RAILWAYS

Abstract. The article is devoted to the study of the possibility and feasibility of constructing fiber-optic communication lines of railways using fiber-optic cable built into a lightning

protection cable. The research work presents the results of a comparison of the cost of one kilometer of cable used today and the cable proposed as an alternative solution. The results of business correspondence with the manufacturer of cable products, as well as information available in the public domain on the Internet, are used as a source of information in the article. The expediency of changing the type of fiber-optic cable to a conductive one is substantiated, the economic effect based on reducing the cost and increasing the reliability of communication lines is shown. This solution allows increasing the technical and economic indicators of sections of electrified railways with alternating current due to the integration of the conductive sheath of the fiber-optic cable OPGW into the traction power supply system.

Keywords: fiber-optic communication line, energy efficiency, traction network, group grounding.

For citation: Osipov, V. A. An alternative approach to the construction of fiber-optic communication lines of AC railways / V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 167–173. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_167.

Сведения об авторах

Осипов Владимир Александрович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы
электротехники»,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
декан гуманитарного факультета,
e-mail: dw_@rambler.ru

Information about the authors

Osipov Vladimir Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Basis of Electrical
Engineering”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Head of the Chair,
Dean of the Humanitarian Department,
e-mail: dw_@rambler.ru

А. Д. Петрушин, А. И. Меликов

ПУСК И ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ

Аннотация. Электропривод с асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором распространен достаточно широко благодаря эксплуатационной надежности и достаточно высоким энергетическим характеристикам. Авторами предложен способ дальнейшего улучшения энергетических характеристик асинхронного электродвигателя в динамических режимах при управлении амплитудой питающего напряжения. На базе математической модели обобщенной электрической машины в неподвижных осях α и β разработан алгоритм, позволяющий снизить электрические потери энергии в обмотках асинхронного электропривода в переходных режимах пуска и торможения. С использованием принципа максимума и метода Ньютона – Рафсона определена оптимальная функциональная зависимость амплитуды питающего напряжения асинхронного двигателя от времени переходного процесса. В качестве критерия оптимизации выбран минимум квадрата питающего электродвигатель напряжения. По результатам расчета получены графики изменения токов, электромагнитного момента угловой скорости вращения и электрических потерь в обмотках асинхронного двигателя при оптимальных управляющих воздействиях.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, процессы пуска и торможения, параметрическое управление, оптимизация, принцип максимума, потери в обмотках электродвигателя, энергоэффективность.

Для цитирования: Петрушин, А. Д. Пуск и торможение асинхронных двигателей при параметрическом управлении / А. Д. Петрушин, А. И. Меликов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 174–181. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_174.

Введение

Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором получили широкое распространение во всех сферах деятельности человека, где требуется преобразование электрической энергии в механическую. Современная тенденция использования АД заключается в том, что все большая их часть работает в составе регулируемого электропривода [1–2]. Существует достаточно много областей применения АД, где они часто работают в режимах пуска и торможения. Это различные виды металлообрабатывающего оборудования, роботизированное выполнение технологических операций в машиностроении, тяговые приводы транспортных средств и ряд других. Известно, что в этих динамических режимах пуска и торможения, перехода с одной скорости вращения на другую коэффициент полезного действия АД значительно меньше, чем в номинальном режиме. Тепло, выделяемое в обмотках и магнитопроводе, существенно ограничивает интенсивность использования электродвигателя. Повысить КПД в режимах пуска и торможения можно путем оптимального регулирования параметров питающего напряжения.

Среди способов регулирования скорости вращения АД наиболее эффективным является способ частотного управления, при котором изменяются как частота, так и амплитуда питающего напряжения [3–5]. Реже используется способ управления, при котором изменяется только амплитуда питающего напряжения при неизменной частоте. При этом изменяется параметр двигателя – скольжение. Такой способ управления относится к параметрическим. Параметрическое управление уступает частотному управлению в энергоэффективности и применяется в основном для плавного пуска в ход мощных АД либо для регулирования скорости вращения в узком диапазоне вблизи номинального значения. Практическая реализация параметрического способа управления АД несколько проще и дешевле, чем частотного управления. Параметрический способ управления АД может использоваться для организации режимов пуска и торможения в сочетании с алгоритмами оптимизации, что позволит получить высокие энергетические показатели.

Алгоритмы оптимизации, используемые в области электропривода, доказали свою эффективность при практической реализации [6–8]. Значительное распространение получил принцип максимума при оптимальном управлении электроприводами постоянного и переменного тока [8].

В данной статье предложен алгоритм оптимального параметрического управления пуском и торможением АД, при котором амплитуда питающего напряжения изменяется таким образом, чтобы обеспечить минимум функционала вида:

$$\Phi = \int_0^T \gamma^2 dt \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где γ – относительное напряжение питания (отношение текущего значения напряжения к базисному значению);

t – время;

T – период, в течение которого осуществляется переходный процесс.

Минимизация функционала (1) позволяет существенно сократить электрические потери в обмотках статора и ротора, которые в процессах пуска и торможения составляют большую часть всех выделяемых в электродвигателе потерь.

Основная часть

Для математического описания АД были использованы уравнения обобщенной электрической машины, записанные в следующем виде [7]:

$$\begin{bmatrix} i'_{s\alpha} \\ i'_{r\alpha} \\ i'_{s\beta} \\ i'_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -cR_s & dR_r & \omega L_{sr} & \omega L_r \\ dR_s & -bR_r & -\omega bL_{sr} & -\omega bL_r \\ -\omega dL_{sr} & -\omega dL_r & -cR_s & dR_r \\ \omega bL_{sr} & \omega bL_r & dR_s & -bR_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{r\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ -d & 0 \\ 0 & c \\ 0 & -d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix},$$

$$\omega' = \frac{pP_6}{\omega_6^3 J} [L_{sr}(i_{s\beta}i_{r\alpha} - i_{s\alpha}i_{r\beta}) - M_c]. \quad (2)$$

В уравнениях (2) использованы следующие обозначения

$$b = \frac{L_s}{L_s L_r - L_{sr}^2}; \quad c = \frac{L_r}{L_s L_r - L_{sr}^2}; \quad d = \frac{L_{sr}}{L_s L_r - L_{sr}^2}; \quad P_6 = \frac{3}{2} u_6 i_6,$$

где $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}$ – проекции токов статора и ротора АД на неподвижные координатные оси α и β ; $\frac{di_{s\alpha}}{dt}, \frac{di_{r\alpha}}{dt}, \frac{di_{s\beta}}{dt}, \frac{di_{r\beta}}{dt}$ – производные по времени проекций токов статора и ротора по координатным осям α и β ; R_s, R_r – активные сопротивления статора и ротора; p – число пар полюсов; ω – угловая скорость вращения; L_s, L_r – индуктивности статора и ротора, L_{sr} – взаимная индуктивность между статором и ротором; M_s – электромагнитный момент; M_c – статический момент сопротивления на валу АД; J – момент инерции ротора АД.

Вычисления переменных производились в относительных единицах. Приняты следующие базисные значения:

$$\omega_6 = 2\pi f_n; \quad M_6 = P_6 / \omega_6; \quad L_6 = x_6 / \omega_6; \quad J_6 = M_6 / \omega_6; \quad t_6 = 1 / \omega_6,$$

где $\omega_6, i_6, u_6, M_6, P_6, L_6, x_6, t_6$ – базисные значения переменных: соответственно угловой скорости вращения, тока, напряжения, электромагнитного момента, мощности, индуктивности, индуктивного сопротивления, времени.

Проекция питающих напряжений на обмотках статора и ротора по координатным осям α и β вычислялись из выражений:

$$u_{s\alpha} = U_m \gamma \cos(\omega t); \quad u_{s\beta} = U_m \gamma \sin(\omega t). \quad (3)$$

Электромагнитный момент вычислялся по формуле:

$$M_s = M(i_{r\alpha}i_{s\beta} - i_{r\beta}i_{s\alpha}). \quad (4)$$

Электрические потери в переходном процессе за время от 0 до T были рассчитаны по выражению:

$$P_3 = \int_0^T i_{sa}^2 R_s dt + \int_0^T i_{sb}^2 R_s dt + \int_0^T i_{ra}^2 R_r dt + \int_0^T i_{rb}^2 R_r dt. \quad (5)$$

Преобразование проекций токов статора АД $i_{sa}, i_{ra}, i_{sb}, i_{rb}$ в координатных осях α и β в фазные токи i_a, i_b, i_c выполнено по следующим формулам [9]:

$$i_a = i_{sa}; \quad i_b = -\frac{1}{2}i_{sa} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}; \quad i_c = -\frac{1}{2}i_{sa} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}. \quad (6)$$

При математическом моделировании АД использованы допущения, которые соответствуют понятию «обобщенная электрическая машина» [9].

Математическая модель учитывает быстро протекающие электромагнитные переходные процессы в АД. Наличие уравнения движения в составе математической модели делает всю систему уравнений (2) жесткой, так как постоянные времени электромагнитных и электромеханических переходных процессов существенно отличаются. Жесткие математические модели требуют выбора шага интегрирования, который согласован с наименьшей постоянной времени.

Для решения задачи оптимизации был использован принцип максимума. Определена функция Гамильтона H :

$$H = \gamma^2 \Psi_0 + i'_{sa} \Psi_1 + i'_{ra} \Psi_2 + i'_{s\beta} \Psi_3 + i'_{r\beta} \Psi_4 + v \Psi_5. \quad (7)$$

Составлены вспомогательные функции $\Psi_0 - \Psi_5$:

$$\begin{bmatrix} \Psi'_1 \\ \Psi'_2 \\ \Psi'_3 \\ \Psi'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cR_s & -dR_s & \omega dL_{sr} & -\omega bL_{sr} \\ -dR_r & bR_r & \omega dL_r & -\omega bL_r \\ -\omega dL_{sr} & \omega bL_{sr} & cR_s & -dR_s \\ -\omega dL_r & \omega bL_r & -dR_r & bR_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \\ \Psi_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha \Psi_5 L_{sr} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{r\beta} \\ i_{s\beta} \\ i_{ra} \\ i_{sa} \end{bmatrix},$$

$$\Psi'_5 = (\Psi_3 d - \Psi_4 b)(L_r i_{ra} + L_{sr} i_{sa}) - (\Psi_1 d - \Psi_2 b)(L_r i_{r\beta} + L_{sr} i_{s\beta}). \quad (8)$$

Согласно принципу максимума оптимальное управляющее воздействие – относительная амплитуда питающего напряжения γ^* – найдена из выражения $\frac{\partial H}{\partial \gamma} = 0$:

$$\gamma^* = \frac{U_m}{2} \left[(\Psi_1 - \Psi_2 d) \cdot \cos(\omega t) + (\Psi_3 c - \Psi_4 d) \cdot \sin(\omega t) \right]. \quad (9)$$

Начальные условия вспомогательных функций $\Psi_1 - \Psi_5$ в дифференциальных уравнениях (8) заранее неизвестны. Для их определения использован метода Ньютона – Рафсона из условия получения в конце переходного процесса желаемой скорости вращения ротора АД [10]. Преимуществом метода Ньютона – Рафсона в сравнении с другими методами оптимизации является квадратичная сходимость вблизи искомого решения. Однако есть и недостаток – малая область сходимости (меньше, чем у градиентного метода). Влияние на процесс сходимости этого недостатка можно исключить, используя итерационный переход из исходной области сходимости, определяемой произвольными значениями $\Psi_1 - \Psi_5$ в область сходимости с заранее заданной скоростью вращения ротора в конце переходного процесса [8].

Выражения, определяемые методом Ньютона – Рафсона для определения начальных условий вспомогательных функций $\Psi_1 - \Psi_5$, имеют следующий вид в матричной форме:

$$\Psi^{j+1}(0) = \Psi^j(0) - [K^j]^{-1} [y^{j+1}(T) - y^j(T)], \quad (8)$$

где $\psi^{j+1}(0)$ – начальные условия вспомогательных функций на последующей итерации; $\psi^j(0)$ – начальные условия вспомогательных функций на предыдущей итерации; $y^{j+1}(T)$ – значения токов и угловой скорости вращения $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}, \omega$ в конце переходного процесса на последующей итерации; $y^j(T)$ – значения токов и угловой скорости вращения $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}, \omega$ в конце переходного процесса на предыдущей итерации.

Расчеты были выполнены для электродвигателя АИР80В4У3 мощностью 1,5 кВт со следующими параметрами схемы замещения в относительных единицах:

$$R_s = 0,12; \quad R_r = 0,06; \quad L_{sr} = 1,9; \quad L_s = 1,978; \quad L_r = 2,02. \quad (9)$$

Вначале были выполнены расчеты пуска АД до номинальной скорости вращения при прямом подключении к источнику питающего напряжения 380 В с частотой 50 Гц. Результаты расчетов без нагрузки на валу приведены на рис. 1. На рис. 2 приведены результаты расчетов при нагрузке равной 30 % от номинального значения. Аналогичные расчеты без нагрузки на валу и с нагрузкой 30 % были выполнены по оптимизационному алгоритму за то же время, что и при прямом подключении АД. Результаты приведены соответственно на рис. 3 (левая часть) и рис. 4. Также были выполнены расчеты тормозного режима АД при оптимальном параметрическом управлении, результаты расчета которого представлены в правой части рис. 3.

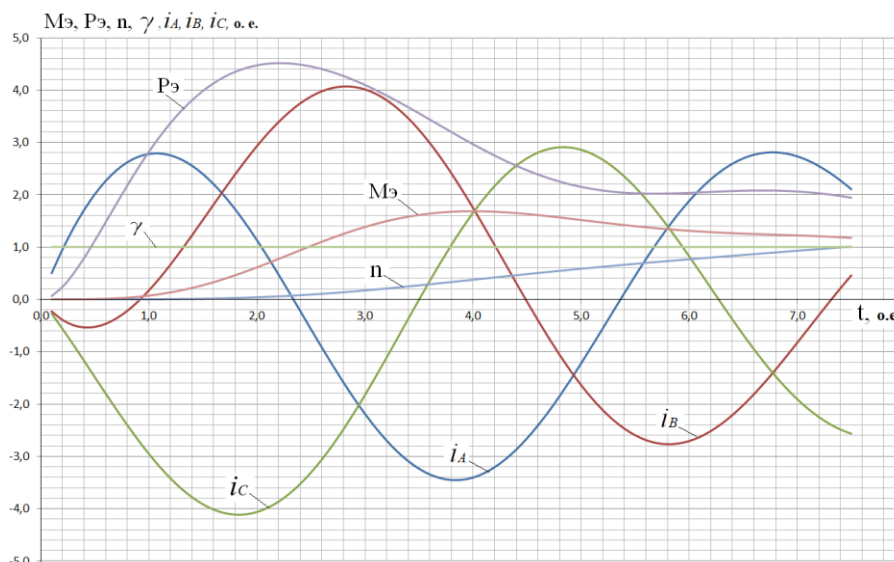


Рис. 1. Прямой пуск АД без нагрузки

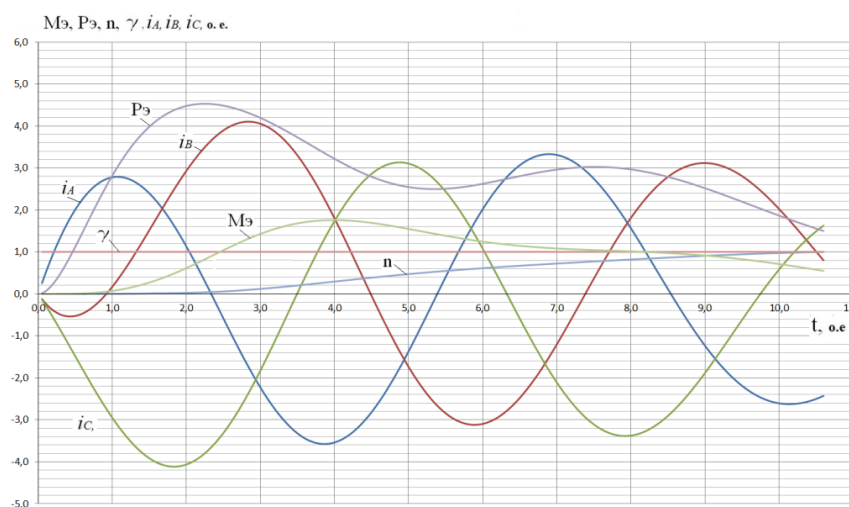


Рис. 2. Прямой пуск АД за время 10,6 о.е. с моментом сопротивления 30 % от номинального значения

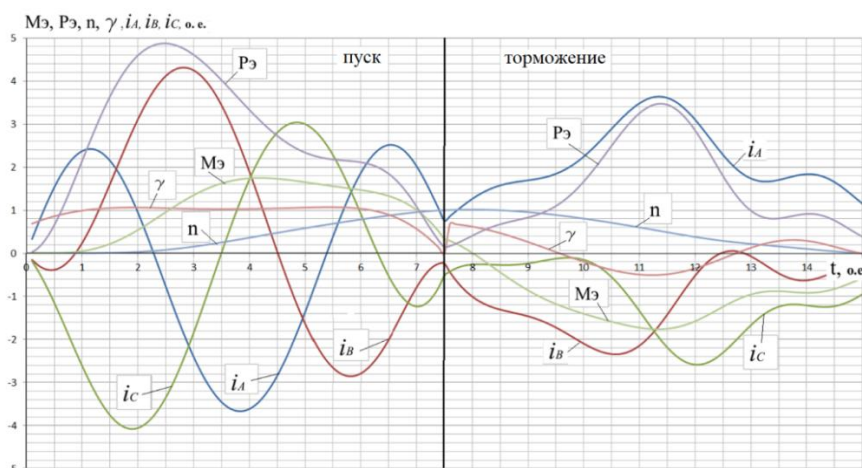


Рис. 3. Оптимальный пуск и оптимальное торможение АД без нагрузки на валу

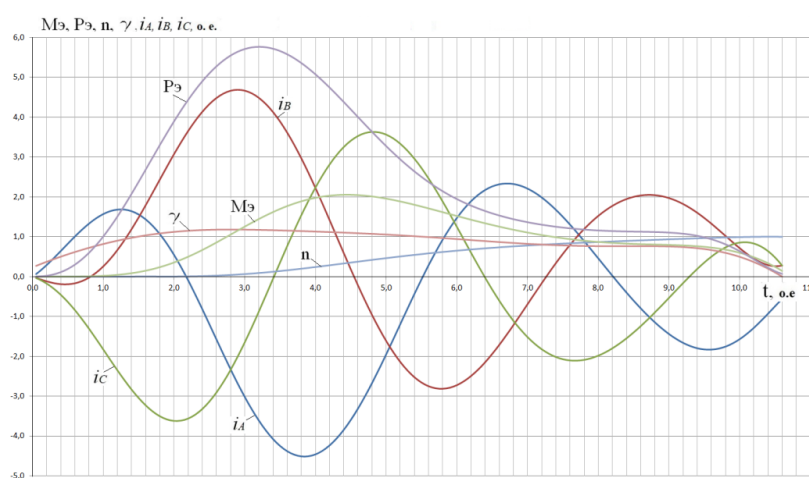


Рис. 4. Оптимальный пуск АД за время 10,6 о.е. с моментом сопротивления 30 % от номинального значения

На рис. 5 приведены результаты расчетов при нагрузке равной 30 % от номинального значения при меньшем времени разгона, чем при прямом включении АД на номинальное напряжение. Сокращение времени пуска приводит к росту максимальных значений токов статора, но электрические потери за время пуска остаются достаточно низкими за счет сокращения времени пуска.

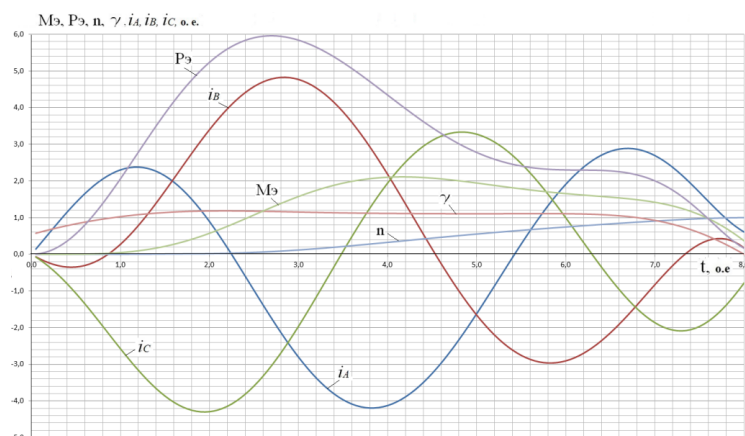


Рис. 5. Оптимальный пуск АД за время 8 о.е. с моментом сопротивления 30 % от номинального значения

В таблице приведены сравнительные данные по электрическим потерям в статоре и роторе для прямого включения АД на номинальное напряжение и при оптимальном параметрическом управлении. Электрические потери в обмотках АД были рассчитаны по уравнению (5).

**Сравнение параметров оптимального параметрического управления
АД с прямым включением на номинальное напряжение**

№ п/п	Тип переходного процесса	Электрические потери в статоре и роторе, о.е. (%)	Время переходного процесса, о.е.
1	Прямой пуск без нагрузки	20,7 (принят 100 %)	7,5
2	Оптимальный пуск без нагрузки	20,2 (97,6 %)	7,5
3	Прямой пуск с нагрузкой 30 %	30,4 (принят 100 %)	10,6
4	Оптимальный пуск с нагрузкой 30 %	25,1 (82,6 %)	10,6
5	Оптимальный пуск с нагрузкой 30 %	24,8 (81,6 %)	8
6	Оптимальный пуск с нагрузкой 50 %	31,8 (104,6 %)	12
7	Оптимальное торможение	11,2	7,5

Сравнительные данные по электрическим потерям при пуске АД на холостом ходу (без нагрузки) отличаются незначительно – в пределах 2–3 процентов. При пуске АД с нагрузкой на валу положительный эффект от параметрического управления более существенный. Так, при нагрузке равной 30 % от номинального значения оптимальное параметрическое управление позволяет снизить электрические потери в обмотках АД на 17,4 % за то же время переходного процесса пуска.

Известно, что при прямом включении в сеть переменного тока в первый период питающего напряжения в электромагнитный контур АД поступает энергии значительно больше, чем за этот период возрастет механическая энергия в результате электромеханического преобразования [9]. По этой причине возникает колебательный процесс обмена энергией между источником питания и электромагнитным контуром АД. Это, в свою очередь, приводит к возрастанию электрических потерь в обмотках АД. Отличительной особенностью оптимального параметрического управления является плавное нарастание амплитуды питающего напряжения в начальный период пускового режима до номинального значения. Это позволяет оптимально дозировать поступление энергии из источника в электромагнитный контур активной части АД с последующим электромеханическим преобразованием энергии.

Возможности оптимального параметрического управления можно использовать и для организации процесса торможения за заданное время (см. рис. 3 (правая часть)). Если время оптимального параметрического торможения выбрать такое же, как и время пуска на холостом ходу, то электрические потери в обмотках АД составят примерно половину от электрических потерь в пусковом режиме.

Выводы

Электропривод с асинхронными электродвигателями использует для своей работы значительное количество электроэнергии. Повышение энергоэффективности электромеханического преобразования энергии можно существенно увеличить, используя алгоритмы оптимального управления, построенные на математической модели асинхронного электродвигателя, которая учитывает быстро протекающие электромагнитные переходные процессы. В периоды пуска и торможения, которые отличаются низким КПД, предложенный алгоритм оптимального параметрического управления позволяет снизить электрические потери в статоре и роторе АД, работающего в составе различных машин и механизмов.

Предложенный алгоритм оптимального параметрического управления может быть использован для повышения энергоэффективности работы асинхронного электропривода и актуален для асинхронных электроприводов, которые работают в частых режимах пуска и торможения.

Список литературы

1 **Белов, М. П.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – 2-е изд., стер. – Москва : Академия, 2004. – 574, [1] с. – ISBN 5-7695-1314-4 : 5100 экз.

References

1 **Belov, M. P.** Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes : textbook for universities / M. P. Belov, V. A. Novikov, L. N. Rassudov. – 2-e ed., stereotypical. – Moscow : Academy, 2004. – 574, [1] p. – ISBN 5-7695-1314-4 : 5100 copies.

2 Сравнительный анализ характеристик асинхронного и синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением в приводе грузового транспортного средства повышенной проходимости на основе математического моделирования / В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский, В. М. Казакбаев [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – № 3 (55). – С. 102–119. – DOI 10.25699/SSSB.2024.55.3.014.

3 **Макаров, В. Г.** Модель асинхронного электропривода с частотным регулированием скорости при поддержании постоянства потокосцепления статора в Matlab / В. Г. Макаров, А. Т. Аббазов, Д. А. Каримов // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 167–173. – EDN URAEXM.

4 **Евсиков, А. А.** Автоматизированный электропривод с частотным управлением : учебное пособие / А. А. Евсиков, В. А. Коковин, А. П. Леонов. – Дубна : Гос. ун-т «Дубна», 2020. – 121 с. – ISBN 978-5-89847-592-5.

5 **Хатламаджиян, А. Е.** 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.

6 **Макаров, В. Г.** Асинхронный электропривод с оптимальными режимами работы : монография / В. Г. Макаров. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2010. – 300 с. – ISBN 978-5-7882-0998-2.

7 **Самосейко, В. Ф.** Оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии / В. Ф. Самосейко, В. О. Гуськов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 775–788. – DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

8 Оптимальное частотное управление асинхронными тяговыми электродвигателями электропезда / А. Д. Петрушин, Т. С. Титова, В. В. Никитин, А. С. Мазнев // Электротехника. – 2021. – № 10. – С. 10–14. – ISSN 0013-5860.

9 **Копылов, И. П.** Математическое моделирование асинхронных машин : учебник для вузов / И. П. Копылов, Ф. А. Мамедов, Ф. Я. Беспалов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2001. – 327 с. – ISBN 5-06-003861-0.

10 Использование метода Ньютона – Рафсона при многокомпонентном математическом моделировании разработки месторождений жидких и газообразных углеводородов / И. В. Афанаскин,

2 Comparative analysis of the characteristics of an asynchronous and synchronous motor with electromagnetic excitation in the drive of an all-terrain cargo vehicle based on mathematical modeling / V. A. Prakht, V. A. Dmitrievsky, V. M. Kazakbaev [et al.] // South-Siberian Scientific Bulletin. – 2024. – No. 3 (55). – P. 102–119. – DOI 10.25699/SSSB.2024.55.3.014.

3 **Makarov, V. G.** Model of an asynchronous electric drive with frequency speed control while maintaining a constant stator flux linkage in Matlab / V. G. Makarov, A. T. Abbazov, D. A. Karimov // Herald of the Technological University. – 2018. – Vol. 21, No. 4. – P. 167–173. – EDN URAEXM.

4 **Evsikov, A. A.** Automated electric drive with frequency control : textbook / A. A. Evsikov, V. A. Kokovin, A. P. Leonov. – Dubna : Dubna State University, 2020. – 121 p. – ISBN 978-5-89847-592-5.

5 **Khatlamadzhiyan, A. E.** The use of modern digital technologies and technical means to improve the safety and efficiency of the transportation process of rolling stock / 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.

6 **Makarov, V. G.** Asynchronous electric drive with optimal operating modes : monograph / V. G. Makarov. – Kazan : Kazan National Research Technological University, 2010. – 300 p. – ISBN 978-5-7882-0998-2.

7 **Samoseiko, V. F.** Optimal control of an asynchronous motor by the criterion of energy losses / V. F. Samoseiko, V. O. Guskov // Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov. – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 775–788. – DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

8 Optimal frequency control of asynchronous traction electric motors of an electric train / A. D. Petrushin, T. S. Titova, V. V. Nikitin, A. S. Maznev // Electrical Engineering. – 2021. – No. 10. – P. 10–14. – ISSN 0013-5860.

9 **Kopylov, I. P.** Mathematical modeling of asynchronous machines : a textbook for universities / I. P. Kopylov, F. A. Mamedov, F. Ya. Bespalov. – 3rd ed., revised and enlarged. – Moscow : Vysshaya shkola, 2001. – 327 p. – ISBN 5-06-003861-0.

10 The use of the Newton-Raphson method in multicomponent mathematical modeling of the development of liquid and gaseous hydrocarbon deposits / I. V. Afanaskin, S. G. Volpin,

С. Г. Вольпин, А. В. Королев, П. В. Ялов // Вестник кибернетики. – 2018. – № 2 (30). – С. 32–42. – eISSN 1999-7604.

A. V. Korolev, P. V. Yalov // Proceedings in Cybernetics. – 2018. – No. 2 (30). – P. 32–42. – eISSN 1999-7604.

A. D. Petrushin, A. I. Melikov

STARTING AND BRAKING OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH PARAMETRIC CONTROL

Abstract. An electric drive with asynchronous electric motors with a short-circuited rotor is widespread enough due to operational reliability and sufficiently high energy characteristics. The authors propose a method for further improving the energy characteristics of an asynchronous electric motor in dynamic modes with control of the amplitude of the supply voltage. Based on a mathematical model of a generalized electric machine in fixed axes α and β , an algorithm has been developed to reduce electrical energy losses in the windings of an asynchronous electric drive in transient start and braking modes. Using the maximum principle and the Newton-Raphson method, the optimal functional dependence of the amplitude of the supply voltage of an asynchronous motor on the time of the transient process has been determined. The minimum square of the voltage supplying the electric motor is selected as an optimization criterion. Based on the calculation results, graphs of changes in currents, the electromagnetic moment of the angular velocity of rotation and electrical losses in the windings of the asynchronous motor with optimal control actions are obtained.

Keywords: asynchronous motor, starting and braking processes, parametric control, optimization, maximum principle, losses in the windings of the electric motor, energy efficiency.

For citation: Petrushin, A. D. Starting and braking of asynchronous motors with parametric control / A. D. Petrushin, A. I. Melikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 174–181. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_174.

Сведения об авторах

Петрушин Александр Дмитриевич
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: alex331685@yandex.ru

Меликов Алимурад Иламинович
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
аспирант,
e-mail: alimurad2015@yandex.ru

Information about the authors

Petrushin Alexandr Dmitrievich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Cars and Car Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: alex331685@yandex.ru

Melikov Alimurad Paminovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Cars and Car Facilities”,
Postgraduate Student,
e-mail: alimurad2015@yandex.ru

А. Н. Смердин, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков, А. С. Голубков

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РИСКА УЩЕРБА ОТ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОВОДАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ВВИДУ ОТСУТСТВИЯ УСТРОЙСТВ УДАЛЕНИЯ ГОЛОЛЕДА

Аннотация. Рассмотрены вопросы оснащённости подразделений Трансэнерго и Дирекции тяги устройствами для механической очистки гололеда, вибропантографами и пневмобарабанами. Усовершенствована методика для оценки риска ущерба ОАО «РЖД» от образования гололеда на проводах контактной сети по причине отсутствия устройств для удаления гололеда с контактного провода в необходимом количестве в структурных подразделениях Трансэнерго и Дирекции тяги. Предложены уровни частоты отказов и тяжести их последствий по причине гололедообразования. Составлены матрицы рисков ущерба и рекомендации по снижению риска для каждого уровня. Определение необходимости дооснащения подразделений Трансэнерго и Дирекции тяги устройствами для удаления гололеда основано на сравнении расходов на восстановление инфраструктуры в текущих условиях эксплуатации и после дооснащения.

Ключевые слова: контактная сеть, токоприемник, гололед, оценка ущерба, матрица риска, уровень частот, уровень тяжести последствий.

Для цитирования: Совершенствование методики оценки риска ущерба от гололедообразования на проводах контактной сети ввиду отсутствия устройств удаления гололеда / А. Н. Смердин, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков, А. С. Голубков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 182–189. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_182.

Введение

Наличие гололедных отложений на контактных проводах приводит к ухудшению, а иногда и к полному прерыванию их контакта с полозами токоприемников электроподвижного состава вследствие низкой электропроводности ледяной корки. В таких условиях может возникать электрическая дуга, под действием которой происходит повреждение контактирующих поверхностей, а в некоторых случаях – отжиг (пережог и обрыв) контактных проводов [1]. Использование устройств для механической очистки гололеда (МОГ), вибропантографов и пневмобарабанов является одним из эффективных способов борьбы с гололедом, образующимся на проводах контактной подвески. Однако, недостаточное количество указанных устройств создает предпосылки для экономического ущерба ОАО «РЖД», обусловленного риском повреждения контактной сети или токоприемников электроподвижного состава [2–3].

Целью работы является совершенствование методики для оценки риска ущерба от гололедообразования на проводах контактной сети ввиду отсутствия устройств для удаления гололеда с контактного провода в необходимом количестве в подразделениях Трансэнерго и Дирекции тяги [4].

В соответствии с принятой методологией [5] для оценки риска предлагается сегментировать случаи наступления отказов территориально (перегон либо станция) и ведомственно (Трансэнерго либо Дирекция тяги). Несмотря на общий подход, данное разделение позволяет существенно сократить вариативность дооснащения подразделений устройствами для удаления гололеда с проводов контактной сети. Для предотвращения снижения пропускной способности участка, обусловленного наличием на перегоне движущегося тихоходного подвижного состава (менее 60 км/ч), оборудованным устройствами для удаления гололеда, в предлагаемой методике принято допущение о целесообразности применения на перегонах исключительно вибропантографов и пневмобарабанов, устанавливаемых на магистральный электроподвижной состав, а на станциях – МОГ, размещенных согласно техническим указаниям на них.

Основная часть

Этапы, которые в общем случае включают в себя определение области применения анализа риска, следующие [5]:

- первоначальный анализ с описанием оснований или причин, которые привели к необходимости проведения анализа риска [6];
- описание рассматриваемой системы;
- определение источников, позволяющих предоставить подробную информацию о факторах, которые имеют прямое или косвенное отношение к анализируемой проблеме (социальные, технические, правовые и др.).

Определение риска состоит в выявлении и кратком представлении опасных событий, вероятностей (частоты) и возможных последствий их возникновения.

Для оценки риска ущерба сначала необходимо рассчитать:

- среднюю частоту возникновения отказа, год⁻¹:

$$f = \frac{N}{T}, \quad (1)$$

где N – количество возникших отказов за анализируемый период времени T ;
– среднюю величину ущерба, вызванную возникшим отказом, тыс. руб.:

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{N}, \quad (2)$$

где C_i – величина ущерба, обусловленная возникшим отказом i ($i = 1 \dots N$), тыс. руб.

Уровень (величину) риска R можно установить, используя формулу:

$$R = F_R\{C, P\}, \quad (3)$$

где F_R – функционал, объединяющий вероятность P возникновения отказа и математическое ожидание величины ущерба C от этого отказа.

Учитывая выражения (1)–(3), уровень риска определяется по выражению

$$R = f \cdot \bar{C}. \quad (4)$$

Используя выражение (4), можно рассчитать уровень (величину) риска, который необходим для установления уровня тяжести последствий и выработки мероприятий по снижению уровня риска.

В соответствии с [7] анализ частот возникновения отказа необходим для проведения оценки вероятности (частоты) возникновения каждого отдельного отказа, установленного на предварительной стадии определения риска. Для проводимой оценки частоты появления отказов индивидуально и/или совместно могут быть использованы три способа, основанные на:

- а) имеющихся накопленных статистических данных;
- б) аналитических или имитационных методах расчета частот возникновения отказов;
- в) экспертных оценок.

Согласно источнику [7] характеристики уровней частоты отказов в зависимости от предполагаемого применения устанавливает ОАО «РЖД». Для определения уровня частоты отказов проведен анализ повреждаемости контактной сети и токоприемников электроподвижного состава по причине гололедообразования за период с 2018 по 2023 г. Предлагаемые уровни частоты отказов, полученные в результате обработки предоставленных данных, представлены в табл. 1.

Характер и тип возможного воздействия возникшего отказа на окружающую среду, людей и имущество устанавливается в процессе анализа его последствий. Уровни тяжести последствий и их количественные и качественные характеристики в зависимости от предполагаемого применения устанавливает ОАО «РЖД» [7]. Предлагаемые уровни тяжести последствий отказов по причине гололедообразования с учетом типовых уровней [7, табл. 2] представлены в табл. 2.

Итоговый уровень тяжести последствий из табл. 2 принимается как максимальный из сравниваемых по качественной и количественной оценке последствий.

В случае изменения исходных данных по отказам, учитываемых при оценке риска, или корректировки технической политики холдинга ОАО «РЖД» в части классификации отказов, уровни частоты и тяжести последствий, представленные в табл. 1 и 2 соответственно, подлежат актуализации.

Таблица 1

Предлагаемые уровни частоты отказов по причине гололедообразования

Уровень частоты	Частота возникновения отказов в год f , шт.	Характеристика уровня
Частый	$f \geq 18$	Частые отказы из-за возникновения гололеда – наличие опасности повреждений на постоянной основе
Вероятный	$12 \leq f < 18$	Предполагается частое наступление отказов из-за возникновения гололеда
Случайный	$8 \leq f < 12$	Ожидается неоднократное наступление отказов вследствие образования гололеда
Редкий	$4 \leq f < 8$	Обоснованное ожидание отказов вследствие образования гололеда
Крайне редкий	$2 \leq f < 4$	Предположение, что отказ вследствие образования гололеда появится в исключительных случаях
Маловероятный	$f < 2$	Предположение, что отказа вследствие образования гололеда не будет

Таблица 2

Предлагаемые уровни тяжести последствий отказов по причине гололедообразования

Уровень тяжести последствий	Последствия
Катастрофический	Задержка продолжительностью один час и более пассажирского, пригородного, грузового поезда на перегоне или железнодорожной станции или происшествия на железнодорожном транспорте, обусловленные нарушением правил безопасности движения и эксплуатации (1-я категория*) или инфраструктуре железнодорожного транспорта нанесен ущерб в течение года более 5000 МРОТ
Критический	Задержка продолжительностью один час и более пассажирского, пригородного, грузового поезда на перегоне или железнодорожной станции или происшествия на железнодорожном транспорте, обусловленные нарушением правил безопасности движения и эксплуатации (1-я категория*) или инфраструктуре железнодорожного транспорта нанесен ущерб в течение года от 1500 до 5000 МРОТ
Несущественный	Задержка продолжительностью от шести минут до одного часа пассажирского или пригородного поезда на перегоне (станции), продолжительностью от 15 минут до одного часа грузового поезда (2-я категория*) или инфраструктуре железнодорожного транспорта нанесен ущерб в течение года от 500 до 1500 МРОТ
Незначительный	Нарушения нормального функционирования технических средств железнодорожного транспорта, не имеющие последствий, соответствующих отказам 1-й и 2-й категории (3-я категория*) или инфраструктуре железнодорожного транспорта нанесен ущерб в течение года менее 500 МРОТ

Примечание:

* – категории указаны в соответствии с [8].

МРОТ – минимальный размер оплаты труда в соответствующем расчетном периоде.

Матрица рисков ущерба вследствие отсутствия или недостаточного количества устройств для удаления гололеда с проводов контактной сети для рассматриваемых дирекций показана в табл. 3.

Таблица 3

Матрица рисков ущерба

Уровень тяжести последствий		Незначительный	Несущественный	Критический	Катастрофический
		1	2	3	4
Частый	Ч	Ч1 нежелательный	Ч2 неприемлемый	Ч3 неприемлемый	Ч4 неприемлемый
Вероятный	В	В1 приемлемый	В2 нежелательный	В3 неприемлемый	В4 неприемлемый
Случайный	С	С1 приемлемый	С2 нежелательный	С3 нежелательный	С4 неприемлемый
Редкий	Р	Р1 не учитываемый	Р2 приемлемый	Р3 нежелательный	Р4 нежелательный
Крайне редкий	К	К1 не учитываемый	К2 не учитываемый	К3 приемлемый	К4 приемлемый
Маловероятный	М	М1 не учитываемый	М2 не учитываемый	М3 не учитываемый	М4 не учитываемый

Сопоставив уровень частоты возникновения отказа с уровнем тяжести его последствий, можно определить уровень риска – соответствующая ячейка матрицы рисков из табл. 3 (например, при вероятном уровне частоты возникновения отказов и несущественном уровне тяжести последствий, уровень риска – нежелательный). В табл. 4 приведены мероприятия и рекомендации, направленные на снижение каждого уровня риска.

Таблица 4

Мероприятия и рекомендации по снижению риска

Уровень риска	Ячейки матрицы риска из табл. 3	Мероприятия и рекомендации
Неприемлемый	Ч2, Ч3, Ч4, В3, В4, С4	Требуется незамедлительное принятие мер по снижению уровня риска и тяжести его последствий. Рекомендации: Актуализация нормативной и/или технической документации, устанавливающей порядок подготовки подразделений Трансэнерго/Дирекции тяги к работе в зимний период и нормы оснащённости техническими средствами. Необходимо приобретение дополнительных устройств для борьбы с гололедом для оснащения ими подразделений Трансэнерго/Дирекции тяги
Нежелательный	Ч1, В2, С2, С3, Р3, Р4	Мероприятия по уменьшению риска необходимо принять в возможно кратчайшие сроки. Рекомендации: Требуется дооснащение подразделений Трансэнерго или Дирекции тяги дополнительными устройствами борьбы с гололедом
Приемлемый	В1, С1, Р2, К3, К4	Необходима разработка плана по уменьшению или устранению риска, предусматривающего периодический анализ эффективности внедряемых мероприятий. Рекомендации: Необходимо провести расчет экономической эффективности дооснащения подразделений Трансэнерго или Дирекции тяги дополнительными устройствами борьбы с гололедом
Не учитываемый	Р1, К1, К2, М1, М2, М3, М4	Рекомендации: Нет существенной необходимости в приобретении дополнительных устройств борьбы с гололедом

Для определения влияния дооснащения подразделений Трансэнерго устройствами для удаления гололеда следует провести варьирование количества МОГ в вероятностной модели Байеса [9], в которой для дистанции электроснабжения определяется необходимый минимум количества МОГ из условия предотвращения недопустимого или нежелательного уровня риска (см. табл. 4). Как правило, увеличение количества МОГ ведет к снижению вероятности отказов, но не устраняет эту вероятность полностью. Цена и стоимость обслуживания дополнительных устройств приводят к увеличению затрат даже при отсутствии гололеда, поэтому расчет дополнительного количества следует ограничить при достижении требуемого технического эффекта.

Подобным образом, варьируя значения других влияющих факторов [9, табл. 2], можно оценить чувствительность полученного результата к изменениям погодных условий, размеров движения, использования схем плавки гололеда и профилактического подогрева проводов и др. Нужно отметить, что при обновлении исходных данных к расчету этот процесс происходит автоматически, т. к. предложенный математический аппарат учитывает данные факторы.

В узлах вероятностной сети Байеса указаны актуальные значения факторов, влияющих на вероятность наступления отказа, в т. ч. толщина стенки гололеда, начало отложений гололеда [10] и продолжительность гололедоопасного периода, интенсивность движения поездов, класс железнодорожной линии, количество железнодорожных путей и др.

При тяжести последствий, соответствующих допустимому уровню риска, рекомендуется выполнить оценку изменения последствий вероятных отказов при незначительном ($\pm 10\%$) изменении влияющих факторов в большую и в меньшую сторону, а также выполнить экономический расчет целесообразности приобретения дополнительных устройств для удаления гололеда.

Зная стоимостные показатели МОГ и ежегодные расходы на его эксплуатацию в течение срока службы, следует провести прогноз экономических результатов дооснащения подразделения. Для этого возможные суммарные расходы на восстановление инфраструктуры в границах подразделения в текущих условиях эксплуатации необходимо сравнить с аналогичными, полученными при изменении вероятности отказов вследствие дооснащения устройствами по борьбе с гололедом:

$$\sum_{j=1}^t R_{0j} > \left(\mathcal{E}_{\text{МОГ}} \left(\sum_{j=1}^t N_{0\text{МОГ}} + \sum_i N_{i\text{МОГ}} \right) + \sum_i N_{i\text{МОГ}} \cdot C_{\text{МОГ}} \right) + \sum_{j=1}^t R_{ij}, \quad (5)$$

где $\sum_{j=1}^t R_{0j}$ – возможные суммарные расходы на восстановление инфраструктуры в текущих условиях эксплуатации, руб.;

t – планируемый период использования МОГ, лет;

$\mathcal{E}_{\text{МОГ}}$ – ежегодные расходы на содержание и эксплуатацию всех МОГ подразделения Трансэнерго, руб.;

$N_{0\text{МОГ}}$ – текущее количество МОГ в подразделении Трансэнерго, шт.;

$N_{i\text{МОГ}}$ – количество приобретаемых МОГ, шт.

$C_{\text{МОГ}}$ – закупочная цена МОГ, руб.;

$\sum_{j=1}^t R_{ij}$ – возможные расходы на восстановление инфраструктуры после дооснащения подразделения Трансэнерго, руб.

При выполнении условия (5) дооснащение подразделений Трансэнерго считается целесообразным.

Определение необходимости дооснащения подразделений Дирекции тяги в границах дирекции по энергообеспечению Трансэнерго производится аналогично подразделениям Трансэнерго варьированием количества вибропантографов и пневмобарабанов в указанной выше вероятностной модели Байеса. Степень влияния факторов также определяется исходными данными к расчету и обновляется по мере появления новых.

При тяжести последствий, соответствующих незначительному или незначительному уровню, рекомендуется выполнить оценку изменения последствий вероятных отказов при незначительном ($\pm 10\%$) изменении влияющих факторов в большую и в меньшую сторону.

С учетом того, что наиболее тяжелые экономические последствия для ОАО «РЖД» имеют случаи задержки поездов, особенно произошедшие по причине отказов на перегонах, оценка тяжести последствий отказов должна определяться по длительности перерыва в движении на участке, относящемся к линейному подразделению Дирекции тяги. Поэтому при условии однозначной необходимости

дооснащения вибропантографами и пневмобарабанами допускается не проводить расчет экономической целесообразности.

Таким образом, входными данными к предлагаемой методике является вектор, содержащий погодные и эксплуатационные факторы, сведения о текущем оснащении подразделений Трансэнерго и Дирекции тяги устройствами для удаления гололеда и пр. Для эффективной работы необходимо обеспечить достоверность вводимых данных, т. к. искажение обстоятельств или неполный учет отказов влияет на дальнейшие расчеты.

В случае изменения данных табл. 1 и 2, произошедших в результате принятия новой технической политики ОАО «РЖД», потребуется корректировка численных значений показателей риска.

Выходными данными по предложенной методике оценки риска ущерба являются численные значения требуемого количества устройств для удаления гололеда при условии достижения приемлемого технического результата и построенная на их основе закономерность, отражающая вариативность полученных значений от отдельных влияющих факторов при неизменных значениях остальных.

Выводы

Для уменьшения и предотвращения экономического ущерба, обусловленного повреждениями контактной сети или токоприемников электроподвижного состава вследствие гололедообразования, подразделения Трансэнерго и Дирекции тяги должны быть оснащены необходимым количеством устройств для удаления гололеда, анализ особенностей эксплуатации которых позволил выявить критерии целесообразности применения указанных устройств на перегонах и станциях.

Усовершенствованная методика устанавливает риск ущерба и тяжесть последствий от повреждений в зависимости от фактической оснащенности подразделений Трансэнерго и Дирекций тяги вибропантографами, пневмобарабанами и МОГ, позволяя рассчитать необходимое количество устройств для удаления гололеда с учетом принятого уровня риска и требуемого технического эффекта.

Список литературы

1 **Бондарев, Н. А.** Контактная сеть / Н. А. Бондарев, В. Е. Чекулаев. – Москва : Маршрут, 2006. – С. 590. – ISBN 5-89035-315-2.

2 **Ковалев, А. А.** Разработка структуры матрицы рисков для оценки гололедообразования на участке контактной сети / А. А. Ковалев, А. В. Андриуков // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 6 (102). – С. 7–15. – ISSN 1997-0722.

3 **Ковалев, А. А.** Оценка риска отказа участка контактной сети / А. А. Ковалев, Т. Т. Шаюхов // Транспортное дело России. – 2015. – № 5 (120). – С. 142–145. – ISSN 2072-8689.

4 Инструкция по подготовке к работе и обеспечению надежности работы устройств электрооборудования в зимний период : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2019 № 2542/р (ред. распоряж. ОАО «РЖД» от 08.02.2021 № 220/р). – Москва : ОАО «РЖД», 2019.

5 **ГОСТ Р 51901-2002.** Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. – Москва : Издательство стандартов, 2002. – 23 с.

6 **Галкин, А. Г.** Методика проведения риск-анализа и прогнозирования показателей качества состояния контактной сети / А. Г. Галкин, А. Н. Митрофанов,

References

1 **Bondarev, N. A.** Contact network / N. A. Bondarev, V. E. Chekulaev. – Moscow : Marshrut, 2006. – P. 590. – ISBN 5-89035-315-2.

2 **Kovalev, A. A.** Development of the structure of the risk matrix for assessing ice formation on a section of the contact network / A. A. Kovalev, A. V. Andryukov // Vestnik transporta Povolzhya (Bulletin of Transport of the Volga Region). – 2023. – No. 6 (102). – P. 7–15. – ISSN 1997-0722.

3 **Kovalev, A.A.** Assessment of the risk of failure of a section of the contact network / A. A. Kovalev, T. T. Shayukhov // Transport business of Russia. – 2015. – No. 5 (120). – P. 142–145. – ISSN 2072-8689.

4 Instructions for preparation for operation and ensuring the reliability of power supply devices in winter : approved by the order of JSC Russian Railways dated 14.11.2019 No. 2542/r (as amended by the order of JSC Russian Railways dated 08.02.2021 No. 220/r). – Moscow : JSC Russian Railways, 2019.

5 **GOST R 51901-2002.** Reliability management. Risk analysis of technological systems. – Moscow : Publishing House of Standards, 2002. – 23 p.

6 **Galkin, A. G.** Methodology for conducting risk analysis and forecasting quality indicators of the state of the contact network / A. G. Galkin, A. N. Mitrofanov, S.A. Mitrofanov // Bulletin of the

С. А. Митрофанов // Вестник Самарского муниципального института управления. – 2011. – № 3 (18). – С. 172–182. – ISSN 2071-9558.

7 **ГОСТ Р 54505-2011.** Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 50 с.

8 Положение об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАС АНТ : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 1 октября 2018 г. № 2160/р.

9 Разработка вероятностной модели прогнозирования отказов в работе системы токосъема вследствие гололедообразования на проводах контактной сети / А. Н. Смердин, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков [и др.] // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 62–71. – ISSN 2220-4245.

10 **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.

Samara Municipal Institute of Management. – 2011. – No. 3 (18). – P. 172–182. – ISSN 2071-9558.

7 **GOST R 54505-2011.** Functional safety. Risk management in railway transport. – Moscow : Standartinform, 2011. – 50 p.

8 Regulation on the recording, investigation and analysis of failures in the operation of technical equipment on the infrastructure of JSC Russian Railways using the automated system KAS ANT : approved by the order of JSC Russian Railways dated October 1, 2018 No. 2160/r.

9 Development of a probabilistic model for predicting failures in the operation of the current collection system due to ice formation on the wires of the contact network / A. N. Smerdin, A. V. Tarasenko, I. E. Chertkov [et al.] // Journal of Transsib railway studies. – 2021. – No. 2 (46). – P. 62–71. – ISSN 2220-4245.

10 **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.

A. N. Smerdin, A. V. Tarasenko, I. E. Chertkov, A. S. Golubkov

IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR ASSESSING THE RISK OF DAMAGE FROM ICE FORMATION ON CONTACT NETWORK WIRES DUE TO THE ABSENCE OF ICE REMOVAL DEVICES

Abstract. The article considers the issues of equipping the divisions of Transenergo and the Traction Directorate with devices for mechanical removal of ice, vibrating pantographs and pneumatic drums. The method for assessing the risk of damage to JSC Russian Railways from the formation of ice on the contact network wires has been improved due to the lack of devices for removing ice from the contact wire in the required quantity in the structural divisions of Transenergo and the Traction Directorate. The levels of failure frequency and severity of their consequences due to ice formation have been proposed. Damage risk matrices and recommendations for risk reduction for each level have been compiled. Determination of the need to retrofit the divisions of Transenergo and the Traction Directorate with devices for removing ice is based on a comparison of the costs of restoring the infrastructure under current operating conditions and after retrofitting.

Keywords: contact network, pantograph, ice, damage assessment, risk matrix, frequency level, severity level of consequences.

For citation: Smerdin, A. N. Improvement of the methodology for assessing the risk of damage from ice formation on contact network wires due to the absence of ice removal devices / A. N. Smerdin, A. V. Tarasenko, I. E. Chertkov, A. S. Golubkov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 182–189. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_182.

Сведения об авторах**Смердин Александр Николаевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», доктор технических наук, профессор, первый проректор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой, e-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

Тарасенко Александр Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», кандидат технических наук, доцент, зам. зав. кафедрой по учебной работе, e-mail: alessandro-tar@yandex.ru

Чертков Иван Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», кандидат технических наук, доцент, e-mail: chertkovie@omgups.ru

Голубков Антон Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», кандидат технических наук, доцент, e-mail: anton.golubkov@gmail.com

Information about the authors**Smerdin Alexander Nikolaevich**

Omsk State Transport University (OSTU), Chair "Electric Power Supply of Railway Transport", Doctor of Engineering Sciences, Professor, First Vice-Rector, Vice-Rector for Research, Head of the Chair, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

Tarasenko Alexander Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU), Chair "Electric Power Supply of Railway Transport", Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Chair for Academic Affairs, e-mail: alessandro-tar@yandex.ru

Chertkov Ivan Evgenyevich

Omsk State Transport University (OSTU), Chair "Electric Power Supply of Railway Transport", Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: chertkovie@omgups.ru

Golubkov Anton Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU), Chair "Electric Power Supply of Railway Transport", Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: anton.golubkov@gmail.com

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

УДК 629.4.053.3

DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_190

*В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА**

Аннотация. Рассмотрена структура системы автоматического управления скоростью электропоезда. Использован пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования закон управления системы, обеспечивающий требуемое качество управления в установившемся и переходных режимах движения. Определены критерии качества управления скоростью. Путем имитационного моделирования в программной среде Embarcadero C++ Builder проведен сравнительный анализ эффективности работы системы автоматического управления при различной структуре ее закона управления: постоянной (пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования закон используется во всех режимах движения) и переменной (при разгоне или торможении используется пропорциональный, а в режиме стабилизации скорости – пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования). Для этого решена задача параметрического синтеза системы с использованием метода Нелдера – Мида, в результате чего найдены рациональные значения коэффициентов закона управления при каждой из исследуемых его структур. Установлено, что адаптация закона управления системы к изменению режима движения за счет использования переменной его структуры обеспечивает повышение качества управления скоростью электропоезда.

Ключевые слова: система автоматического управления, закон управления, имитационное моделирование, качество управления, параметрический синтез.

Для цитирования: Легкая, В. И. Совершенствование структуры системы автоматического управления скоростью электропоезда / В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 190–200. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_190.

Введение

В настоящее время актуальным направлением научных исследований является разработка и совершенствование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) контроля и управления движением скоростного и высокоскоростного подвижного состава [1]. На Московском центральном кольце (МЦК) проходит испытания система автоматического управления пригородных поездов на уровне автоматизации УА3 и готовится к внедрению система автоматического управления на уровне автоматизации УА4 [2]. Одной из управляющих подсистем ИТС, обеспечивающей безопасность движения и реализующей энергооптимальные режимы ведения поезда, является вышестоящая система автоведения (САВП). Достижение заданного САВП уровня скорости и поддержание ее в установленных согласно требованиям безопасности пределах обеспечивается исполнительным контуром САВП – системой автоматического управления (САУ) скоростью.

Поставленная в данной работе задача разработки САУ скоростью электропоезда заключается в выборе такой структуры системы и значений параметров ее закона управления, при которых обеспечивалось бы удовлетворительное качество регулирования скорости во всем диапазоне допустимых скоростей движения электропоезда.

Модель системы автоматического управления скоростью

Структура разработанной модели системы автоматического управления скоростью приведена на рис. 1 [3]. Данная модель реализована в программной среде Embarcadero C++ Builder.

Объектом управления ОУ модели САУ является электропоезд, математическое описание которого соответствует многомассовой модели. Представление поезда в виде цепочки твердых тел, соотносящихся с массами вагонов электропоезда-прототипа и соединенных между собой упруго-диссипативными связями, обосновано возможностью задавать параметры отдельно для каждого экипажа и учитывать расположение экипажей на различных элементах профиля пути.

v_i – скорость центра масс экипажа, м/с;

F_i – реакция в i -том межвагонном соединении, Н;

F_{Σ} – суммарная внешняя сила, действующая на i -й экипаж, Н.

В предлагаемой модели САУ измерительное устройство ИУ моделируется в виде датчика скорости с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ). Модель ИУ имитирует работу тракта измерения скорости, при этом преобразование частотно-модулированного сигнала с выхода датчика в цифровой эквивалент скорости выполняется в соответствии с принципом циклического частотомера [5]. При моделировании ИУ учитываются операции усреднения скорости, квантования по уровню и временной дискретизации. Усреднение скорости обеспечивается звеном с передаточной функцией $\frac{1 - e^{-pT}}{pT}$; импульсный элемент ИЭ_T выполняет операцию временной дискретизации с шагом T . В структуре ИУ (рис. 1) присутствует сумматор, на первый вход которого поступает сигнал измеренной скорости, восстановленный экстраполятором нулевого порядка с передаточной функцией $\frac{1 - e^{-pT}}{p}$, а на второй – сигнал методической погрешности измерения $\Delta v_m[nT]$, являющейся случайной величиной. Значение моделируемой погрешности $\Delta v_m[nT]$ пропорционально погрешности квантования по уровню и характеризуется распределением по закону Симпсона [6], при этом наибольшее значение $\Delta v_m[nT]$ принимается равным шагу квантования по уровню q и зависит от радиуса бандажа колесной пары по кругу катания R , вырабатываемых за один оборот колеса числа импульсов z и шага временной дискретизации T [5] (2):

$$q = \frac{2\pi R}{zT} \cdot 3,6 = 2,47 \text{ км/ч}, \quad (2)$$

где $R = 0,46$ м; $z = 42$; $T = 0,1$ с.

Вследствие этого сигнал на выходе измерительного устройства $v_{\text{изм}}^*[nT]$ представлен как (3):

$$v_{\text{изм}}^*[nT] = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} v_{\phi}(t) dt + \Delta v_m[nT], \quad (3)$$

где t – текущее время;

$\Delta v_m[nT]$ – случайная величина методической погрешности квантования, $n = 0, 1, 2, \dots$.

Наличие аддитивной помехи в сигнале измеренной скорости, обусловленной методической погрешностью измерительного тракта, негативно сказывается на характере изменения управляющего сигнала силы тяги, поступающего на вход тягового привода. Для уменьшения влияния погрешности измерения скорости на процесс управления реализована фильтрация сигнала $v_{\text{изм}}^*[nT]$ с использованием фильтра низких частот ФНЧ – фильтра Баттерворта 5-го порядка [7, 8]. В ходе ранее проведенных исследований выявлено, что применение такого фильтра, характеризующегося скоростью убывания его амплитудно-частотной характеристики, равной 100 дБ/дек в переходной полосе, обеспечивает необходимую фильтрацию измеренного сигнала $v_{\text{изм}}^*[nT]$ и, как следствие, допустимый уровень таких показателей управляющего сигнала силы тяги, как скорость изменения и амплитуда.

Неидеальный импульсный элемент, установленный в структуре САУ после фильтра низких частот, обеспечивает преобразование отфильтрованного сигнала в цифровую форму. Далее цифровой сигнал измеренной скорости $v_{\text{изм}}[nT]$ поступает на первый вход устройства сравнения (сумматора), реализующего операции вычисления с использованием поступающей на его второй вход информации о заданной в текущий момент времени скорости движения в виде сигнала $v_{\text{зи}}[nT]$, вырабатываемого задатчиком интенсивности ЗИ. Устройство ЗИ предназначено для плавного изменения значения заданной скорости $v_3[nT]$ с темпом, пропорциональным величине заданного ускорения $a_3 = 0,64$ м/с². Формирование сигнала $v_{\text{зи}}[nT]$ определяется следующей системой уравнений (4):

$$v_{\text{зи}}[nT] = \begin{cases} \text{если } v_3[nT] > v_3[(n-1)T], \text{ то} \\ v_{\text{зи}}[nT] = \begin{cases} v_3[(n-1)T] + a_3 \varepsilon T, \text{ если } v_3[(n-1)T] + a_3 \varepsilon T < v_3[nT], \\ v_3[nT], \text{ если } v_3[(n-1)T] + a_3 \varepsilon T \geq v_3[nT]; \end{cases} \\ \text{если } v_3[nT] < v_3[(n-1)T], \text{ то} \\ v_{\text{зи}}[nT] = \begin{cases} v_3[(n-1)T] - a_3 \varepsilon T, \text{ если } v_3[(n-1)T] - a_3 \varepsilon T > v_3[nT], \\ v_3[nT], \text{ если } v_3[(n-1)T] - a_3 \varepsilon T \leq v_3[nT]. \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

Устройство сравнения вычисляет рассогласование $\Delta v[nT]$ между входными сигналами $v_{\text{зи}}[nT]$ и $v_{\text{изм}}[nT]$. В дальнейшем значение $\Delta v[nT]$ поступает на вход пропорциональной части устройства управления УУ, а также на вход множителя, обеспечивающего совместно с нелинейным элементом НЭ включение в работу интегральной с прогнозом рассогласования части УУ.

Устройство управления реализует пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования закон управления с переменной структурой [3, 9], что обеспечивает высокую точность поддержания скорости в установившемся режиме при использовании разработанной САУ (см. рис. 1), учитывающей методическую погрешность измерения. Выбор используемой в текущий момент времени модификации закона управления – пропорциональной или пропорционально-интегральной с прогнозом рассогласования – определяется режимом движения поезда. В случае переходного режима движения, соответствующего разгону или торможению, реализуется пропорциональный закон управления P^* (5) (блок П, рис. 1):

$$P^*[nT] = k_1 \Delta v[nT], \quad (5)$$

где k_1 – коэффициент при пропорциональной части закона управления.

В случае, если режим движения электропоезда характеризуется как установившийся вследствие постоянства значения поддерживаемой скорости, УУ реализует пропорционально-интегральный с учетом прогноза рассогласования закон управления $P^* + IE^*$ (блоки П и И+Э, рис. 1), где IE^* определяется как (6):

$$IE^*[nT] = \frac{1}{k_2} \sum_{i=0}^n \Delta v_i T + k_3 f_3[nT], \quad (6)$$

где k_2, k_3 – коэффициенты соответственно при интегральной и прогнозной частях закона управления;

$f_3[nT] = \sum_{i=0}^M \Delta v[(n-M+i)T] L_i^{\text{э,кб,л}}$ – прогноз величины рассогласования скорости $\Delta v[(n+1)T]$ в момент времени nT для следующего момента времени $(n+1)T$; M – количество отсчетов, используемых экстраполятором при работе.

Условием, при котором осуществляется изменение структуры регулятора скорости, является выполнение соотношения между заданной и измеренной скоростями движения, причем это соотношение зависит от режима движения поезда – разгон (тяга) или замедление (торможение). При разгоне изменение структуры осуществляется при выполнении неравенства $v_{\text{изм}} \geq (v_3 - 2)$ км/ч, а при торможении $v_{\text{изм}} \leq (v_3 + 2)$ км/ч. Принятое в неравенствах значение «трубки» скорости, равное 2 км/ч, выбрано в результате проведения пробных расчетов и обосновано необходимостью заблаговременного накопления интегральной составляющей регулятора ошибки регулирования для наилучшей минимизации отклонения скорости движения поезда от заданной.

С учетом вышесказанного, в переходных режимах движения реализуется P^* закон управления (блок П, рис. 1), а при стабилизации скорости на заданном значении $P^* + IE^*$ закон (блоки П и И+Э, рис. 1). В том случае, если в процессе движения в режиме стабилизации осуществляется изменение значения заданной скорости движения v_3 , то выполняется переход от пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования закона управления к пропорциональному, при этом для повышения качества управления приравниваются нулю значения интегральной и прогнозной частей регулятора.

Обоснование выбора закона управления с переменной структурой будет рассмотрено ниже. Реализация выбора закона управления описана следующей системой уравнений (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta v_1[nT] = |v_{\text{изм}}[nT] - v_3[nT]|; \\ y = \begin{cases} 0, & \text{если } \Delta v_1[nT] > 2, \\ 1, & \text{если } \Delta v_1[nT] \leq 2; \end{cases} \\ P^*[nT] = k_1 \Delta v_1[nT]; \\ IE^*[nT] = \begin{cases} \frac{1}{k_2} \sum_{i=0}^n \Delta v_i T + k_3 f_3[nT], & \text{если } y = 1, \\ 0, & \text{если } y = 0; \end{cases} \\ F_{\text{зад}}[nT] = P^*[nT] + IE^*[nT]. \end{array} \right. \quad (7)$$

Сигнал, пропорциональный заданному значению силы тяги $F_{\text{зад}}[nT]$ с выхода УУ, преобразовывается из цифровой формы в аналоговую при помощи последовательно соединенных идеального импульсного элемента ИЭ_T и экстраполятора нулевого порядка $\frac{1 - e^{-pT}}{p}$. Преобразованный сигнал $F_{\text{зад}}(t)$ поступает на вход логического блока ЛБ, определяющего ограничения, накладываемые на тяговые и тормозные характеристики. С выхода ЛБ сигнал $F'_{\text{зад}}$ поступает на вход тягового привода, модель которого представлена звеном 1-го порядка с передаточной функцией $\frac{k}{T_{\text{т.э.п.}} p + 1}$. Постоянная времени $T_{\text{т.э.п.}} = 1,28$ с определена в соответствии с требованиями к величине допустимой плавности хода поезда в переходных режимах движения [10].

Для подтверждения эффективности работы во всем диапазоне допустимых скоростей движения пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования закона управления с переменной структурой осуществим сравнительный анализ результатов моделирования работы САУ скоростью с различной структурой закона управления. Используемыми режимами движения электропоезда за общее время моделирования $t = 250$ с являются последовательный разгон до скоростей 30 км/ч и 140 км/ч с выполнением стабилизации при достижении каждого из заданных значения скорости. Выбор соответствующих значений v_3 обоснован различной величиной реализуемой при разгоне силы тяги в соответствии с тяговой характеристикой электропоезда и накладываемыми на нее ограничениями на максимально возможное тяговое усилие. Отметим, что разгон с последующей стабилизацией для скорости 30 км/ч выполняется за интервал времени 0–50 с, а для 140 км/ч – от 50 до 250 с. Моделирование движения электропоезда осуществляется на площадке с целью оценки качества регулирования скорости в зависимости от структуры закона САУ, исключая при этом возможное влияние переменного профиля пути на процесс регулирования. В начале проводится моделирование работы системы с постоянной вне зависимости от режима движения структурой пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования закона управления, далее моделируется работа системы с законом управления, обладающим переменной структурой и функционирующим согласно (7). Значения параметров используемого закона управления САУ, а также частоты среза фильтра Баттерворта для каждого из вариантов моделирования будут найдены в результате решения задачи параметрической оптимизации системы.

Критерии качества управления

Использование разработанной структуры системы автоматического управления скоростью обосновано необходимостью соблюдения требований к устойчивости системы, а также выполнения требований показателей, характеризующих качество протекания процесса регулирования скорости в

переходных и установившемся режимах движения. В качестве используемых показателей качества выбраны следующие [11]: вид переходного процесса; время протекания переходного процесса $t_{\text{пер}}$, определяемое как время последнего входа регулируемой величины v_{ϕ} в «трубку» скорости, равную ± 1 км/ч от значения v_3 ; перерегулирование σ , максимальная допустимая величина которого по условиям соблюдения безопасности движения не должна превышать $[\sigma] = 1$ км/ч; величина квадратичной интегральной ошибки $I_{2\text{уст}}$, определяемая в режиме стабилизации скорости (8):

$$I_{2\text{уст}} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \Delta v^2 dt}. \quad (8)$$

Задача параметрической оптимизации

Удовлетворительное качество управления обеспечивается выбором рациональных значений параметров закона управления и фильтра низких частот, при этом показатели качества предъявляют различные требования к САУ, в т. ч. к значениям ее параметров. Для проведения параметрического синтеза системы с учетом соблюдения условия компромисса между показателями качества использована целевая функция свёртки – функция суммарных допустимых потерь (9):

$$\Pi = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{U_i - U_i^*}{U_i^{**} - U_i^*} \right\}^2}, \quad (9)$$

где U_i^* – минимальное значение i -го критерия ($i = 1, 2, \dots, m$), являющееся результатом расчета однокритериальной оптимизации по данному i -му критерию;

U_i^{**} – максимальное или допустимое значение i -го критерия.

Минимальное значение целевой функции Π в результате решения задачи параметрической оптимизации САУ соответствует рациональным параметрам $k_1, k_2, k_3, M, \omega_c$, при которых совокупность принятых показателей качества принимает удовлетворительные значения. Поиск минимума Π реализован с использованием метода Нелдера – Мида [12].

В результате решения задачи параметрического синтеза САУ определены следующие рациональные значения параметров закона управления, а также частоты среза фильтра:

– $k_1 = 36582$, $k_2 = 0,0168021$, $k_3 = 5739$, $M = 36$, $\omega_c = 6,11042$ Гц для САУ с постоянной структурой закона управления;

– $k_1 = 58218$, $k_2 = 0,0001004$, $k_3 = 25789$, $M = 24$, $\omega_c = 6,33364$ Гц для САУ с переменной структурой закона управления.

Отметим следующие изменения значений параметров закона управления с переменной структурой по сравнению со значениями параметров при постоянной структуре: значение коэффициента при пропорциональной части k_1 увеличилось в 1,6 раза; значение коэффициента при интегральной части k_2 уменьшилось в 167 раз; коэффициент при прогнозной части k_3 увеличился в 4,5 раза, при этом количество отсчетов M , используемых экстраполятором при работе уменьшилось в 1,5 раза. Значение частоты среза ω_c в обоих случаях составило ≈ 6 Гц.

Результаты имитационного моделирования

На рис. 2, а, б, в приведены результаты моделирования работы САУ скоростью с постоянной во всех режимах движения структурой закона управления, а именно: зависимости от времени заданной скорости с задатчика интенсивности $v_{\text{зи}}(t)$, измеренной скорости $v_{\text{изм}}(t)$, фактической скорости движения $v_{\phi}(t)$. Для оценки эффективности применяемой структуры рассмотрим фрагменты процесса моделирования, соответствующие участкам стабилизации скорости (рис. 2, б, в).

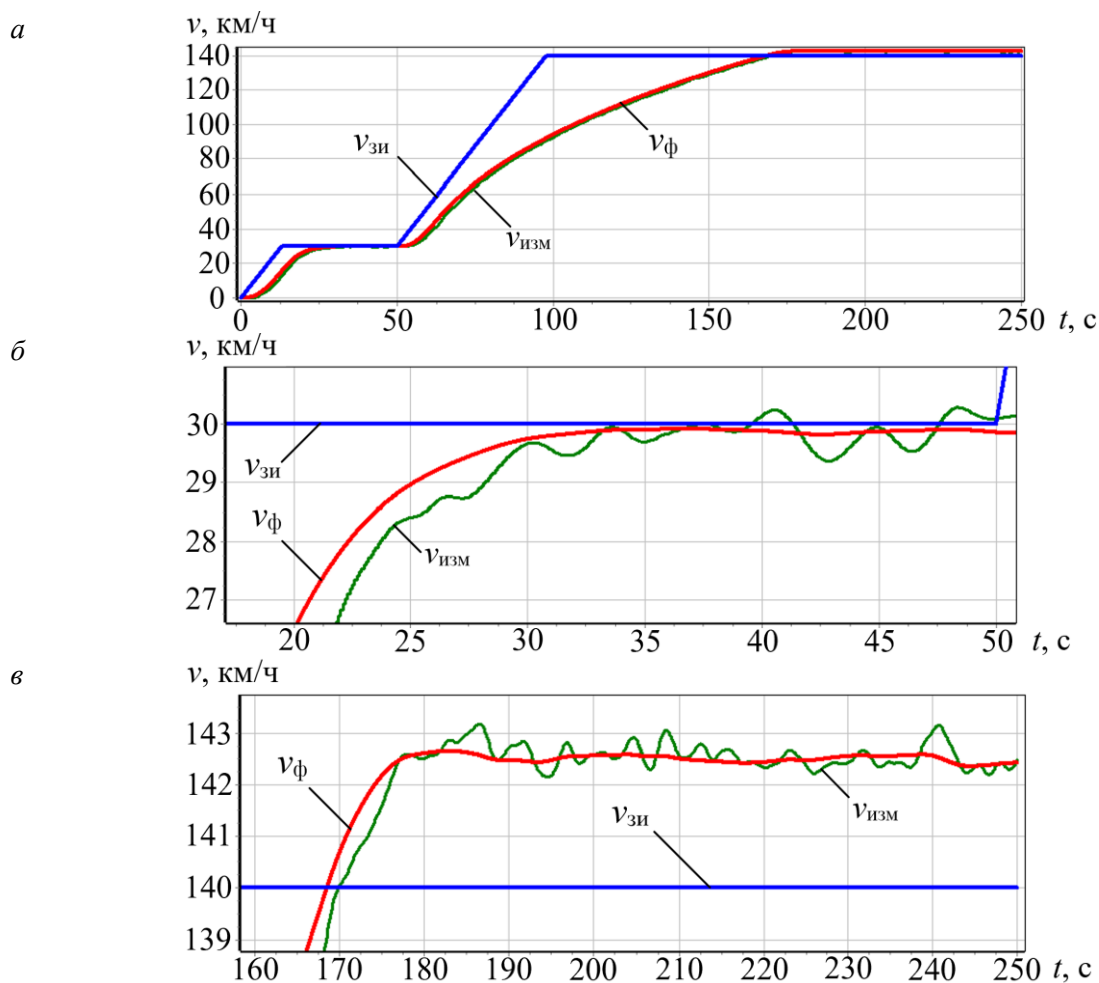


Рис. 2. Результаты моделирования работы САУ скоростью с постоянной структурой закона управления:

a – на интервале 0–250 с; *б* – на интервале 20–50 с; *в* – на интервале 160–250 с

Как видно на рис. 2, *б*, переходный процесс разгона электропоезда до заданной скорости $v_3 = 30$ км/ч с дальнейшей стабилизацией на этом значении протекает удовлетворительно: время регулирования составляет $t_{\text{рег}} = 24,262$ с; вид переходной функции регулируемой величины – монотонный, вследствие чего перерегулирование отсутствует; величина квадратичной интегральной ошибки в установившемся режиме $I_{2\text{уст}} = 0,296$.

На рис. 2, *в* приведены результаты расчёта, соответствующие режиму стабилизации скорости при $v_3 = 140$ км/ч. Как видно, переходная функция является аperiodической. Значения показателей качества составили: величина квадратичной интегральной ошибки $I_{2\text{уст}} = 2,411$; значение перерегулирования $\sigma = 2,654$ км/ч и превышает допустимое по условиям безопасности $[\sigma] = 1$ км/ч, причём время, в течение которого происходит ликвидация перерегулирования, превышает время моделирования. Вследствие накопленной интегральной ошибки за время расчёта переходный процесс не завершился ($v_{\text{ф}}$ находится вне принятой «трубки» скорости), поэтому определение времени регулирования невозможно.

Результаты моделирования работы САУ скоростью при переменной в зависимости от режима движения структуре закона управления приведены на рис. 3, *a*, *б*, *в*.

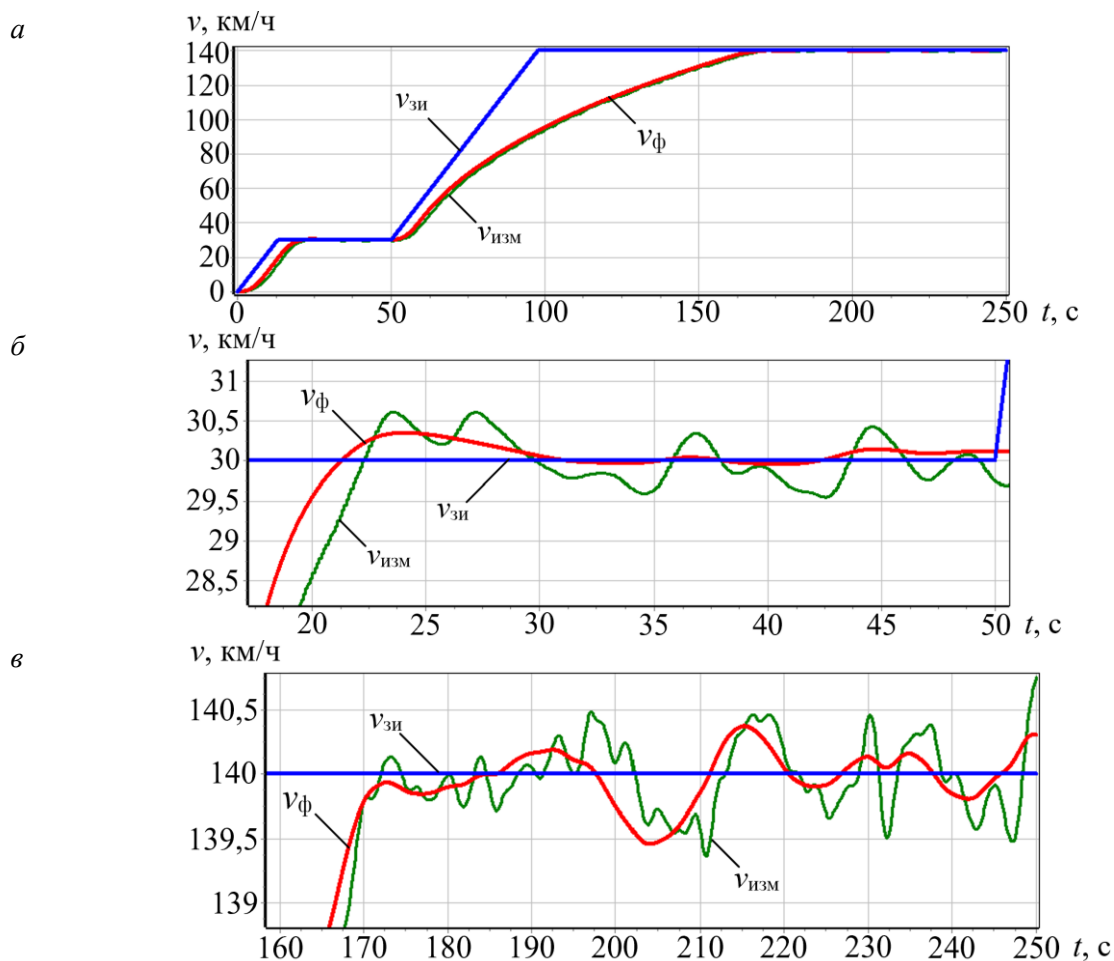


Рис. 3. Результаты моделирования работы САУ скоростью с переменной структурой закона управления:

а – на интервале 0–250 с; *б* – на интервале 20–50 с; *в* – на интервале 160–250 с

Аналогично вышеприведенному рассмотрим каждый из этапов стабилизации скорости. Согласно рис. 3, *б*, вид переходного процесса при разгоне электропоезда до $v_3 = 30$ км/ч является апериодическим с перерегулированием $\sigma = 0,349$ км/ч; время регулирования составило $t_{\text{рег}} = 19$ с, что более чем на 5 секунд меньше аналогичного показателя, полученного в предыдущем случае; величина интегральной ошибки уменьшилась с $I_{2\text{уст}} = 0,296$ до $I_{2\text{уст}} = 0,200$, таким образом, возросла точность поддержания скорости в режиме стабилизации.

Результаты моделирования работы САУ, соответствующие участку стабилизации скорости на значении $v_3 = 140$ км/ч, приведены на рис. 3, *в*. Качество регулирования скорости на рассматриваемом участке характеризуется следующими значениями показателей: вид переходной функции – монотонный, при этом дальнейшие колебания фактической скорости в диапазоне $\pm 0,5$ км/ч обоснованы характером изменения отфильтрованного сигнала $v_{\text{изм}}$; максимальное абсолютное отклонение составило $\approx 0,5$ км/ч, что в 5,3 раза меньше по сравнению с предыдущим рассмотренным вариантом; т.к. переходной процесс был завершен, определено время регулирования $t_{\text{рег}} = 116,632$ с; значение показателя величины квадратичной интегральной ошибки в установившемся режиме уменьшилось с $I_{2\text{уст}} = 2,411$ (рис. 2, *в*) до $I_{2\text{уст}} = 0,234$.

Как видно из представленных результатов, применение закона управления с постоянной структурой недопустимо по причине невыполнения требований безопасности и требований, предъявляемых к показателям качества, при реализации движения электропоезда при высоких значениях заданной скорости.

В свою очередь, применение закона управления с переменной структурой значительно повышает качество управления в переходных и установившемся режимах движения, а именно: при малых скоростях движения значительно сокращается время регулирования (примерно на 22 %) и повышается точность поддержания скорости в установившемся режиме (примерно на 32,5 %); при больших скоростях движения

значительно повышается точность поддержания скорости в установившемся режиме (примерно на 90 %), вследствие чего значение максимального абсолютного отклонения регулируемой величины уменьшилось на 81 %.

Заключение

Проведение сравнительного анализа результатов имитационного моделирования работы системы автоматического управления скоростью с различными модификациями закона управления подтвердило эффективность использования в качестве ее закона управления пропорционально-интегрального с прогнозом рассогласования с переменной структурой, при котором обеспечивается высокая точность регулирования и соблюдение требований безопасности во всем диапазоне допустимых скоростей.

Установлено, что для достижения удовлетворительного качества управления скоростью на протяжении всего движения электропоезда следует использовать в переходных режимах движения (разгон, торможение) пропорциональный закон управления, а в установившемся (при стабилизации скорости) пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования.

Таким образом, разработанная структура САУ скоростью рекомендована к использованию на современном моторвагонном подвижном составе.

Список литературы

- 1 **Охотников, А. Л.** Проекты развития систем автоматического управления движением поездов / А. Л. Охотников, И. А. Волкова // Наука и технологии железных дорог. – 2023. – Т. 7, № 1 (25). – С. 25–31. – ISSN 2587-5752.
- 2 **ГОСТ Р 70059–2022.** Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозок пассажиров в пригородном сообщении : принципы построения и основные функциональные требования. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 16 с.
- 3 **Baranov, L. A.** Automatic Speed Control System for Commuter Electric Trains / L. A. Baranov, V. I. Legkaya, O. E. Pudovikov // Russian Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 95, No. 9. – P. 773–779. – DOI 10.3103/S1068371224700986.
- 4 Расчеты и испытания тяжеловесных поездов : монография / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер [и др.]; под ред. Е. П. Блохина. – Москва : Транспорт, 1986. – 263 с.
- 5 Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов ; под ред. Л. А. Баранова. – Москва : Транспорт, 1990. – 272 с. – ISBN 5-277-00964-7.
- 6 **Баранов, Л. А.** Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления / Л. А. Баранов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 304 с. – ISBN 5-283-01520-3.
- 7 **Вадутов, О. С.** Электроника. Математические основы обработки сигналов : учебник и практикум для вузов / О. С. Вадутов. – Москва : Издательство Юрайт, 2022. – 307 с. – ISBN 978-5-9916-6551-3.
- 8 **Лэм, Г.** Аналоговые и цифровые фильтры: пер. с англ. / Г. Лэм. – Москва : Мир, 1982. – 589 с.

References

- 1 **Okhotnikov, A. L.** Projects for the development of automatic train control systems / A. L. Okhotnikov, I. A. Volkova // Science and Technology of Railways. – 2023. – Vol. 7, No. 1 (25). – P. 25–31. – ISSN 2587-5752.
- 2 **GOST R 70059–2022.** Management and control systems of railway transport for passenger transportation in suburban traffic : principles of construction and basic functional requirements. – Moscow : Russian Institute of Standardization, 2022. – 16 p.
- 3 **Baranov, L. A.** Automatic Speed Control System for Commuter Electric Trains / L. A. Baranov, V. I. Legkaya, O. E. Pudovikov // Russian Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 95, No. 9. – P. 773–779. – DOI 10.3103/S1068371224700986.
- 4 Calculations and tests of heavy trains : monograph / E. P. Blokhin, L. A. Manashkin, E. L. Stambler [et al.]; edited by E. P. Blokhin. – Moscow : Transport, 1986. – 263 p.
- 5 **Baranov, L. A.** Microprocessor-based systems for automatic control of electric rolling stock / L. A. Baranov, Y. M. Golovicher, E. V. Erofeev, V. M. Maksimov ; edited by L. A. Baranov. – Moscow : Transport, 1990. – 272 p. – ISBN 5-277-00964-7.
- 6 **Baranov, L. A.** Level quantization and time discretization in digital control systems / L. A. Baranov. – Moscow : Energoatomizdat, 1990. – 304 p. – ISBN 5-283-01520-3.
- 7 **Vadutov, O. S.** Electronics. Mathematical foundations of signal processing : textbook and workshop for universities / O. S. Vadutov. – Moscow : Yurait Publishing House, 2022. – 307 p. – ISBN 978-5-9916-6551-3.
- 8 **Lam, G.** Analog and digital filters: translated from English / G. Lam. – Moscow : Mir, 1982. – 589 p.

9 Легкая, В. И. Система автоматического управления скоростью с адаптацией к изменению режима движения электропоезда / В. И. Легкая, О. Е. Пудовиков // Исследования и развитие рельсового и автомобильного транспорта : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 22–23 мая 2024 года. – Екатеринбург : УрГУПС, 2024. – С. 79–83. – ISBN 9785946145695.

10 Баранов, Л. А. Модели и методы синтеза микропроцессорных систем управления скоростью электроподвижного состава с непрерывным управлением тягой / Л. А. Баранов // Вестник МИИТа. – Вып. 10. – Москва : МИИТ, 2004. – С. 3–16.

11 Баранов, Л. А. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом : учебник : в 3 ч. Ч. 1 : Теория автоматического управления / Л. А. Баранов, А. Н. Савоскин, О. Е. Пудовиков // под ред. Л. А. Баранова и А. Н. Савоскина. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 400 с. – ISBN 978-5-89035-616-1.

12 Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование : пер. с англ. / Д. Химмельблау. – Москва : Мир, 1975. – 534 с.

9 Legkaya, V. I. Automatic speed control system with adaptation to changes in the mode of movement of the electric train / V. I. Legkaya, O. E. Pudovikov. Research and development of rail and road transport : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Yekaterinburg, May 22-23, 2024. – Yekaterinburg : UrGUPS, 2024. – P. 79–83. – ISBN 9785946145695.

10 Baranov, L. A. Models and methods of synthesis of microprocessor-based speed control systems for electric rolling stock with continuous traction control / L. A. Baranov // Bulletin of MIIT. – Issue 10. – 2004. – Vol. 95, No. 9. – P. 3–16.

11 Baranov, L. A. Automated control systems for electric rolling stock : textbook : in 3 parts. Part 1 : Theory of automatic control / L. A. Baranov, A. N. Savoskin, O. E. Pudovikov // Edited by L. A. Baranov and A. N. Savoskin. – Moscow : FSBEI “Educational and methodological Center for education in railway transport”, 2013. – 400 p. – ISBN 978-5-89035-616-1.

12 Himmelblau, D. Applied nonlinear programming : translated from English / D. Himmelblau. – Moscow : Mir, 1975. – 534 p.

V. I. Legkaya, O. E. Pudovikov

IMPROVING THE STRUCTURE OF THE AUTOMATIC SPEED CONTROL SYSTEM OF AN ELECTRIC TRAIN

Abstract. The article considers the structure of the automatic speed control system for electric trains. The proportional-integral control law with a mismatch prediction is used, which ensures the required quality of control in steady-state and transient motion modes. The quality criteria for speed control are determined. By means of simulation modeling in the Embarcadero C++ Builder software environment, a comparative analysis of the efficiency of the automatic control system is carried out with different structures of its control law: constant (proportional-integral with a mismatch prediction is used in all motion modes) and variable (the proportional law is used during acceleration or braking, and the proportional-integral law with a mismatch prediction is used in the speed stabilization mode). For this purpose, the problem of parametric synthesis of the system is solved using the Nelder-Mead method, as a result of which rational values of the coefficients of the control law are found for each of its structures under study. It is established that the adaptation of the system control law to a change in the driving mode due to the use of its variable structure ensures an increase in the quality of electric train speed control.

Keywords: automatic control system, control law, simulation modeling, control quality, parametric synthesis.

For citation: Legkaya, V. I. Improving the structure of the automatic speed control system of an electric train / V. I. Legkaya, O. E. Pudovikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 190–200. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_190.

Сведения об авторах**Легкая Валерия Игоревна**

Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)),
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
аспирант,
e-mail: tiger.rut@yandex.ru

Пудовиков Олег Евгеньевич

Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)),
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: olegep@mail.ru

Information about the authors**Legkaya Valeria Igorevna**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair «Electric Trains and Locomotives»,
Postgraduate Student,
e-mail: tiger.rut@yandex.ru

Pudovikov Oleg Evgenievich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair «Electric Trains and Locomotives»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Chair,
e-mail: olegep@mail.ru

П. А. Харченко

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ СРЕДСТВ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ, ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВА

Аннотация. Рассматривается совершенствование системы и технологии эксплуатации тягового подвижного состава на основе анализа эксплуатационных данных, полученных машинистами различного уровня квалификации в процессе управления локомотивами. Для оценки указанных данных использовались средства объективного контроля – бортовые регистраторы параметров движения, микропроцессорные системы управления и диагностики, а также приборы безопасности и автоведения. Разработана и внедрена методика оценки соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава, а также рейтинговая система оценки машинистов, позволившая снизить операционные риски и повысить эффективность эксплуатации подвижного состава. Методика реализована в эксплуатационных локомотивных депо Северо-Кавказской дирекции тяги и использована в концепции модели дифференцированного подбора и назначения машинистов локомотивов на рейсы в зависимости от категорий поездов.

Ключевые слова: безопасность движения, надежность, технология эксплуатации, подвижной состав, локомотивная бригада, средства диагностики и мониторинга технического состояния.

Для цитирования: Харченко, П. А. Совершенствование системы и технологии эксплуатации подвижного состава на основе анализа информации средств регистрации параметров движения, диагностики и мониторинга технического состояния локомотива / П. А. Харченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 201–210. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_201.

Введение

Долгосрочной стратегией и программой развития холдинга «Российские железные дороги» определены ключевые цели по повышению уровня безопасности транспортной системы страны, надежности и энергоэффективности перевозок [1–2]. Дирекция тяги – основной филиал ОАО «РЖД», основная задача которого заключается в обеспечении потребности в локомотивных бригадах и эксплуатируемом парке локомотивов на планируемый объем перевозок грузов и пассажиров с учетом принципов клиентоориентированности при безусловном соблюдении требований безопасности, надежности и технологии эксплуатации подвижного состава. На сегодняшний день актуальным направлением деятельности данного подразделения является совершенствование системы и технологии эксплуатации тягового подвижного состава (ТПС) в условиях реализации полигонных принципов управления движением поездов для повышения технико-экономических показателей работы локомотивного комплекса [3–4].

Для обеспечения требований безопасности движения, реализации тяжеловесного грузового движения и увеличения скорости перевозки грузов и пассажиров Дирекцией тяги производится обновление парка локомотивами с улучшенными техническими характеристиками на всех полигонах железных дорог. Экономия эксплуатационных расходов от приобретения ТПС достигается за счет увеличения коэффициента готовности к эксплуатации (КГЭ), надежности, а также снижения продолжительности и изменения структуры ремонтного цикла и удельного потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Для повышения надежности ТПС и ответственности за качество проведенного ремонта подразделением решены важные стратегические задачи по переходу на полное сервисное обслуживание локомотивного парка, укрупнению и оптимизации числа ремонтных локомотивных депо.

Нарушения режимов эксплуатации локомотивов вследствие низкого уровня технических знаний или невыполнения требований должностных обязанностей машинистами приводят к отказам технических средств (ОТС), сбоям в графике движения поездов, необходимости проведения внеплановых ремонтов, что снижает надежность локомотивного парка и приводит к необоснованным издержкам и простоям ТПС на сервисном обслуживании. Для минимизации операционных рисков, связанных с влиянием машинистов на технологию эксплуатации подвижного состава в процессе обслуживания и

управления локомотивами, в ОАО «РЖД» реализуется Программа развития человеческого капитала, которая регламентирует системную работу в процессах подбора, оценки, обучения и развития контингента локомотивных бригад [5].

Несмотря на весь комплекс мероприятий по повышению безопасности движения и надежности подвижного состава на инфраструктуре ОАО «РЖД», остаются высокими риски возникновения транспортных происшествий и событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта (далее – событий) по ремонтной и эксплуатационной составляющим в локомотивном комплексе. По итогам работы за 2024 год уровень безопасности движения для локомотивного комплекса (удельное количество событий на 1 млн поездо-км) при целевом значении 0,135 не выполнен и составил 0,186, в том числе с дифференцированием по составляющим: 0,133 – ремонтная, 0,053 – эксплуатационная. В абсолютных единицах потери поездо-часов из-за отказов технических средств и технологических нарушений за 2024 год по локомотивному комплексу составили 161,1 тыс. часов, в удельных единицах на 1 млн км линейного пробега – 97,9 часов [6].

Высоким остается уровень эксплуатационной составляющей, поэтому для снижения операционных рисков необходимо совершенствовать технологию эксплуатации ТПС, основанную на системе сбалансированных показателей эксплуатации подвижного состава с последующей выработкой управленческих решений, направленных на повышение квалификации ремонтного и эксплуатационного персонала и качества управления жизненным циклом локомотива.

Методика расчета

С целью обеспечения безопасности движения, надежности подвижного состава, рационального использования эксплуатационных характеристик локомотива, на сегодняшний день остается актуальным вопрос разработки методики оценки соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава на основе использования инновационных средств и методов обработки информации [7].

В современных автоматизированных системах управления эксплуатацией и ремонтом ТПС источником получения данных должны служить средства объективного контроля параметров эксплуатации локомотивов – бортовые регистраторы параметров движения, микропроцессорные системы управления и диагностики, приборы безопасности и автоведения. Они позволяют производить сбор, систематизацию, хранение и анализ информации об эксплуатации подвижного состава и алгоритмах вождения поездов посредством специализированных автоматизированных систем управления и рабочих мест на железнодорожном транспорте (АСУ ЖТ, АРМ). Критерии и источники информации для оценки параметров выполнения технологии эксплуатации подвижного состава представлены в табл. 1 [8–9].

Таблица 1

Критерии оценки технологии эксплуатации подвижного состава

№ п/п	Показатель	Критерий оценки качества выполнения технологии эксплуатации ТПС	Источник информации
1	Безопасность движения подвижного состава, сохранность транспортной инфраструктуры, окружающей среды, груза, жизни и здоровья пассажиров.	– Транспортные происшествия – События – ОТС 1, 2, 3-й категорий – нарушения при управлении автотормозами (грубые и прочие)	Приборы безопасности и автоведения (КЛУБ-У, БЛОК, САУТ-ЦМ, УСАВП и др.), АСУ ЖТ (КАСАНТ, НБД, РБ, ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и др.)
2	Бюджет рабочего времени ТПС (с декомпозицией по элементам оборота)	– Технологические нарушения 1-й и 2-й категорий	АСУ ЖТ (КАСАНТ, ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и др.)
3	Надежность ТПС (влияние эксплуатационной составляющей)	– Нарушения режимов эксплуатации локомотивов	Микропроцессорные системы управления и диагностики (МСУД МПСУ), приборы безопасности локомотива (САУТ-ЦМ, КЛУБ-У, БЛОК), АСУ ЖТ (НБД)

Окончание табл. 1

№ п/п	Показатель	Критерий оценки качества выполнения технологии эксплуатации ТПС	Источник информации
4	Качество использования эксплуатационных характеристик и параметров подвижного состава	– Соблюдение нормативного графика движения поездов	АСУ ЖТ (КАСАНТ, НБД, ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и др.)
5	Энергоэффективность	– Потребление и возврат (рекуперация) электроэнергии и дизельного топлива на тягу поездов и маневровую работу	Системы автоведения и ресурсосбережения, установленные на локомотиве (УСАВП, РПРТ, АПК «БОРТ», АСК ВИС), АСУ ЖТ (КИХ SAS, ЦОММ)
6	Плавность хода подвижного состава, комфортность перевозки пассажиров, сохранность груза	– Продольно-динамические реакции в поезде, их критические значения в различных режимах управления ТПС	Имитационная модель поезда на основе синтеза программных комплексов «Универсальный механизм» и Matlab Simulink

В процессе эксплуатации подвижного состава ключевое влияние на безопасность, надежность и качественные показатели оказывают критерии № 1–3 (см. табл. 1), а критерии № 4–6 (см. табл. 1) отражают параметры, влияющие на энергоэффективность, плавность хода и качество использования эксплуатационных характеристик ТПС. Проранжируем критерии № 1–3, связанные с операционными рисками возникновения транспортных происшествий, событий, отказов технических средств, нарушений технологии и режимов эксплуатации ТПС, учитывая вероятность возникновения и тяжесть последствий, с применением метода экспертных оценок. Таким образом, получим девять частных критериев, где максимальный ранг имеют события, а минимальный – нарушения режимов эксплуатации ТПС. Случаи возникновения транспортных происшествий (аварии, крушения), автоматически определяют квалификацию локомотивной бригады (л.б.) как несовместимую с эксплуатацией локомотива на инфраструктуре ОАО «РЖД» (табл. 2). Для установления степени тяжести влияния каждого фактора на технологию эксплуатации подвижного состава необходимо определить их веса c_1, \dots, c_9 . Поскольку сами веса считаем упорядоченными, но более никакой информации об этих величинах не задано, будем определять их по правилу Фишберна [10]:

$$c_i = \frac{2 \cdot (m - i + 1)}{(m + 1) \cdot m}, \quad i = 1 \dots m, \quad (1)$$

где i – ранг отдельного показателя; m – количество оцениваемых показателей.

В результате получаем следующие значения весовых коэффициентов: $c_1 = 0,2$; $c_2 = 0,1778$; $c_3 = 0,1556$; $c_4 = 0,1333$; $c_5 = 0,1111$; $c_6 = 0,0888$; $c_7 = 0,0666$; $c_8 = 0,0444$; $c_9 = 0,0222$.

Таблица 2

Статистическая информация для оценки технологии эксплуатации подвижного состава

№ п/п	Критерий оценки качества выполнения технологии эксплуатации ТПС M_{ψ}	Число нарушений x_i , ед.	Вес c_i	Удельный показатель нарушений на 10 тыс. лок.км для 1 л.б. h_i^* , ед.
1	Транспортные происшествия	0	-	-
2	События	1	0,2	$1,5 \cdot 10^{-4}$
3	ОТС 1-й категории	3	0,1778	$4,5 \cdot 10^{-4}$
4	ОТС 2-й категории	8	0,1556	$1,2 \cdot 10^{-3}$
5	ОТС 3-й категории	21	0,1333	$3,16 \cdot 10^{-3}$
6	Грубые нарушения при управлении автотормозами	622	0,1111	$9,355 \cdot 10^{-2}$

Окончание табл. 2

№ п/п	Критерий оценки качества выполнения технологии эксплуатации ТПС $N\psi$	Число нарушений x_i , ед.	Вес c_i	Удельный показатель нарушений на 10 тыс. лок.км для 1 л.б. h_i^* , ед.
7	Прочие нарушения при управлении авто-тормозами	6,995·103	8,89·10 ⁻²	1,052
8	Технологические нарушения 1-й категории	296	6,67·10 ⁻²	4,452·10 ⁻²
9	Технологические нарушения 2-й категории	497	4,44·10 ⁻²	7,475·10 ⁻²
10	Нарушения режимов эксплуатации ТПС	413	2,22·10 ⁻²	6,212·10 ⁻²

Автором был выполнен сбор статистической информации по эксплуатации подвижного состава со всех 10 эксплуатационных локомотивных депо Северо-Кавказской дирекции тяги в течение отчетного года для 2772 локомотивных бригад, при этом линейный пробег локомотивов составил 66,488 млн км (см. табл. 2). Для расчета параметров соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава предлагается применять штрафную функцию, которая позволяет количественно оценить отклонения от заданных параметров и ограничений.

Включение штрафных значений способствует объективному анализу и принятию обоснованных управленческих решений. Штраф отражает степень несоответствия установленным требованиям и используется для вычисления рейтинговой оценки. Расчет штрафной функции за нарушения требований безопасности, надежности и технологии эксплуатации подвижного состава будем производить по следующей схеме. Основываясь на собранной статистике об эксплуатации ТПС по всем эксплуатационным локомотивным депо Северо-Кавказской дирекции тяги, вычислим отношение среднего числа нарушений каждой категории на одну локомотивную бригаду к некоторой величине пробега (10 тыс. лок. км).

Таким образом, фактическое (статистическое) значение штрафа на одну локомотивную бригаду составит:

$$\psi_i = \frac{h_i}{h_i^*} \cdot c_i, \quad (2)$$

$$\psi = \sum_{i=1}^{N_\psi} \psi_i, \quad (3)$$

где h_i – удельное значение величины одного из критериев технологии эксплуатации ТПС на 10 тыс. лок.км (см. табл. 2); h_i^* – средняя, определенная на основе статистических данных удельная величина одного из критериев технологии эксплуатации ТПС локомотивными бригадами на 10 тыс. лок.км; N_ψ – оцениваемые критерии технологии эксплуатации ТПС.

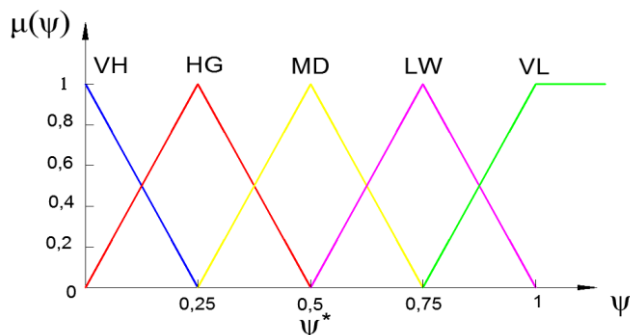
Здесь отношение $\frac{h_i}{h_i^*}$ характеризует степень соответствия номинального h_i^* (среднего определенного на основе статистических данных) и фактически оцениваемого параметра h_i .

Таким образом, формула (3) для расчета штрафа примет вид:

$$\psi = \sum_{i=1}^9 \frac{h_i}{h_i^*} \cdot c_i. \quad (1)$$

В качестве основного математического аппарата для расчета рейтинговой оценки технологии эксплуатации ТПС выбрана нечеткая логика в соответствии с теоретическими основами использования теории нечетких множеств [11,12]. Вычисленные средние значения нарушений в пересчете на 10 тыс. км на одну локомотивную бригаду по каждой из девяти категорий принимаются как база оценки и проецируются на нечеткую шкалу с оценкой MD (MIDDLE) – средний уровень, так как средний уровень квалификации данных машинистов составил 2,47, что является средним значением шкалы классности работников локомотивных бригад (см. рисунок). По этой причине для согласования номиналь-

ного значения штрафа за неверные или неоперативные действия локомотивных бригад с нечеткой шкалой введем значение масштабирующего коэффициента $z = 0,5$ (отражающего средний уровень квалификации машинистов).



Графики функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной $E(1)$

Для формирования терм-множеств лингвистической переменной «штрафной рейтинг» $E(1)$ введем суммарное номинальное значение штрафа Ψ , которое будет вычисляться по формуле (5)

при условии $\frac{h_i}{h_i^*} = 1$:

$$\Psi = z \cdot \psi. \quad (5)$$

В нашем случае формула (5) примет вид:

$$\Psi = 0,5 \cdot \psi. \quad (6)$$

Универсальным множеством для переменной Ψ будет являться отрезок $[0, 1]$, а множеством значений лингвистической переменной $E(1)$ – терм-множество $E(1) = \{EVH, EHG, EMD, ELW, EVL\}$, где EVH – «уровень выполнения технологии очень высокий (very high)»; EHG – «высокий (high)»; EMD – «средний (middle)»; ELW – «низкий (low)»; EVL – «очень низкий (very low)». При этом каждый терм из множества $E(1)$ является именем нечеткого подмножества на отрезке $[0, 1]$. Будем рассматривать эти подмножества как треугольные и трапециевидные нечеткие числа и их частные случаи.

Построенные исходя из изложенного подхода графики подмножеств терм-множеств лингвистической переменной $E(1)$ представлены на рисунке выше, а формулы для их расчета – в табл. 3.

Таблица 3

Формулы для расчета значений функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной $E(1)$

№ п/п	Терм-множества $E(1)$	Функции принадлежности нечеткого множества $E(1)$
1	$EVH, \Psi \in [0; 0,25]$	$\mu_{E^{(1)}}(\Psi) = \{1 - 4 \cdot \Psi\}$
2	$EHG, \Psi \in [0; 0,5]$	$\mu_{E^{(1)}}(\Psi) = \left\{ \begin{array}{l} 4 \cdot \Psi, \text{ если } 0 \leq \Psi < 0,25 \\ 1 - 4 \cdot (\Psi - 0,25), \text{ если } 0,25 \leq \Psi \leq 0,5 \end{array} \right\}$
3	$EMD, \Psi \in [0,25; 0,75]$	$\mu_{E^{(1)}}(\Psi) = \left\{ \begin{array}{l} 4 \cdot (\Psi - 0,25), \text{ если } 0,25 \leq \Psi < 0,5 \\ 1 - 4 \cdot (\Psi - 0,5), \text{ если } 0,5 \leq \Psi \leq 0,75 \end{array} \right\}$
4	$ELW, \Psi \in [0,5; 1]$	$\mu_{E^{(1)}}(\Psi) = \left\{ \begin{array}{l} 4 \cdot (\Psi - 0,5), \text{ если } 0,5 \leq \Psi < 0,75 \\ 1 - 4 \cdot (\Psi - 0,75), \text{ если } 0,75 \leq \Psi \leq 1 \end{array} \right\}$
5	$EVL, \Psi \in [0,75; +\infty]$	$\mu_{E^{(1)}}(\Psi) = \left\{ \begin{array}{l} 4 \cdot (\Psi - 0,75), \text{ если } 0,75 \leq \Psi < 1 \\ 1, \text{ если } \Psi > 1 \end{array} \right\}$

Для иллюстрации работы методики на примере одного из эксплуатационных локомотивных депо Северо-Кавказской дирекции тяги определим рейтинговую оценку соблюдения технологии эксплуатации ТПС для 15 работников локомотивных бригад (табл. 4–7) за отчетный период (календарный год) с использованием реальной информации о качестве работы, полученной средствами объективного контроля, представленными в табл. 1.

Выходная информация с расчетом рейтинговой оценки технологии эксплуатации подвижного состава локомотивными бригадами представлена в табл. 6, 7, где $R = 1 \dots N$ – рейтинг локомотивной бригады по возрастанию уровня нарушений технологии эксплуатации подвижного состава, N – количество оцениваемых локомотивных бригад.

Таблица 4

Абсолютные значения нарушений критериев соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава

№ л.б.	Класс	Пробег 10 тыс. км	Абсолютные значения нарушений									
			x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	
1	2	6,1123	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	6,4977	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	4,2811	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4	3	6,5646	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
5	2	5,2124	0	0	0	0	8	2	0	0	0	0
6	2	4,8721	0	0	0	0	1	16	2	0	0	2
7	1	6,1891	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0
8	-	5,8035	0	0	0	0	0	8	0	0	0	1
9	3	5,9458	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0
10	-	5,5574	0	0	0	0	2	3	0	0	0	2
11	1	5,8035	0	0	0	0	4	1	1	1	1	8
12	2	5,6104	0	0	0	0	6	0	4	4	0	0
13	3	5,6089	0	0	0	0	2	4	0	0	0	6
14	3	5,5834	0	0	0	0	0	1	2	5	0	0
15	-	5,5574	0	0	0	0	0	4	0	0	0	6

Таблица 5

Удельные значения нарушений критериев соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава на 10 тыс. км линейного пробега

№ л.б.	Класс	Пробег ×10 тыс. км	Удельные значения нарушений (на 10 тыс. км)									
			h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	
1	2	6,1123	0,164	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	6,4977	0	0,154	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	4,2811	0	0	0,234	0	0	0	0	0	0	0
4	3	6,5646	0	0	0	0,152	0	0	0	0	0	0,152
5	2	5,2124	0	0	0	0	1,535	0,384	0	0	0	0
6	2	4,8721	0	0	0	0	0,205	3,284	0,411	0	0,411	0
7	1	6,1891	0	0	0	0	0	0	0,646	0,323	0	0
8	1	5,8035	0	0	0	0	0	1,378	0	0	0,172	0
9	3	5,9458	0	0	0	0	0	0,336	0,336	0,168	0	0
10	-	5,5574	0	0	0	0	0,36	0,54	0	0	0,36	0
11	1	5,8035	0	0	0	0	0,689	0,172	0,172	0,172	1,378	0
12	2	5,6104	0	0	0	0	1,069	0	0,713	0,713	0	0
13	3	5,6089	0	0	0	0	0,357	0,713	0	0	1,07	0
14	3	5,5834	0	0	0	0	0	0,179	0,358	0,896	0	0
15	-	5,5574	0	0	0	0	0	0,72	0	0	1,08	0

Таблица 6

**Вычисление рейтинговой оценки качества соблюдения
технологии эксплуатации подвижного состава**

№ л.б.	Значения штрафных баллов									Ψ	Ψ	R
	ψ1	ψ2	ψ3	ψ4	ψ5	ψ6	ψ7	ψ8	ψ9			
1	218,667	0	0	0	0	0	0	0	0	218,667	109,334	15
2	0	60,847	0	0	0	0	0	0	0	60,847	30,424	14
3	0	0	30,342	0	0	0	0	0	0	30,342	15,171	13
4	0	0	0	6,412	0	0	0	0	0,054	6,466	3,233	12
5	0	0	0	0	1,823	0,032	0	0	0	1,855	0,928	10
6	0	0	0	0	0,243	0,278	0,616	0	0,147	1,284	0,642	8
7	0	0	0	0	0	0	0,968	0,192	0	1,16	0,58	7
8	0	0	0	0	0	0,116	0	0	0,061	0,177	0,089	1
9	0	0	0	0	0	0,028	0,503	0,1	0	0,631	0,316	4
10	0	0	0	0	0,428	0,046	0	0	0,129	0,603	0,302	3
11	0	0	0	0	0,818	0,015	0,258	0,102	0,492	1,685	0,843	9
12	0	0	0	0	1,27	0	1,068	0,424	0	2,762	1,381	11
13	0	0	0	0	0,424	0,06	0	0	0,382	0,866	0,433	5
14	0	0	0	0	0	0,015	0,536	0,532	0	1,083	0,542	6
15	0	0	0	0	0	0,061	0	0	0,386	0,447	0,224	2

Таблица 7

Значения терм-множеств функций принадлежности лингвистической переменной E(1)

№ л.б.	R	Ψ	Значения терм-множеств функций принадлежности				
			VH	HG	MD	LW	VL
1	15	109,334	0	0	0	0	1
2	14	30,424	0	0	0	0	1
3	13	15,171	0	0	0	0	1
4	12	3,233	0	0	0	0	1
5	10	0,928	0	0	0	0,288	0,712
6	8	0,642	0	0	0,432	0,568	0
7	7	0,58	0	0	0,68	0,32	0
8	1	0,089	0,644	0,356	0	0	0
9	4	0,316	0	0,736	0,264	0	0
10	3	0,302	0	0,792	0,208	0	0
11	9	0,843	0	0	0	0,628	0,372
12	11	1,381	0	0	0	0	1
13	5	0,433	0	0,268	0,732	0	0
14	6	0,542	0	0	0,832	0,168	0
15	2	0,224	0,104	0,896	0	0	0

Согласно расчетам, выполненным по разработанной методике, лучший рейтинг имеет локомотивная бригада № 8, у которой суммарное значение штрафа составляет 0,089, а уровень профессиональных компетенций оценивается как $VH = 0,644$ («очень хорошо»), $HG = 0,356$ («хорошо»). Данная локомотивная бригада в своей работе допустила за отчетный год восемь фактов нарушений (прочих) при управлении автотормозами и один случай нарушения режима эксплуатации ТПС на 58,035 тыс. км линейного пробега. Наихудшую рейтинговую оценку имеет локомотивная бригада № 1 ($VL = 1$ «очень

плохо»), которая отработала 61,123 тыс. км и допустила событие, связанное с нарушением правил безопасности движения и существенным нарушением технологии эксплуатации железнодорожного подвижного состава в части ошибочных действий, что привело к необходимости оказания технической помощи вспомогательным локомотивом пассажирскому поезду на перегоне.

Заключение

Разработаны критерии оценки качества технологии эксплуатации подвижного состава, и на их основе сформирована рейтинговая оценка соблюдения технологии эксплуатации тягового подвижного состава, внедренная в одном из эксплуатационных локомотивных депо, которая позволяет разработать комплексную программу корректирующих и предупреждающих мероприятий по выполнению требований должностных обязанностей локомотивных бригад, с целью обеспечения безопасности движения и повышения эффективности эксплуатации подвижного состава.

Система анализа и оценки информации средств регистрации параметров движения, диагностики и мониторинга технического состояния локомотива позволяет комплексно и объективно оценивать уровень квалификации локомотивных бригад для обеспечения надежной эксплуатации ТПС и снижения количества внеплановых ремонтов локомотивов по их вине.

Разработанная методика оценки технологии эксплуатации подвижного состава с использованием информации средств объективного контроля, установленных на борту локомотива, реализована в эксплуатационных локомотивных депо Северо-Кавказской дирекции тяги и использована в концепции модели дифференцированного подбора и назначения машинистов локомотивов на рейсы в зависимости от категорий поездов, требований к ним, соблюдения качества и технологии эксплуатации ТПС.

Список литературы

- 1 Принципы управления и развития транспортной инфраструктуры в Российской Федерации / В. Л. Василенок, О. В. Мартыненко, В. В. Негреева, К. Е. Скоробогатко // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия : Экономика и экологический менеджмент. – 2023. – № 3. – С. 100–115. – DOI 10.17586/2310-1172-2023-16-3-100-115.
- 2 **Солоп, И. А.** Комплекс мероприятий, направленных на достижение качества предоставляемых транспортно-логистических услуг в рамках Долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» / И. А. Солоп, Е. А. Чеботарева // Наука и образование транспорту. – 2022. – № 1. – С. 171–175. – EDN UYPRNL.
- 3 **Прокофьева, Е. С.** Единые принципы организации эксплуатационной работы железнодорожных грузовых перевозок / Е. С. Прокофьева, В. В. Панин // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17, № 5 (84). – С. 186–198. – DOI 10.30932/1992-3252-2019-17-5-186-198.
- 4 **Попов, Ю. И.** Развитие локомотивного комплекса. – Текст : электронный / Ю. И. Попов // Материалы заседания секции «Локомотивное хозяйство» Научно-технологического совета ОАО «РЖД», 18 мая 2023 г. – Москва, 2023. Систем. требования PowerPoint. – Доступ из локальной сети Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД».
- 5 **Буйлов, В. Н.** Программа развития человеческого капитала на период до 2025 года в ОАО РЖД / В. Н. Буйлов // Наука и образование : оте-

References

- 1 Principles of management and development of transport infrastructure in the Russian Federation / V. L. Vasilenok, O. V. Martynenko, V. V. Negreeva, K. E. Skorobogatko // Scientific Journal of NRU ITMO. Series : Economics and Environmental Management. – 2023. – No. 3. – P. 100–115. – DOI 10.17586/2310-1172-2023-16-3-100-115.
- 2 **Solop, I. A.** A set of measures aimed at achieving the quality of transport and logistics services provided within the framework of the Long-Term Development Program of JSC Russian Railways / I. A. Solop, E. A. Chebotareva // Science and Education for Transport. – 2022. – No. 1. – P. 171–175. – EDN UYPRNL.
- 3 **Prokofieva, E. S.** Unified principles for organizing operational work in rail freight transportation / E. S. Prokofieva, V. V. Panin // World of Transport. – 2019. – Vol. 17, No. 5 (84). – P. 186–198. – DOI 10.30932/1992-3252-2019-17-5-186-198.
- 4 **Popov, Yu. I.** Development of the locomotive complex. – Text : electronic / Yu. I. Popov // Materials of the meeting of the Locomotive Economy section of the Scientific and technological council of JSC Russian Railways, May 18, 2023. – Moscow, 2023. – PowerPoint System Requirements. – Access from the local network of the Traction Directorate, a branch of JSC Russian Railways.
- 5 **Builov, V. N.** Human Capital Development Program for the Period up to 2025 in JSC Russian Railways / V. N. Builov // Science and Education : Do-

чественный и зарубежный опыт : Пятьдесят третья международная научно-практическая конференция, Белгород, 26 декабря 2022 г. – Белгород : ООО ГиК, 2022. – С. 567–560. – ISBN 978-5-6048799-7-9.

6 Факторный анализ нарушений безопасности движения и отказов технических средств в локомотивном комплексе ОАО «РЖД» за декабрь и 2024 год. – Текст : электронный // Материалы отчета первых заместителей начальников региональных дирекций тяги, 19–20 февраля 2025 г. – Самара, 2025. – Систем. требования PowerPoint. Доступ из локальной сети Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД».

7 Пути развития подвижного состава в рамках цифровизации железнодорожного транспорта / А. Н. Антропов, Т. А. Антропова, С. В. Бушуев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (88). – С. 200–208. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_200.

8 **Харченко, П. А.** Проблемы энергоэффективности и безопасности при эксплуатации современного подвижного состава / П. А. Харченко, К. И. Юренко // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 18–21 апреля 2017 г. Т. 1. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2017. – С. 284–288. – EDN YSNZTD.

9 **Харченко, П. А.** Критерии оценки управляющей деятельности машиниста на основе данных бортовых регистраторов параметров движения / П. А. Харченко, К. И. Юренко // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : сборник трудов Всероссийской национальной научно-практической конференции, Ростов на Дону, 01–02 марта 2018 г. Т. 1. – Ростов на Дону : РГУПС, 2018. – С. 91–94. – EDN XZKUMH.

10 **Ремесник, Е. С.** Методы и модели принятия статистических решений в условиях неопределенности : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук : 08.00.13 / Ремесник Елена Сергеевна. – Москва, 2020. – 168 с. – EDN TNWBRC.

11 **Назаров, Д. М.** Интеллектуальные системы : основы теории нечетких множеств : учебное пособие для вузов / Д. М. Назаров, Л. К. Конышева. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2024. – 186 с.

12 **Тимофеева, Г. А.** Выбор оптимальных управленческих решений железнодорожного перевозчика с использованием нечеткой логики / Г. А. Тимофеева, А. Д. Хазимуллин // Вестник

mestic and Foreign Experience : Fifty-Third International scientific and practical conference, Belgorod, December 26, 2022. – Belgorod : ООО GiK, 2022. – P. 567–560. – ISBN 978-5-6048799-7-9.

6 Factor Analysis of Traffic Safety Violations and Failures of Technical Equipment in the Locomotive Complex of JSC Russian Railways for December and 2024. – Text : electronic // Materials of the report of the First Deputy Heads of regional traction directorates, February 19–20, 2025. – Samara, 2025. – PowerPoint System Requirements. Access from the local network of the Traction Directorate, a branch of Russian Railways.

7 Ways of rolling stock development within the framework of digitalization of rail transport / A. N. Antropov, T. A. Antropova, S. V. Bushuev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 4 (88). – P. 200–208. – DOI 10.46973 / 0201-727X_2022_4_200.

8 **Kharchenko, P. A.** Problems of energy efficiency and safety in the operation of modern rolling stock / P. A. Kharchenko, K. I. Yurenko // Transport : science, education, production : proceedings of scientific papers of the International scientific and practical conference, Rostov-on-Don, April 18–21, 2017. Vol. 1. – Rostov-on-Don : RSTU, 2017. – P. 284–288. – EDN YSNZTD.

9 **Kharchenko, P. A.** Criteria for assessing the control activity of a train driver based on data from on-board motion parameter recorders / P. A. Kharchenko, K. I. Yurenko // Actual Problems and Prospects for the Development of Transport, Industry and Economy in Russia : proceedings of the All-Russian national scientific and practical conference, Rostov-on-Don, March 1–2, 2018. Vol. 1. – Rostov-on-Don : RSTU, 2018. – P. 91–94. – EDN XZKUMH.

10 **Remesnik, E. S.** Methods and models of statistical decision-making under uncertainty : dissertation for the degree of candidate of economic sciences : 08.00.13 / Remesnik Elena Sergeevna. – Moscow, 2020. – 168 p. – EDN TNWBRC.

11 **Nazarov, D. M.** Intelligent systems : fundamentals of fuzzy set theory : a textbook for universities / D. M. Nazarov, L. K. Konysheva. – 3rd ed., corrected and added. – Moscow : Yurait, 2024. – 186 p.

12 **Timofeeva, G. A.** Selection of optimal management decisions of a railway carrier using fuzzy logic / G. A. Timofeeva, A. D. Khazimullin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2 (94). –

Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (94). – С. 173–180. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_173.
– DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_173.

P. A. Kharchenko

**IMPROVEMENT OF THE SYSTEM AND TECHNOLOGY OF ROLLING STOCK OPERATION
BASED ON THE ANALYSIS OF INFORMATION FROM MOTION PARAMETER
REGISTRATION, DIAGNOSTICS AND MONITORING
OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE LOCOMOTIVE**

Abstract. The paper considers the improvement of the system and technology of operation of traction rolling stock based on the analysis of operational data obtained by drivers of various skill levels in the process of locomotive control. To assess the specified data, objective control tools were used – on-board motion parameter recorders, microprocessor control and diagnostic systems, as well as safety and automatic driving devices. A methodology for assessing compliance with the technology of rolling stock operation has been developed and implemented, as well as a rating system for assessing drivers, which made it possible to reduce operational risks and improve the efficiency of rolling stock operation. The method has been implemented in the operational locomotive depots of the North Caucasus Traction Directorate and used in the concept of the model of differentiated selection and assignment of locomotive drivers to trips depending on train categories.

Keywords: traffic safety, reliability, operating technology, rolling stock, locomotive crew, diagnostics and monitoring of technical condition.

For citation: Kharchenko, P. A. Improvement of the system and technology of rolling stock operation based on the analysis of information from motion parameter registration, diagnostics and monitoring of the technical condition of the locomotive / P. A. Kharchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 201–210. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_201.

Сведения об авторах

Харченко Павел Алексеевич
ОАО «Российские железные дороги»,
Дирекция тяги,
заместитель начальника службы
по управлению тяговыми ресурсами
Северо-Западного полигона –
начальник оперативного отдела,
e-mail: Lrk-9@mail.ru

Information about the authors

Kharchenko Pavel Alekseevich
JSC Russian Railways,
Traction Directorate,
Deputy Head of the Traction Resources
Management Service of the North-West Polygon –
Head of the Operations Department,
e-mail: Lrk-9@mail.ru

Л. В. Цыганская, В. А. Чернов, Д. Г. Бейн

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ БОКОВЫХ РАМ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Аннотация. В процессе эксплуатации периодически выявляются трещины в литых деталях тележек грузовых вагонов, угрожающие безопасности движения, что требует новых подходов к теоретической и практической оценке процесса трещинообразования в вагонных конструкциях. Особую актуальность приобретает проблема прогнозирования трещиностойкости конструкций на этапе проектирования. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования трещинообразования в литых элементах тележки с осевой нагрузкой 25 т/ось. По коэффициентам интенсивности напряжений в вершинах трещин и трещиноподобных дефектов в буксовом узле боковой рамы определены размеры и конфигурация начальных дефектов, при которых возможен рост трещин. Смоделированы и проанализированы условия раскрытия и распространения трещин. Проведены экспериментальные исследования ресурса боковых рам тележки с осевой нагрузкой 25 т/ось и сопоставлены с результатами моделирования. Предложены подходы к оценке трещиностойкости боковых рам тележек грузовых вагонов, позволяющие точнее прогнозировать возможность трещинообразования в литых элементах тележки в эксплуатации. Отдельные результаты исследований использованы при разработке новых боковых рам для тележек с осевой нагрузкой 25 т/ось.

Ключевые слова: тележка, боковая рама, трещина, механика разрушения, коэффициент интенсивности напряжений.

Для цитирования: Цыганская, Л. В. Оценка трещиностойкости боковых рам тележек грузовых вагонов при проектировании / Л. В. Цыганская, В. А. Чернов, Д. Г. Бейн // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 211–218. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_211.

Введение

Трещины, возникающие в литых элементах тележек грузовых вагонов, опасны прежде всего тем, что их рост может мгновенно привести к излому детали. Любой излом боковой рамы или наддресорной балки трехэлементной тележки грузового вагона – это аварийная ситуация, угрожающая безопасности движения. Поэтому так важно на всех этапах жизненного цикла тележек грузовых вагонов, начиная от проектирования, производства, испытаний и заканчивая эксплуатацией, прогнозировать, выявлять и исключать саму возможность возникновения и развития трещин, способных привести к серьезным аварийным ситуациям.

По вопросам возникновения трещин в литых элементах тележек грузовых вагонов в эксплуатации накоплен достаточно большой опыт. Основной причиной появления и развития трещин являются циклические знакопеременные нагрузки, связанные с колебаниями грузового вагона на рессорном подвешивании.

В основу традиционных методов теоретических и экспериментальных исследований усталостной прочности вагонных конструкций положена известная гипотеза линейного суммирования повреждений [1]

$$\sum n_i/N_i = 1, \quad (1)$$

где n_i – число циклов приложенной нагрузки; N_i – число циклов до разрушения, определенное по кривой усталости при постоянной амплитуде) [3].

Оценка соответствия требованиям [1] вагонных металлоконструкций ведется по коэффициенту запаса сопротивления усталости, который определяется как отношение предела выносливости составной части вагона к амплитуде динамических напряжений, приведённой к базовому числу циклов $N_0 = 10^7$.

Экспериментальная оценка процесса возникновения и развития трещин в литых элементах тележки выполняется в ходе проведения ресурсных испытаний по [2].

Имеющиеся стандартизированные методы оценки запаса сопротивления усталости, основанные на эмпирических зависимостях теории усталостной прочности, до сих пор являются основными при проектировании вагонных конструкций.

При этом механика разрушения, в основе которой лежит энергетический критерий Гриффитса, устанавливающий зависимость между нагрузкой, приложенной к конструкции, и длиной дефекта, позволяет не только прогнозировать возможность роста трещин, но и теоретически оценивать размеры дефектов, при которых рост трещин возможен.

Основная задача проведенных исследований – предложить метод и порядок оценки возможности развития трещин в литых элементах тележек грузовых вагонов на этапе проектирования с использованием основных положений механики разрушения.

При этом были поставлены следующие задачи:

- оценить параметры (размеры и конфигурацию) дефектов, при которых возможно раскрытие трещины;
- провести сравнение полученных теоретических результатов с экспериментальными исследованиями.

Методы исследования

Процесс наступления предельных состояний в соответствии с основными положениями механики разрушения состоит из двух стадий зарождения трещины и ее распространения [5].

Первая стадия оценивается по энергетическим или силовым критериям – критериям разрушения. Оценка по силовым критериям – коэффициентам интенсивности напряжений, предложенным в 1957 году Дж. Ирвингом, в настоящее время получила более широкое распространение. Методы оценки, доступные в широкой инженерной практике, заключаются либо в использовании справочных данных по коэффициентам интенсивности напряжений или в использовании программных продуктов, реализующих метод конечных элементов [3].

С практической точки зрения для литых элементов тележек грузовых вагонов интересен не только вопрос возможности развития трещин, но и параметры трещиноподобных дефектов, которые могут перейти в стадию роста.

Для прогнозирования роста трещины, как правило, используют закон Париса или зависимости, полученные на его основе, связывающие скорость зарождения и роста трещины с коэффициентами интенсивности напряжений.

Скорость роста трещины $\frac{dl}{dN}$ и ее длина, выраженная через амплитуду напряжений [4]:

$$\frac{dl}{dN} = A(Y(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\sqrt{l})^n, \quad (2)$$

где A и n – эмпирические коэффициенты; Y – тарированная поправка к коэффициенту интенсивности напряжений; σ_{\max} , σ_{\min} – минимальное и максимальное напряжение цикла нагружения; l – длина трещины; $Y(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})\sqrt{l}$ – коэффициент интенсивности напряжений ΔK , выраженный через размах амплитуд напряжений.

Проинтегрировав выражение (2), можно получить численное значение длины трещины, при этом вычисление такого интеграла представляет определенную сложность, поэтому в инженерной практике используются различные упрощения, например, тарированные коэффициенты принимаются постоянными величинами.

Вычисление J-интеграла может быть выполнено методом конечных элементов, что позволяет повысить точность вычисления [6]. Для оценки возможности роста трещины в литых деталях разрабатываемой тележки грузовых вагонов с осевой нагрузкой 25 т/ось использовался программный комплекс ANSYS.

Основными повреждающими эксплуатационными нагрузками для конструкций тележек грузовых вагонов являются вертикальные динамические, синусоидально изменяющиеся во времени и связанные с колебаниями кузова на рессорном подвешивании. При этом для расчетной и экспериментальной оценки ресурса согласно [2, 3] рекомендовано учитывать также продольные и боковые силы, в значительной мере влияющие на общее напряженно-деформированное состояние деталей тележек.

При выполнении настоящей работы была проведена сравнительная оценка влияния каждой силы на процесс трещинообразования в боковой балке грузовой тележки. Работы проводились в три этапа.

Этап 1. Оценка коэффициентов интенсивности напряжений при нагрузках, установленных для оценки ресурса [3], позволяющего определить величины начальных дефектов, при которых возможен рост поверхностных и внутренних дефектов в узлах грузовых вагонов.

Проведены многовариантные расчеты при различных величинах начальных дефектов в диапазоне 1–3 мм.

Оценивались дефекты различной конфигурации: полуэллиптические, эллиптические и произвольной формы. Дефекты располагались в зонах возможного трещинообразования боковой рамы тележки.

Характерная структура сетки конечных элементов в зоне полуэллиптического дефекта с минимальным радиусом эллипса $r_{\min} = 1$ мм и максимальным радиусом $r_{\max} = 5$ мм ($\frac{r_{\min}}{r_{\max}} = \frac{1}{5}$) показана на рис. 1.

J -интеграл (по шести контурам) и коэффициенты интенсивности напряжений нормального отрыва, поперечного сдвига и продольного сдвига K_I, K_{II}, K_{III} от совместного действия нагрузок (продольной, вертикальной и боковой) показаны на рис. 2 и 3 соответственно.

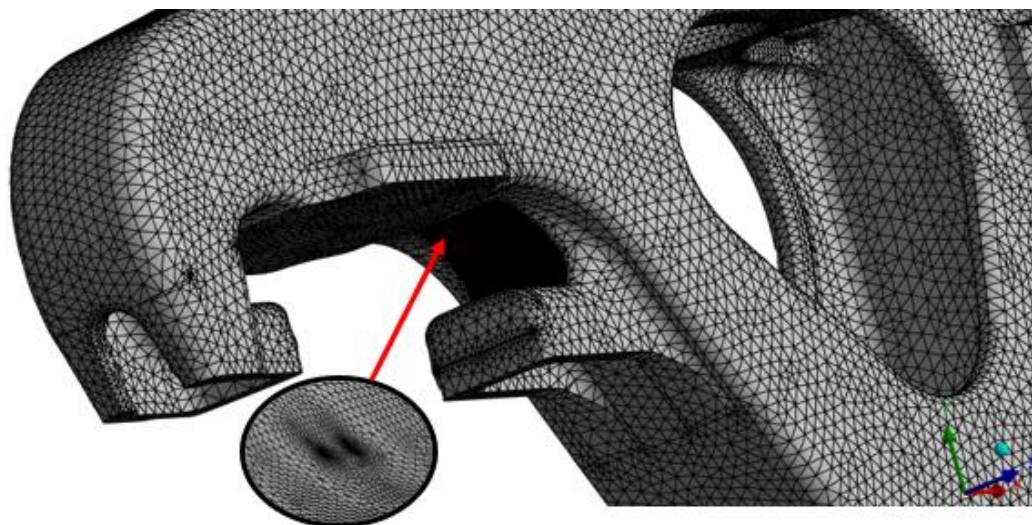


Рис. 1. Структура сетки конечных элементов в зоне заложенного дефекта

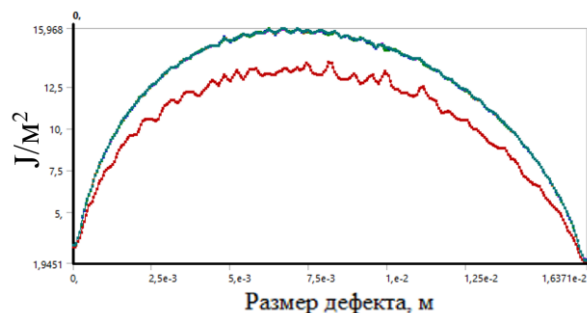


Рис. 2. J -интеграл для полуэллиптической трещины с радиусами эллипса $r_{\min} = 1$ мм и $r_{\max} = 5$ мм J/M^2

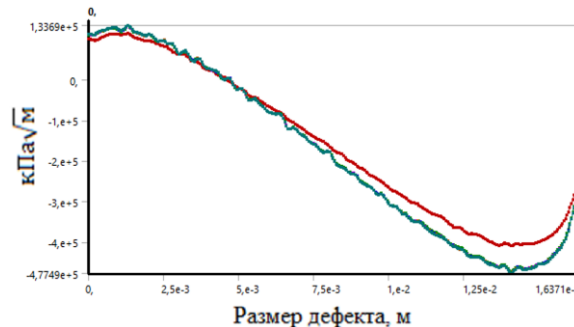


Рис. 3. Коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} для полуэллиптической трещины с радиусами эллипсов $r_{\min} = 1$ мм, $r_{\max} = 5$ мм

В результате проведенных расчетов установлено, что на величину значений J -интеграла и коэффициентов интенсивности напряжений в значительной мере влияют не только размеры дефекта, но и его расположение относительно направления главных напряжений в конструкции, что также следует и из основных соотношений механики разрушения (2).

Например, для эллиптического дефекта с отношением радиусов эллипсов ($\frac{r_{\min}}{r_{\max}} = \frac{1}{5}$), у которого большая ось эллипса расположена параллельно относительно оси пути, максимальное значение J -интеграла по первому контуру интегрирования в 5,7 раза больше, чем при расположении такого же дефекта перпендикулярно оси пути.

В результате исследований на первом этапе установлено следующее:

– наибольшее влияние на рост трещины оказывает глубина расположения дефекта, так как при расположении подповерхностного дефекта на глубине, сопоставимой с размером дефекта, максимальное значение J -интеграла может быть на порядок больше, чем при его поверхностном расположении;

– анализ коэффициентов интенсивности для различных дефектов зон расположения не позволил установить характерные зависимости, позволяющие дать рекомендации для их использования в инженерной практике.

Этап 2. Анализ вклада каждой нагрузки в процесс роста трещины в буксовом проеме боковой балки.

Приток упругой энергии в случае роста трещины от одной нагрузки при условии приращения трещины вдоль исходной прямой [7]:

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 + \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^2 + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2, \quad (3)$$

где K_I^2 – коэффициент интенсивности напряжений нормального отрыва; K_{II}^2 – коэффициент интенсивности напряжений поперечного сдвига; K_{III}^2 – коэффициент интенсивности напряжений продольного сдвига; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости материала.

Выражение, позволяющее установить связь между одновременным действием двух нагрузок и коэффициентами интенсивности напряжений для плоской деформации, полученное путем приравнивания значений коэффициентов интенсивности напряжений через выражение потока энергии (2) и интегрирования по поверхности трещины, имеет вид

$$\frac{1-\nu^2}{E} \left(K_I^{(1)} K_I^{(2)} + K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)} \right) = \int_0^{+l} p_i^{(1)} \frac{du_i^{(2)}}{dl} dx + \int_0^{-l} p_i^{(1)} \frac{du_i^{(2)}}{dl} dx, \quad (4)$$

где l – длина трещины; $K_I^{(1)} K_I^{(2)}$ – коэффициенты интенсивности нормального отрыва от 1-й и 2-й системы нагружения; $K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)}$ – коэффициенты интенсивности поперечного сдвига от 1-й и 2-й системы нагружения; $p_i^{(1)}$ – первая нагрузка, действующая на трещину; $du_i^{(2)}$ – перемещения, вызванные второй нагрузкой $p_i^{(2)}$.

Как видно из выражения (3), установление явной зависимости от двух и большего числа нагрузок представляет определенные сложности при объемном деформировании тела. При этом исследование влияния различных нагрузок на процесс разрушения боковых рам тележек представляет определенный интерес с точки зрения нормирования вертикальных, боковых и продольных сил при выборе характеристик рессорного подвешивания тележек. При расчете по классическим зависимостям [2] основной вклад в усталостное разрушение литых деталей тележек вносят вертикальные силы (до 90 %), при этом вклад боковых сил является незначительным и не превышает 1–2 %.

Результаты расчета коэффициентов интенсивности напряжений от действия вертикальных, боковых и продольных сил приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты интенсивности напряжений для эллиптической трещины в буксовом проеме с соотношением радиусов эллипсов $\left(\frac{r^{\min}}{r^{\max}} = \frac{1}{5}\right)$

Расчетная нагрузка	Коэффициент интенсивности напряжений		
	нормального отрыва K_I , кПа $\sqrt{м}$	поперечного сдвига K_{II} , кПа $\sqrt{м}$	продольного сдвига K_{III} , кПа $\sqrt{м}$
Совместное действие продольной, вертикальной, боковой нагрузок	1,86·103	9,12·102	6,79·102
Действие вертикальной нагрузки	1,78·103	9,2·102	2,61·102
Действие боковой нагрузки	12,016	3,6·102	6,79·102
Действие продольной нагрузки	83,280	43,66	12,32

Как видно из табл. 1, на коэффициент интенсивности напряжений продольного сдвига для эллиптического дефекта, расположенного в буксовом проеме, в большей степени влияет действие боковой нагрузки.

Назначение допускаемых пороговых значений коэффициентов интенсивности напряжений, определенных по стандарту [1] на этапе теоретических исследований, представляет определенную сложность, поэтому допускаемые значения приняты из работы [4].

Согласно [4], для стали 20ГЛ пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений составляет $K_{IC} = 14 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ($14 \cdot 10^3 \text{ кПа}\sqrt{\text{м}}$).

Как видно из результатов, представленных в табл. 1, полученные коэффициенты интенсивности напряжений при заданной величине трещины с соотношением радиусов $\left(\frac{r^{\min}}{r^{\max}} = \frac{1}{5}\right)$ значительно меньше порогового значения.

Распределения рассмотренных коэффициентов интенсивности напряжений по длине дефекта для эллиптической трещины в буксовом проеме показаны на рис. 4–6.

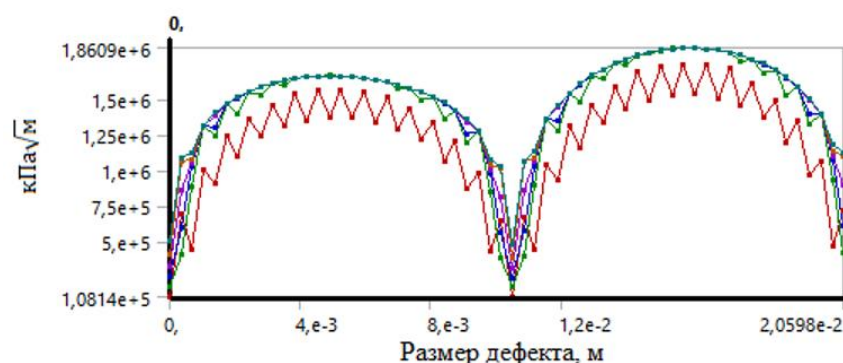


Рис. 4. Коэффициент интенсивности напряжений нормального отрыва K_I для эллиптической трещины в буксовом проеме при $r^{\min} = 1 \text{ мм}$, $r^{\max} = 5 \text{ мм}$

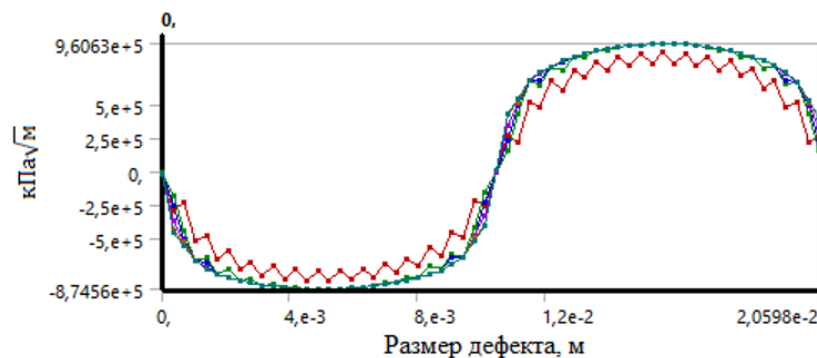


Рис. 5. Коэффициент интенсивности напряжений поперечного сдвига K_{II} для эллиптической трещины в буксовом проеме при $r^{\min} = 1 \text{ мм}$, $r^{\max} = 5 \text{ мм}$

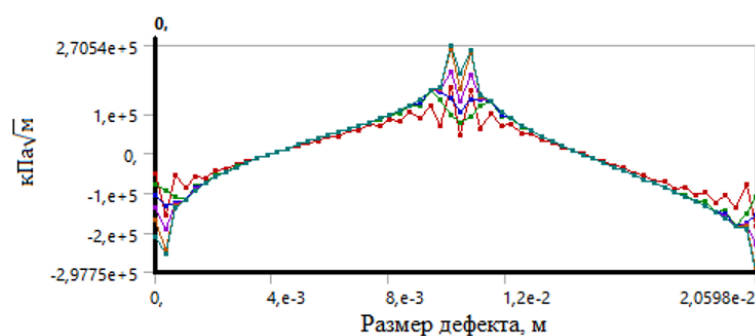


Рис. 6. Коэффициент интенсивности напряжений продольного сдвига K_{III} для эллиптической трещины в буксовом проеме при $r^{\min} = 1 \text{ мм}$, $r^{\max} = 5 \text{ мм}$

Этап 3. Сравнение результатов моделирования и испытаний.

Для оценки возможности роста трещины при циклическом нагружении использовался Smart-метод и уравнение NASGRO [10, 11].

Полученные результаты сравнивались с экспериментальными значениями (табл. 2), для сравнения рассматривались два случая возникновения трещины в зоне буксового проема тележки.

Таблица 2

Сравнение результатов моделирования и испытаний при амплитуде переменной силы 334 кН

Номер испытания	Число циклов нагружения до трещины $N_{тр}$	Экспериментальное число циклов нагружения до потери несущей способности N_i	Теоретическая оценка скорости роста трещины до достижения критического размера $1/3$ сечения балки (потеря несущей способности), число циклов
01	1 594 000	1 821 000	1 345 000
02	985 000	1 205 000	

На рис. 7 показана визуализация начального роста трещины в зоне буксового проема до достижения размера 10 мм при расчетном числе циклов $N_{тр} = 898 \cdot 103$.

Размеры дефекта, глубина его расположения, форма, место расположения, ориентация – все это создает значительные неопределенности для точной оценки параметров роста трещины методами механики разрушения. Чтобы применять данный метод в практической области для литых деталей грузовых вагонов, требуется больший объем экспериментальных данных.

При этом, если использовать подходы механики разрушения в области грузового вагоностроения, на этапе проектирования возможна оценка не только потенциальной возможности роста трещины, но и скорости роста, что принципиально важно с точки зрения возможности обнаружения трещин в эксплуатации и предотвращения аварийных ситуаций, угрожающих безопасности движения.

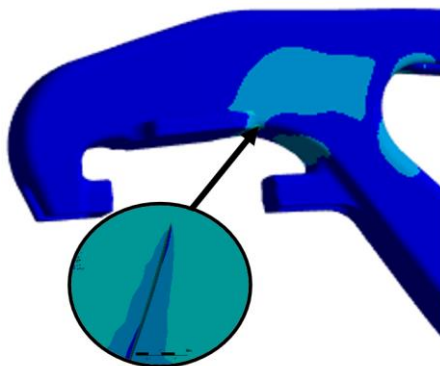


Рис. 7. Начало роста трещины в зоне внутреннего радиуса буксового проема

Заключение

С учетом вероятностного характера размеров и расположения дефектов предложенный подход к оценке трещиностойкости боковых рам тележек грузовых вагонов может быть использован:

- для сравнения технических решений конструкций боковых рам между собой;
- при выборе технических решений конструкций боковых рам на этапе проектирования.

Практическое использование предложенной оценки трещиностойкости конструкции нашло применение при отработке технологических и конструктивных изменений в процессе разработки новой тележки с осевой нагрузкой 25 т/ось.

Список литературы

1 ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещи-

References

1 GOST 25.506-85. Design, calculation and strength testing. Methods of mechanical testing of metals. Determination of crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading :

нотойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении : утвержден постановлением Госстандарта СССР от 27.03.1985 N 902. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 38 с.

2 **ГОСТ 33211–2014.** Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с Поправкой, с Изменением № 1) : утвержден приказом Росстандарта № 565-ст от 05.06.2015. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 54 с.

3 **ГОСТ 33939–2016.** Детали литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Методы ресурсных испытаний : утвержден приказом Росстандарта от 28.03.2017 N 201-ст. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 24 с.

4 **Татаринцев, В. А.** Влияние эксплуатационных факторов на циклическую трещиностойкость сталей литых корпусов запорной арматуры / В. А. Татаринцев, А. К. Толстошеев // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2014. – № 1 (37). – С. 102–107. – EDN SCORVR.

5 **Когаев, В. П.** Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : справочник / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – Москва : Машиностроение, 1985. – 224 с.

6 Метод конечных элементов в механике разрушения / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – Изд. 2-е, испр. – Москва : URSS, 2020. – 254 с. – ISBN 978-5-397-07410-0.

7 **Морозов, Е. М.** ANSYS в руках инженера : Механика разрушения / Е. М. Морозов, А. Ю. Муйземнек, А. С. Шадский. – Москва : Стереотип, 2024. – 454 с. – ISBN 978-5-9519-4619-5.

8 **Партон, В. З.** Механика разрушения : от теории к практике / В. З. Партон. – Изд. 2-е. – Москва : URSS, 2007. – ISBN 978-5-382-00157-9.

9 **Бороненко, Ю. П.** Уточнение методики расчета коэффициентов локальной концентрации напряжений в сварных соединениях вагонных конструкций / Ю. П. Бороненко, Л. В. Цыганская, Д. А. Василенко // Транспорт Урала. – 2009. – № 2 (21). – С. 69–72. – EDN KTYQQB.

10 Оценка процесса развития трещин в оси колесной пары // Железные дороги мира. – 2011. – № 2. – С. 41–45. – EDN NUDKQH

11 **Матвиенко, Ю. Г.** Двухпараметрическая механика разрушения / Ю. Г. Матвиенко. – Москва : Физико-математическая литература, 2020. – 210 с. – ISBN 978-5-9221-1899-6.

approved by the Resolution of the USSR State Standard of 27.03.1985, No 902. – Moscow, Standartinform, 2005. – 38 p.

2 **GOST 33211–2014.** Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities (with Amendment, with Change No. 1) : approved by the Order of Rosstandart No. 565-st dated 05.06.2015. – Moscow, Standartinform, 2020. – 54 p.

3 **GOST 33939–2016.** Cast parts of railway freight car bogies. Resource testing methods : approved by order of Rosstandart dated 28.03.2017 N 201-st. – Moscow : Standartinform, 2019. – 24 p.

4 **Tatarintsev, V. A.** The influence of operational factors on cyclic crack resistance of steels of cast bodies of shut-off valves / V. A. Tatarintsev, A. K. Tolstosheev // Modern high-tech technologies. Regional application. – 2014. – No. 1 (37). – P. 102–107. – EDN SCORVR.

5 **Kogaev, V. P.** Calculations of machine parts and structures for strength and durability : handbook / V. P. Kogaev, N. A. Makhutov, A. P. Gusenkov. – Moscow : Mashinostroenie, 1985. – 224 p.

6 Finite element method in fracture mechanics / E. M. Morozov, G. P. Nikishkov. – 2nd ed., corrected. – Moscow : URSS, 2020. – 254 p. – ISBN 978-5-397-07410-0.

7 **Morozov, E. M.** ANSYS in the hands of an engineer : Fracture mechanics / E. M. Morozov, A. Yu. Muiyemnek, A. S. Shadskiy. – Moscow : Stereotype, 2024. – 454 p. – ISBN 978-5-9519-4619-5.

8 **Parton, V. Z.** Fracture Mechanics: From Theory to Practice / V. Z. Parton. – 2nd ed. – Moscow : URSS, 2007. – ISBN 978-5-382-00157-9.

9 **Boronenko, Yu. P.** Clarification of the calculation method for local stress concentration coefficients in welded joints of wagon structures / Yu. P. Boronenko, L. V. Tsyganskaya, D. A. Vasilenko // Transport of the Urals. – 2009. – No. 2 (21). – P. 69–72. – EDN KTYQQB.

10 Evaluation of the process of crack development in the axle of a wheel pair // Railways of the world. – 2011. – No. 2. – P. 41–45.

11 **Matvienko, Yu. G.** Two-parameter fracture mechanics / Yu. G. Matvienko. – Moscow : Physical and Mathematical Literature, 2020. – 210 p. – ISBN 978-5-9221-1899-6.

L. V. Tsyganskaya, V. A. Chernov, D. G. Bein

ASSESSMENT OF CRACK RESISTANCE OF SIDE FRAMES OF FREIGHT CAR BOGIES DURING DESIGN

Abstract. The existing problem of cracks in cast parts of freight car bogies periodically detected during operation, threatening traffic safety, requires new approaches to theoretical and practical assessment of the crack formation process in car structures. The problem of predicting crack resistance of structures at the design stage is of relevance. Method Theoretical and experimental studies of crack formation in cast elements of a bogie with an axial load of 25 t / axle were performed. Results: The sizes and configuration of initial defects, at which crack growth is possible, were determined based on the stress intensity factors at the crack tips and crack-like defects in the axle box assembly of the side frame. The conditions for crack opening and propagation were modeled and analyzed. Experimental studies of the resource of side frames of a bogie with an axial load of 25 t / axle were carried out and compared with the modeling results. Practical significance: Approaches to assessing the crack resistance of side frames of freight car bogies are proposed, allowing more accurate prediction of the possibility of crack formation in cast elements of the bogie during operation. Individual research results are used in developing new side frames for bogies with an axle load of 25 t/axle.

Keywords: bogie, side frame, crack, fracture mechanics, stress intensity factor.

For citation: Tsyganskaya, L. V. Assessment of crack resistance of side frames of freight car bogies during design / L. V. Tsyganskaya, V. A. Chernov, D. G. Bein // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 211–218. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_1_211.

Сведения об авторах

Цыганская Людмила Валериевна

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”» (АО «НВЦ “Вагоны”»),
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
заместитель генерального директора – главный конструктор НИБ,
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

Чернов Владимир Александрович

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”» (АО «НВЦ “Вагоны”»),
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
исполнительный директор, доцент,
e-mail: vladimir.chernov@nvc-vagon.ru

Бейн Дмитрий Григорьевич

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”» (АО «НВЦ “Вагоны”»),
Научно-исследовательское бюро (НИБ),
кандидат технических наук, заместитель главного конструктора НИБ, действительный член Российской академии транспорта,
e-mail: dgbain@mail.ru; dmitry.bein@nvc-vagon.ru

Information about the authors

Tsyganskaya Lyudmila Valerievna

Joint-Stock Company "Scientific and Implementation Center "Vagony" (JSC "SIC "Vagony"),
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS),
Chair "Wagons and Wagon Facilities",
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Deputy General Director – Chief Designer of NIB,
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

Chernov Vladimir Alexandrovich

Joint-Stock Company "Scientific and Implementation Center "Vagony" (JSC "SIC "Vagony"),
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS),
Chair "Wagons and Wagon Facilities",
Executive Director,
Associate Professor,
e-mail: vladimir.chernov@nvc-vagon.ru

Bein Dmitry Grigorievich

Joint-Stock Company "Scientific and Implementation Center "Vagony" (JSC "SIC "Vagony"),
Scientific Research Bureau (NIB),
Candidate of Engineering Sciences,
Deputy Chief Designer of NIB,
Full Member of the Russian Academy of Transport,
e-mail: dgbain@mail.ru

И. А. Яицков, Е. С. Федотов, А. А. Назаретов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОТВОДА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОРМОЗНОГО ДИСКА ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО АППАРАТА

Аннотация. Современная концепция разработки тормозных дисков предусматривает две основные задачи: простота изготовления и эффективность работы при минимальных экономических затратах. Как правило, обе эти задачи несовместимы и имеют разные цели. Принцип работы у всех вентиляционных аппаратов тормозных дисков одинаков – теплоотвод путем прохождения охлажденного воздуха через каналы. Однако эффективность данного физического процесса разная в зависимости от конструкции диска. Рассмотрено влияние угла раскрытия вентиляционных каналов диффузорного типа на эффективность работы вентиляционного аппарата тормозного диска. Представлена сравнительная характеристика различных, наиболее часто встречающихся конструкций вентиляционного аппарата, предложен новый метод решения поставленных задач.

Ключевые слова: тормозной диск, вентиляционный аппарат, воздушный поток, теплоотвод, эффективность.

Для цитирования: Яицков, И. А. Эффективность теплоотвода поверхностей тормозного диска тормозной системы подвижного состава при различных режимах работы вентиляционного аппарата / И. А. Яицков, Е. С. Федотов, А. А. Назаретов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 219–224. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_219.

Любые теплообменные процессы, как правило, характеризуются тремя различными методами, имеющими свои параметры эффективности. Так, например, на рис. 1 представлены схемы интенсификации теплообменных процессов для сплошного и вентилируемого тормозных дисков. Любое нагретое тело, находящееся в атмосфере, способно передавать тепловую энергию тремя возможными способами: теплопередачей, конвекцией, излучением. Конвекция наиболее эффективна в жидкостях и газах и является наиболее распространенным способом передачи тепла в этих средах, менее эффективным способом является излучение, которое на практике не учитывается.

На рис. 1 представлена схема оттока теплового потока с рабочей поверхности тормозного диска. При этом можно наблюдать значительную эффективность работы вентиляционного аппарата тормозного вентилируемого диска [1–2].

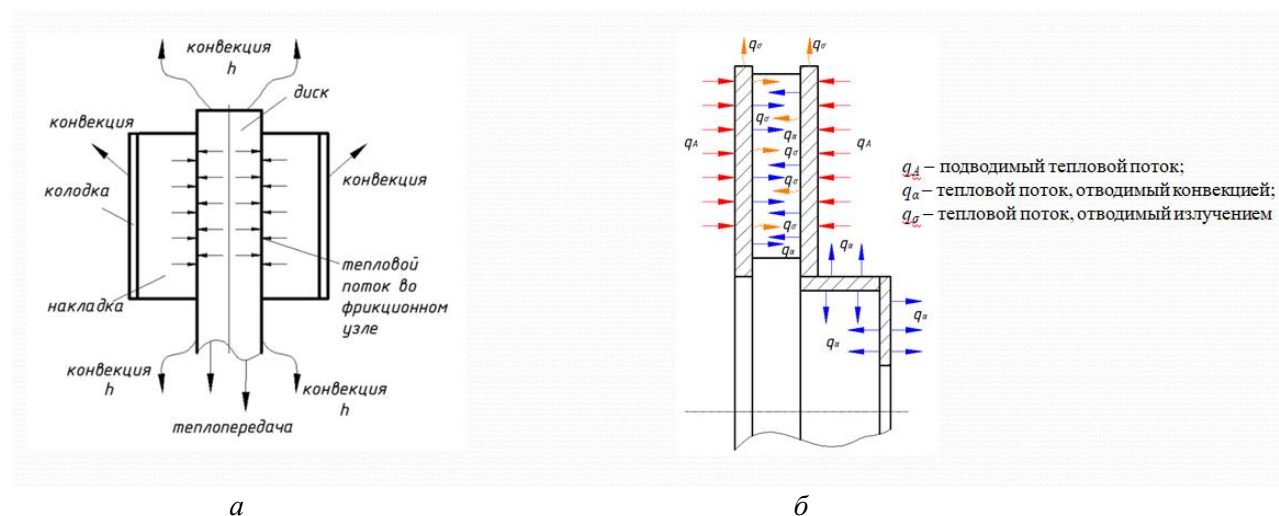


Рис. 1. Интенсификация конвективного теплообмена для тормозных дисков:
 а – сплошного; б – вентилируемого

Количество теплоты, передаваемое в единицу времени от горячей поверхности тормозного диска в окружающий воздух, пропорционально разности температур и площади теплопередающей поверхности диска [3]:

$$Q = K \cdot F(t_1 - t_2), \quad (1)$$

где K – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$; F – площадь теплопередающей поверхности диска, м^2 ; t_1, t_2 – температуры диска/окружающей среды, К .

Процесс теплопередачи зависит от многих факторов, определяющих коэффициент теплопередачи. Так, для плоской поверхности тормозного диска K , $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$, равен:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}}, \quad (2)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи нагрева тормозного диска в окружающий воздух, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$; $\delta_1, \delta_{\text{ст}}$ – толщины слоев посторонних отложений на стенках тормозного диска (ржавчина, продукты износа) и самого тормозного диска, м ; $\lambda_1, \lambda_{\text{ст}}$ – теплопроводность отложений на стенках с нагреваемой стороны (окружающий воздух) и тела тормозного диска $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$.

Как известно, при повышении объемной температуры на открытых поверхностях происходит теплообмен с окружающим воздухом путем конвективного теплообмена. Для определения количества теплоты, отводимой от поверхности металлического элемента площадью $F_{\text{об}}^{\text{к}}$, следует воспользоваться законом Ньютона – Рихмана:

$$Q^{\text{к}} = \alpha \cdot (T_{\text{пов}} - T_{\text{эл}}) \cdot F_{\text{об}}^{\text{к}} \cdot d\tau, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$; $T_{\text{пов}}$ – температура рабочей поверхности элемента, К ; $T_{\text{эл}}$ – температура металлического фрикционного элемента, К .

Наиболее часто встречающиеся конструкции вентиляционных аппаратов (ВА) тормозных дисков на транспорте [4] показаны на рис. 2.

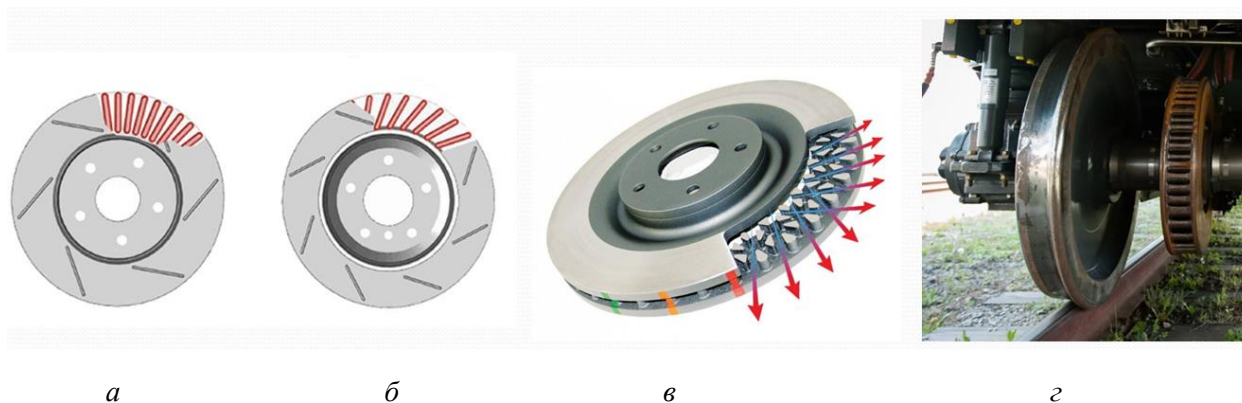


Рис. 2. Вентиляционные каналы различной геометрии:

а – ВА с прямыми радиальными каналами; *б* – ВА с направленными радиальными каналами;
в – ВА с сегментами типа «лапка кенгуру»; *г* – ВА с каналами типа «шпицы»

Конструктивные особенности приведенных на рис. 2 ВА тормозных дисков можно представить в виде двух основных типов:

- 1) радиальные каналы (прямые, наклонные, криволинейные) – в них применяется увеличение длины канала с целью повышения теплоотдачи тормозного диска;
- 2) сегментальные каналы («лапка кенгуру», «шпицы» и др.) – в них используется эффект разрезания воздушного потока для создания турбулентного режима течения с целью повышения теплоотдачи тормозного диска.

Однако, несмотря на преимущества данных типов ВА, они имеют один существенный недостаток – снижение давления на выходе.

Так, например, на рис. 3 представлена характеристика истечения газа через диффузорный канал (1-й тип), где основополагающим фактором будет непосредственно являться угол раскрытия [5].

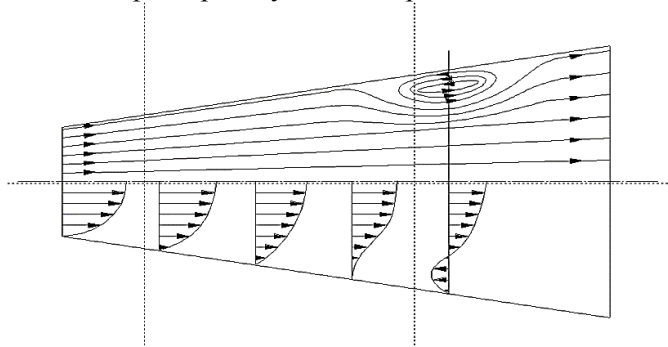


Рис. 3. Распределение скоростей движения воздушного потока в пограничном слое для различных по длине сечениях

С увеличением угла раскрытия диффузорного канала зона возникновения отрыва пограничного слоя смещается ближе к основанию. При этом коэффициент полноты удара фразш в большей степени зависит от угла раскрытия диффузора, величину которого при небольших углах раскрытия $\nu = 0 \dots 40^\circ$ можно рассчитать по эмпирической формуле

$$\text{фразш} \approx 3,2K2[\text{tg}(V\varepsilon/2)]^{1,25}, \quad (4)$$

где $K2$ – коэффициент, характеризующий форму поперечного сечения диффузора; $V\varepsilon$ – эквивалентный угол раскрытия канала в градусах, $^\circ$.

Тогда оптимальный угол можно определить по следующей зависимости:

$$\text{tg} \frac{\nu_{\text{экр}}}{2} = \frac{\sqrt{\frac{F_2}{\pi}} - \sqrt{\frac{F_1}{\pi}}}{l}, \quad (5)$$

где l – длина канала, м.

При движении воздушного потока через конический диффузорный канал скорость движения замедляется, и с ростом статического давления, уменьшается динамическое. Основные параметры движения воздушного потока в диффузорном канале представлены на рис. 4.

При выходе воздушного потока в диффузорный канал происходит падение скорости воздушного потока с повышением статического давления, а также с образованием зон отрывного течения и вихревого режима течения.

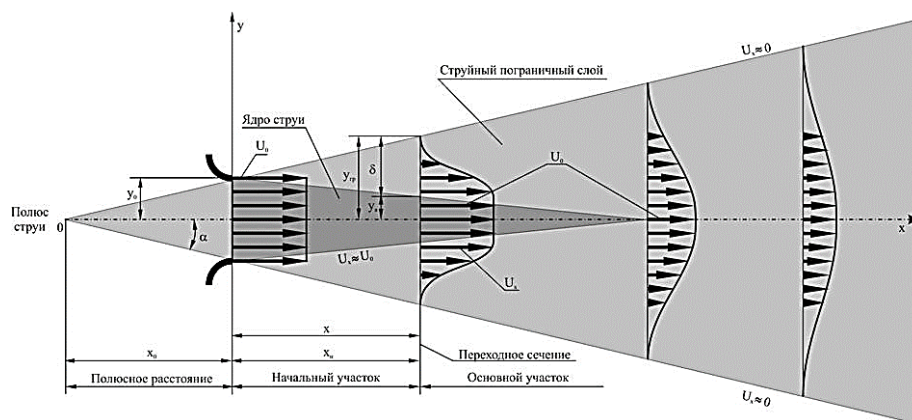


Рис. 4. Параметры движения воздушных потоков в диффузорном канале

Для определения исследуемых зон была разработана физическая модель и протестирована при разных углах раскрытия диффузора (5, 10 и 15 град) путем пропускания через вентиляционный канал искусственного дыма при соблюдении условий создания потока воздуха на входе в канал и бокового

потока воздуха при выходе из канала, имитирующего вращение тормозного диска при движении транспортного средства.

На рис. 5, *а* изображено испытание дымом диффузорного канала с углом раскрытия 5 град. Проанализировав данное изображение, можно прийти к выводу, что данный угол не является оптимальным ввиду быстрого прохождения воздушного потока с ламинарным практически по всей длине течением. В результате образуется низкая теплоотводящая способность тормозных дисков.

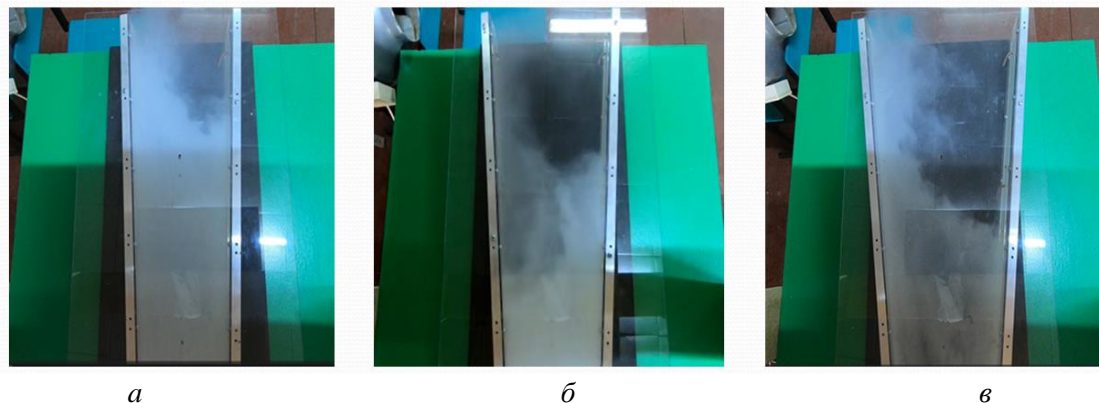


Рис. 5. Исследование различных по углу раскрытия диффузорных каналов искусственным дымом:

- а* – вентиляционный канал с углом раскрытия 5 град;
- б* – вентиляционный канал с углом раскрытия 10 град;
- в* – вентиляционный канал с углом раскрытия 15 град

При большом угле раскрытия 15 град (рис. 5, *в*) возникает следующая ситуация: основной воздушный поток стелится вдоль перегородки, которая, в первую очередь воспринимает обдуваемый встречный поток, тем самым освобождая противоположную перегородку и создавая при этом большую зону разряжения. Данные факты были подтверждены путем замеров эродинамических характеристик. Таким образом, те участки перегородки тормозного диска, где не проходит воздушный поток, остаются перегретой областью.

Наиболее оптимальным углом раскрытия можно считать угол 10 град (рис. 5, *б*). В этом случае воздушный поток также стелится вдоль перегородки, обдуваемой встречным потоком, а с противоположной стороны формируется зона разряжения с вихревым потоком и образованием противотока воздушного потока, создавая тем самым более интенсивное охлаждение перегородки.

Заключение

Основная задача работы ВА заключается в максимальной эффективности теплоотвода от нагретого тормозного диска. Данного эффекта можно достичь за счет создания турбулентного режима течения воздушного потока в ВА. Однако в современных конструкциях тормозных дисков существует негативный аспект, связанный с понижением давления воздушного потока на выходном сечении относительно входного сечения ВА. Это напрямую связано с разностью диаметров рабочей поверхности, а именно внутреннего диаметра относительно наружного. Таким образом, эффективность теплоотвода напрямую зависит от количества и скорости прохождения воздушного потока через ВА. Турбулентный режим течения способствует улучшению конвективного теплообмена, особенно в случае сохранения или повышения динамического давления в вентиляционных каналах.

Список литературы

1 Федотов, Е. С. Интенсификация конвективного теплообмена вентилируемого тормозного диска при наличии термического сопротивления / Е. С. Федотов, П. А. Поляков, М. В. Стародуб // Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения) : сборник статей VIII Международной научно-практической конференции,

References

1 Fedotov, E. S. Intensification of convective heat transfer of a ventilated brake disc in the presence of thermal resistance / E. S. Fedotov, P. A. Polyakov, M. V. Starodub // Transport. Economy. Social sphere (Current problems and their solutions) : collection of articles of the VIII International scientific and practical conference, Penza, April 23–24, 2021. – Penza : Penza State

Пенза, 23–24 апреля 2021 г. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2021. – С. 133–137. – ISBN 978-5-6045203-8-1.

2 Аналитический метод определения средних температур рабочих поверхностей тормозного диска / И. А. Яицков, П. А. Поляков, Н. А. Задаянчук, В. А. Денисенко // Механика, оборудование, материалы и технологии : IV Международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 г. – Краснодар : ООО «ПринтТерра», 2021. – С. 716–722. – ISBN 978-5-6046216-8-4.

3 **Яицков, И. А.** Отвод тепловой энергии путем теплопроводности элементов конструкции дисковых тормозных механизмов / И. А. Яицков, Е. С. Федотов // Современные проблемы теории машин. – 2021. – № 12. – С. 16–20. – DOI 10.26160/2307-342X-2021-12-16-20.

4 Особенности конструкции различных деталей дисково-колодочных тормозов и эффективность их действия / Е. С. Федотов, П. А. Поляков, Р. С. Тагиев, С. В. Харьков // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сборник статей VI Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 19–20 марта 2020 г. / под общей редакцией В. В. Салмина. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2020. – С. 182–186. – ISBN 978-5-907181-48-9.

5 **Яицков, И. А.** Методика определения аэродинамических характеристик диффузорных вентиляционных каналов тормозных дисков транспортных средств / И. А. Яицков, Е. С. Федотов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 257–263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257.

6 **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева ; М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 3-е изд., репр. – Москва : Изд. Дом «Бастет», 2010. – ISBN 978-5-903178-20-9.

Agrarian University, 2021. – P. 133–137. – ISBN 978-5-6045203-8-1.

2 Analytical method for determining the average temperatures of the working surfaces of the brake disc / I. A. Yaitskov, P. A. Polyakov, N. A. Zadayanchuk, V. A. Denisenko // Mechanics, equipment, materials and technologies : IV International scientific and practical conference, Krasnodar, November 25–26, 2021. – Krasnodar : LLC “PrintTerra”, 2021. – P. 716–722. – ISBN 978-5-6046216-8-4.

3 **Yaitskov, I. A.** Removal of thermal energy by thermal conductivity of the structural elements of disc brakes mechanisms / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov // Modern problems of machine theory. – 2021. – No. 12. – P. 16–20. – DOI 10.26160/2307-342X-2021-12-16-20.

4 Design features of various components of disc brakes and their effectiveness / E. S. Fedotov, P. A. Polyakov, R. S. Tagiev, S. V. Kharkov // Innovations of technical solutions in machine building and transport : collection of articles of the VI All-Russian scientific and technical Conference for young scientists and students with international participation, Penza, March 19-20, 2020 / Under the general editorship of V. V. Salmin. Penza : Penza State Agricultural University, 2020. – P. 182–186. – ISBN 978-5-907181-48-9.

5 **Yaitskov, I. A.** Methodology for determining the aerodynamic characteristics of diffuser ventilation ducts of brake discs of vehicles / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No 1. – P. 257–263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257.

6 **Mikheev, M. A.** Fundamentals of heat transfer / M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva; M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva. – 3rd ed., repr. – Moscow : Publishing house. House "Bastet", 2010. – ISBN 978-5-903178-20-9.

I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov, A. A. Nazaretov

EFFICIENCY OF HEAT REMOVAL OF THE BRAKE DISC SURFACES OF ROLLING STOCK BRAKING SYSTEM IN VARIOUS OPERATING MODES OF VENTILATION APPARATUS

Abstract. The modern concept of brake disc development provides for two main tasks: ease of manufacture and efficiency of operation with minimal economic costs. As a rule, both of these tasks are incompatible and have different goals. The operating principle of all ventilation devices of brake discs is the same, heat removal by passing cooled air through the channels. However,

the efficiency of this physical process varies depending on the design of the disk. The influence of the opening angle of diffuser-type ventilation channels on the efficiency of the brake disc ventilation device is considered. The study presents a comparative characteristic of various, most common designs of ventilation apparatus, and a new method for solving the tasks is proposed.

Keywords: brake disc, ventilation unit, air flow, heat removal, efficiency.

For citation: Yaitskov, I. A. Efficiency of heat removal of the brake disc surfaces of rolling stock braking system in various operating modes of ventilation apparatus / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov, A. A. Nazaretov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 219–224. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_219.

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

Федотов Евгений Сергеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
аспирант,
Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),
кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы»,
старший преподаватель,
e-mail: avtoru2009@mail.ru

Назаретов Андрей Алексеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: aanazaretov@rgups.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 Department,
e-mail: yia@rgups.ru

Fedotov Evgeny Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU)
Postgraduate Student,

Kuban State Technological University (KubSTU),
Chair “Transport Processes and Technological Complexes”,
Senior Lecturer,
e-mail: avtoru2009@mail.ru

Nazaretov Andrey Alekseyevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Car and Car Facilities”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: aanazaretov@rgups.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:

3344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,
г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 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

**№ 1 (97)
2025**

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,
А.Н. Колесниченко (английский текст)

Корректоры: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,
Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова,
А.Н. Колесниченко (английский текст)

Оригинал-макет журнала подготовлен А.О. Куделиной

Подписано в печать 27.03.2025.
Дата выхода в свет 28.03.2025.
Печать офсетная.
Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 26,49.
Тираж 510 экз.
Цена свободная.

Бумага офсетная.
Изд. № 12.
Заказ 24.

Учредитель :

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

**Адрес университета, издателя, редакции:
344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,
г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, зд. 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.**