

ISSN 0201–727X

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

ВЕСТНИК

**Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

№ 2 (102)

Ростов-на-Дону
2026

ВЕСТНИК
Ростовского государственного университета путей сообщения

2026
№ 2 (102)

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

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., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

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., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

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

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

П.Г. Иваночкин, 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

А.В. Костюков, д-р техн. наук, доц., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

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.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

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

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

Е.А. Чеботарева, д-р техн. наук, доц., 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

© ФГБОУ ВО РГУПС, 2026

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

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, RSTU, Rostov-on-Don

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, RSTU, Rostov-on-Don

A.A. Zarifyan, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

V.V. Zyryanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don

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

A.V. Kostyukov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don

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.A. Osipov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don

A.D. Petrushin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

S.V. Sokolov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Technical University of Communication and Informatics (MTUCI), Moscow

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

E.A. Chebotareva, Doctor of Engineering Sciences, Associate 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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Зехцер В.О., Костоглозов А.А., У С., Ли Б. Синтез модели квазиоптимального нечеткого регулятора при априорной неопределенности в интеллектуальных транспортных системах с дефицитом управляющих воздействий.....	8
Лохматов А.А. Многокритериальная задача размещения ремонтных участков специального самоходного подвижного состава: мультипериодическая постановка и эквивалентность задаче о потоке минимальной стоимости.....	21

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Осипов В.А. К вопросу энергетической эффективности тяговой сети с экранирующим и усиливающим проводниками.....	30
Черных В.Н. Математическое обоснование прямой и обратной зависимостей для определения гололёдной нагрузки в блочных компенсаторах контактной сети.....	37

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Нагаев Е.И., Усов Д.А., Ланис А.Л., Величко Д.В. Обоснование целесообразности адаптационных мероприятий при деградации многолетнемерзлых грунтов в основании транспортных сооружений.....	48
Пятков Д.А. Системный анализ подсистемы железнодорожной инфраструктуры как шаг к цифровому двойнику (стационарной системе) железнодорожного пути.....	61
Шаповалов В.Л., Окост М.В., Морозов А.В., Васильченко А.А., Мозговой А.В. Изменение деформационных характеристик грунтов при циклической заморозке.....	73

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Балалаев А.Н., Жебанов А.В. Параметрическая цифровая модель полувагона с произвольным положением центра тяжести.....	81
Дульский Е.Ю., Иванов П.Ю., Иванов В.Н., Пронин К.Е. Архитектура и алгоритм функционирования автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции тягового электродвигателя по эксплуатационным циклограммам.....	96
Каргин В.Г., Беспалько С.В., Третьяков А.В., Шинкарук А.С., Рогов А.А. Оптимизация системы технического обслуживания и ремонта рефрижераторных вагонов	105
Романенко Ю.Ю., Булыгин Ю.И., Яицков И.А. Экспериментальные исследования микроклиматических условий в кабинах машинистов электровазов для совершенствования систем и устройств обеспечения безопасности труда и повышения безопасности движения.....	113
Самойлова А.С. Совершенствование тормозных характеристик современного отечественного электровоза серии «Ермак».....	124
Харченко П.А. Методический подход к повышению эффективности эксплуатации тягового подвижного состава на основе информации о выполненных поездках.....	134

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

Вохмянина А.В., Некрасов В.К. Цифровая трансформация транспортно-логистических бизнес-процессов в региональных кластерах: моделирование с учетом субконтракта и рисков.....	142
Гордиенко А.А., Кощеев И.А. Показатели надежности способов размещения и крепления грузов в вагонах.....	147
Мизгирева Е.Е., Числов О.Н. Метод анализа иерархий в оценке классификационных признаков узловых транспортных организационно-технических систем	156
Москвичев О.В., Осьминин А.Т., Москвичева Е.Е., Куприянова Е.А. Концептуальные предложения по оптимизации процессной модели управления парком порожних грузовых вагонов.....	165

Муравьев А.А., Колокольников В.С. К вопросу о повышении корректности расчета загрузки стрелочных горловин	175
Четчуев М.В., Иванков А.Н., Костенко В.В., Смирнов С.С. Вадополас Й.Р. О целесообразности пересмотра действующих норм проектирования в части размещения железнодорожных станций на обратных кривых в плане.....	186

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Ерпалов А.В., Хорошевский К.А., Гадолина И.В. Оценка остаточного ресурса конструкций при случайном нагружении на основе одномерной свёрточной нейронной сети.....	194
Колесников И.В., Политыко К.Н., Азоян А.И., Четверик М.М. Структура, свойства и износостойкость многослойных металлокерамических покрытий CrAlSiN/Cr.....	210
Крутова В.А., Фролова Д.С., Тимофеев Е.А. Влияние частоты вращения и передаваемого момента на размыкание профилей зубьев в мелкомодульных передачах.....	219
Николаев М.Е., Перфилов В.А., Романова А.В., Еремин Г.С. Анализ кинематических характеристик манипулятора автоматизированного агрегата.....	226

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Колоденкова А.Е., Бочкарев М.О. Разработка метода прореживания видеопоследовательностей на основе оценки сходства черно-белых кадров.....	233
--	-----

CONTENTS

MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

Zekhtser V.O., Kostoglotov A.A., Wu X., Li B. Synthesis of a quasi-optimal fuzzy controller model under a priori uncertainty in intelligent transport underactuated systems.....	8
Lokhmatov A.A. The multi-criteria task of locating repair sites for special self-propelled rolling stock: multiperiodic formulation and equivalence to the minimum cost flow problem.....	21

POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

Osipov V.A. On the issue of energy efficiency of a traction network with shielding and reinforcing wires.....	30
Chernykh V.N. Mathematical justification of direct and inverse dependences for determining ice load in block compensators of the overhead contact network.....	37

RAIL TRACK AND TRANSPORT CONSTRUCTION

Nagaev E.I., Usov D.A., Lanis A.L., Velichko D.V. Justification of the feasibility of adaptation measures for permafrost degradation in the foundations of transport structures.....	48
Pyatkov D.A. System analysis of the railway infrastructure subsystem as a step towards a digital twin (stationary system) of a railway track.....	61
Shapovalov V.L., Okost M.V., Morozov A.V., Vasilchenko A.A., Mozgovoy A.V. Changes in soil deformation properties during cyclic freezing.....	73

ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY

Balalaev A.N., Zhebanov A.V. Parametric digital model of a gondola car with an arbitrary position of the center of gravity.....	81
Dulsky E.Yu., Ivanov P.Yu., Ivanov V.N., Pronin K.E. Architecture and functioning algorithm of the automated system for assessing the residual life of traction motor insulation based on operational cyclograms.....	96
Kargin V.G., Bepalko S.V., Tretyakov A.V., Shinkaruk A.S., Rogov A.A. Optimization of the system for maintenance and repair of refrigerated cars.....	105
Romanenko Yu.Yu., Bulygin Yu.I., Yaitsov I.A. Experimental studies of microclimatic conditions in the cabins of electric locomotive drivers to improve workplace safety systems and devices and increase safe railway operation	113
Samoilova A.S. Improving the braking characteristics of a modern domestic electric locomotive of the Ermak series.....	124
Kharchenko P.A. A methodological approach to improving the operational efficiency of traction rolling stock based on information on completed train rides.....	134

OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

Vohmyanina A.V., Nekrasov V.K. Digital transformation of transport and logistics business processes in regional clusters: modeling with subcontracting and risk management.....	142
Gordienko A.A., Koshcheev I.A. Reliability indicators for cargo placement and securing methods in railroad cars.....	147
Mizgireva E.E., Chislov O.N. The method of hierarchy analysis in the evaluation of classification features of hub transport organizational and technical systems.....	156
Moskvichev O.V., Osminin A.T., Moskvicheva E.E., Kupriyanova E.A. Conceptual proposals for optimizing the process model for managing a fleet of empty freight cars.....	165
Muravyov A.A., Kolokolnikov V.S. On the issue of improving the accuracy of calculating the capacity of the switch necks.....	175
Chetchuev M.V., Ivankov A.N., Kostenko V.V., Smirnov S.S., Vadopolas J.R. On the feasibility of revising current design standards regarding the placement of railway stations on reverse curves in the plan.....	186

MECHANICAL ENGINEERING

Erpalov A.V., Khoroshevsky K.A., Gadolina I.V. Residual life assessment of structures under random loading based on a one-dimensional convolutional neural network.....	194
Kolesnikov I.V., Polityko K.N., Azoyan A.I., Chetverik M.M. Structure, properties, and wear resistance of multilayer CrAlSiN cermet coatings.....	210
Krutova V.A., Frolova D.S., Timofeev E.A. Influence of rotational speed and transmitted torque on tooth profile separation in fine-module gear transmissions.....	219
Nikolaev M.E., Perfilov V.A., Romanova A.V., Eremin G.S. Analysis of the kinematic characteristics of the automated unit's manipulator.....	226

INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION
AND TELECOMMUNICATIONS

Kolodenkova A.E., Bochkarev M.O. Development of a method for redundant frame removal in video sequences based on assessment of the black-and-white frames similarity.....	233
--	-----

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 517.977.1 : 656.2 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_8

*В. О. Зехцер, А. А. Костоглотов, С. У, Б. Ли***СИНТЕЗ МОДЕЛИ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА
ПРИ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ
С ДЕФИЦИТОМ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Аннотация. Рассмотрен синтез модели нечеткого квазиоптимального регулятора и анализ его эффективности по сравнению с известным регулятором скорости поезда при кратковременных отклонениях от заданного режима движения. Задача управления системой с дефицитом управляющих воздействий имеет особую значимость для железнодорожного транспорта, в особенности для высокоскоростного движения. Механические системы как объекты управления представляют собой существенно нелинейные динамические системы высокого порядка. Кроме того, сложность оптимизации режимов функционирования таких систем связана с тем, что даже детальное моделирование не позволяет точно предсказать совокупное влияние всех динамических факторов, действующих на динамическую систему в условиях эксплуатации. Традиционно используемые на практике линейные законы управления с постоянными коэффициентами предназначены для стабилизации лишь одного конкретного режима движения, что делает их неэффективными в условиях дефицита управления и априорной неопределенности. Использование редукции оптимизационной задачи Лагранжа к изопериметрической позволяет получить квазиоптимальное решение задачи структурного синтеза, повышающее эффективность управления по сравнению с известными методами. Применение аппарата нечеткой логики позволяет провести параметрический синтез управления, обеспечивая адаптивность к априорно неопределенным условиям эксплуатации.

Ключевые слова: квазиоптимальный закон управления, редукция задачи Лагранжа к изопериметрической, система с дефицитом управления, управление скоростью поезда, нечеткая логика.

Для цитирования: Синтез модели квазиоптимального нечеткого регулятора при априорной неопределенности в интеллектуальных транспортных системах с дефицитом управляющих воздействий / В. О. Зехцер, А. А. Костоглотов, С. У, Б. Ли // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 8–20. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_8.

Введение

Актуальной проблемой современной теории управления является разработка алгоритмов управления для механических систем, функционирующих в условиях дефицита управляющих воздействий. Такая ситуация возникает, когда количество независимых управляющих сигналов оказывается меньше числа степеней свободы объекта. Типовыми примерами таких объектов являются беспилотные транспортные средства, роботы-манипуляторы, подвижность которых может быть ограничена в определенных сценариях, и системы с отказавшими подвижными элементами [1, 2]. Типовые алгоритмы в таких условиях не способны обеспечить достаточную эффективность. Альтернативным способом решения является введение избыточных подвижных элементов, что, в свою очередь, ведет к существенному усложнению и удорожанию конструкции. Таким образом, актуальной задачей является разработка новых подходов к синтезу управления для нелинейных механических объектов в условиях дефицита управляющих воздействий.

Механические системы как объекты управления отличаются существенной нелинейностью и уравнениями движения, не разрешенными относительно старших производных. Их важной особенностью также является сильное динамическое взаимовлияние элементов.

Традиционные линейные регуляторы с постоянными коэффициентами, широко применяемые в задачах управления, оказываются непригодными для решения рассматриваемой проблемы. Их принципиальный недостаток – ориентация на стабилизацию единственного, заранее заданного режима работы, что не позволяет им адаптироваться к условиям дефицита управления. Следовательно, синтез управления для таких систем целесообразно проводить непосредственно в нелинейной постановке, избегая линеаризации. Подходы, основанные на линеаризованных моделях, обладают существенным ограничением: их параметры и сама структура управляющего устройства жестко привязаны к конкретному невозмущенному движению. Также область устойчивости таких систем может не включать реальные эксплуатационные возмущения, что грозит потерей устойчивости или недопустимым ухудшением качества функционирования системы.

Исследуя предельный случай управления «черным ящиком механической природы» при полном отсутствии информации о динамических параметрах системы, Е. С. Пятницкий разработал один из фундаментальных подходов к данной проблеме [3]. Предложенный им «принцип декомпозиции» заложил основу для создания универсальных законов управления. Такие законы управления способны обеспечивать устойчивость произвольного целевого режима движения из допустимого множества, не требуя точных знаний параметров объекта.

В работе [4] показано, что коррекцию кривой переключения можно провести, применив редукцию задачи Лагранжа к изопериметрической, что позволяет получить квазиоптимальное решение задачи синтеза управления, превосходящее по эффективности существующие методы.

Задача управления системой с дефицитом управляющих воздействий имеет особую значимость для железнодорожного транспорта, в особенности для высокоскоростного движения [5–7]. Рост интенсивности движения, сокращение межпоездных интервалов и повышение требований к энергоэффективности делают традиционные линейные регуляторы, настроенные на один режим, недостаточно эффективными. На железнодорожном транспорте дефицит управляющих воздействий проявляется, например, когда тяговый электропривод не может независимо управлять скоростью и ускорением поезда из-за ограничений по сцеплению колес с рельсами либо при отказе части тяговых двигателей. Кроме того, в процессе эксплуатации масса поезда известна неточно, распределение рекуперированной энергии торможения между другими потребителями и реостатами зависит от значительного числа заранее неизвестных факторов [8, 9], а также существуют различные сценарии кратковременных отклонений от заданного режима (порывы ветра, изменения профиля пути, краткосрочные ограничения скорости), после которых необходимо восстановить движение по графику. Составление графиков движения без учета модели регулятора приводит к неоптимальным энергозатратам [10, 11]. Сложность оптимизации режимов движения связана с тем, что даже детальное моделирование не позволяет точно предсказать совокупное влияние всех динамических факторов (ветровая нагрузка, состояние пути, изменения массы состава), действующих на поезд в условиях эксплуатации [12]. Таким образом, актуальной является задача создания интеллектуальных алгоритмов управления торможением и стабилизации, способных в режиме реального времени адаптироваться к изменяющимся условиям и выбирать оптимальный режим ведения поезда, что соответствует приоритетному направлению развития интеллектуальных транспортных систем.

Данную задачу можно формализовать в рамках теории систем с дефицитом управления. Модель управления движением поезда, объединяющая нелинейные взаимосвязанные электрические и механические подсистемы, естественным образом описывается как система с числом степеней свободы, превышающим число управляющих воздействий. Решение такой задачи для общего случая нелинейных динамических систем получено в виде структуры квазиоптимальных законов управления в работах [13, 14].

Открытым на текущий момент остается вопрос решения задачи поиска параметров предложенного управления в условиях априорно неизвестных внешних воздействий. Применение аппарата нечеткой логики позволяет провести параметрический синтез управления, обеспечивая адаптацию к априорно неопределенным условиям эксплуатации [15, 16].

Необходимость применения аппарата нечеткой логики в задачах управления скоростью высокоскоростных поездов обусловлена рядом фундаментальных причин, связанных с природой объекта управления и условиями его эксплуатации. Во-первых, движение поезда представляет собой сложный нелинейный динамический процесс с существенной параметрической неопределенностью: масса состава, коэффициенты сопротивления движению, характеристики сцепления колес с рельсами и эффективность рекуперативного торможения могут изменяться в широких пределах и не поддаются точному априорному измерению [17]. Во-вторых, внешние возмущения (порывы ветра, изменения профиля

пути, кратковременные ограничения скорости) носят случайный характер и не могут быть формализованы в виде детерминированных математических моделей [18]. Традиционные подходы, основанные на линейных регуляторах с постоянными коэффициентами, требуют либо точного знания параметров системы, либо не обеспечивают адаптации к изменяющимся условиям в реальном времени. Нечеткая логика позволяет преодолеть указанные ограничения за счет использования качественных экспертных знаний и лингвистических правил, что особенно ценно в условиях, когда построение точной математической модели затруднено или невозможно [19]. По сравнению с классическими методами нечеткому регулятору не требуется точная настройка на единственный режим работы, так как он способен плавно изменять свою структуру или параметры в зависимости от текущего отклонения от цели управления, обеспечивая робастность к априорно неизвестным возмущениям в условиях параметрической неопределенности. Как показано в работах [15, 16], применение нечеткой логики в системах управления поездами позволяет повысить энергоэффективность и точность отслеживания графика движения. Также использование модели нечеткого вывода Такаги – Сугено позволяет совместить логический вывод с аналитическими методами оптимизации [20], что особенно важно для синтеза квазиоптимальных законов управления в системах с дефицитом управляющих воздействий. Таким образом, применение аппарата нечеткой логики для построения регулятора на основе квазиоптимального закона управления решает проблему параметрического синтеза, что обеспечивает эффективное функционирование системы в реальных условиях эксплуатации высокоскоростного железнодорожного транспорта.

Цель работы – синтез модели нечеткого квазиоптимального регулятора, обеспечивающего повышение эффективности управления скоростью поезда как системой с дефицитом управляющих воздействий в условиях неопределенности.

Синтез управления для систем с дефицитом управляющих воздействий

Рассматривается объект управления, который может быть описан системой дифференциальных уравнений, относящейся к классу уравнений Лагранжа второго рода в обобщенных координатах $\mathbf{q} = \|q_s\|_{s=1}^n$:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + u_i(t), i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n a_{ik}(\mathbf{q}) \dot{q}_i \dot{q}_k, \quad a_{ik}(\mathbf{q}) = a_{ki}(\mathbf{q}). \quad (2)$$

Предполагается, что при любых значениях $\mathbf{q}$ коэффициенты $a_{ik}(\mathbf{q})$ и их частные производные первого порядка ограничены. Матрица $\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \|a_{ik}(\mathbf{q})\|_{i,k=1}^n$, входящая в выражение кинетической энергии механической системы, является для всех $\mathbf{q}$ положительно определенной. Внешние воздействия обуславливают наличие ограниченных обобщенных сил $Q_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$. Обобщенные координаты, в уравнения которых входят управления, обозначим $\|q_v\|_{v=1}^m$, а координаты, в уравнения которых не входят управляющие воздействия, – $\|q_j\|_{j=m+1}^n$. Рассматривается случай, когда число управлений m меньше числа обобщенных координат n , что определяет объект (1) как систему с дефицитом управления.

Множество допустимых управлений формируется как вектор, состоящий из суммы функций $\mathbf{u}(t) = \|u_s(t)\|_{s=1}^n$ в выпуклой области U и содержащий нулевые компоненты для неуправляемых координат:

$$\mathbf{u}(t) \in U = \left\{ u_s(t) : |u_s(t)| \leq h_s, s = \overline{1, n} \right\}. \quad (3)$$

Задача ставится следующим образом: необходимо перевести динамическую систему (1) из заданного начального состояния $t = t_0, \mathbf{q}(t_0), \dot{\mathbf{q}}(t_0)$ в допустимое для (1) – (3) конечное состояние $t = t_1, \mathbf{q}(t_1), \dot{\mathbf{q}}(t_1)$ за интервал времени $[t_0, t_1]$. Требуется найти управление (3), минимизирующее интегральный критерий качества, где подынтегральная функция является выпуклой и положительно определенной:

$$J(\mathbf{q}) = \int_{t_0}^{t_1} F(\mathbf{q}(t)) dt \rightarrow \min. \quad (4)$$

При условии выпуклости целевого функционала (4) применение принципа максимума Понтрягина позволяет построить решение для исходной экстремальной задачи. Однако недостаток полученного таким образом программного управления заключается в низкой робастности: при любом изменении ограничений системы или параметров приходится повторно решать задачу для определения обратной связи.

Существует альтернативный подход, основанный на редукции исходной оптимизационной задачи к изопериметрической [4]. Классическая изопериметрическая задача в вариационном исчислении требует минимизации функционала при наличии интегрального ограничения. В данном случае исходный критерий качества (4) дополняется интегралом действия (или другим инвариантом динамической системы) как изопериметрическим условием. В результате исходная задача Лагранжа с нелинейными дифференциальными связями сводится к задаче на условный экстремум функционала с интегральной связью. Это позволяет применить метод неопределенных множителей Лагранжа и получить необходимые условия экстремума. Такой подход дает возможность получить приближенное решение в смысле минимума расширенного функционала на основе аддитивной свертки исходного критерия (4) и интеграла действия, что позволяет определить структуру множества квазиоптимальных решений, представленных в форме синтеза.

Метод синтеза квазиоптимальных систем с дефицитом управления представлен в исследованиях [13, 14]. Он основан на редукции задачи Лагранжа и применении принципа декомпозиции, что позволяет получить структуру квазиоптимальной системы, управляемой по критерию (4).

Положим, что критерий качества (4) определяется следующей целевой функцией:

$$F(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n k_s q_s^2 = \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q},$$

где $\mathbf{K}$ – положительно определенная диагональная матрица; k_s – заданные весовые коэффициенты.

Известно [4], что решение задачи структурного синтеза закона управления имеет вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} = -h_s \text{sign}(\Psi_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))_s, \quad s = \overline{1, n},$$

где $\Psi_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mu_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{q}_s + \frac{\partial F(\mathbf{q})}{\partial q_s}$ определяет поверхность переключения; $\mu_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – знакопостоянная

синтезирующая функция; $[\lambda(A - T) + F]_t^{t_1} = 0, \quad t \in [t_0, t_1]$ – требование выполнения энергетического баланса на экстремальной траектории; A – работа обобщенных сил; λ – множитель Лагранжа.

Поверхность переключения с точностью до неопределенных множителей λ и вектора ϵ для заданной выше целевой функции принимает вид [21]

$$\Psi_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \left[k_s q_s + \lambda \frac{|\dot{q}_s| \dot{q}_s}{a_{ss}^{-1}(\mathbf{q}) \left[|q_s| + k_s^{-1} \sum_{k=1}^n r_{ks}^{-1} \epsilon_k \right]} \right], \quad s, k = \overline{1, n},$$

где r_{ks}^{-1} – элементы матрицы учета кинематической связи при построении линии переключения.

Обозначим $\alpha_{1s} = k_s, \alpha_{2s} = \frac{\lambda}{a_{ss}^{-1}(\mathbf{q})}, \alpha_{3s} = k_s^{-1} \sum_{k=1}^n r_{ks}^{-1} \epsilon_k$, тогда

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} &= Q_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + u_s, \\
u_s &= -h_s \operatorname{sign} \left[\sum_{k=1}^n a_{sk}^{-1}(\mathbf{q}) \Psi_s(q_s, \dot{q}_s) \right], \quad s = \overline{1, m}, \\
u_s &= 0, \quad s = \overline{m+1, n}, \\
\Psi_s(q_s, \dot{q}_s) &= \left[\alpha_{1s} q_s + \alpha_{2s} \frac{|\dot{q}_s| \dot{q}_s}{|q_s| + \alpha_{3s}} \right], \\
s &= \overline{1, n}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Построение модели системы управления движением поезда

Движение поезда может быть описано уравнением следующего вида [22]:

$$m\ddot{s} = F - R,$$

где m – масса поезда; s – горизонтальное перемещение поезда; R – равнодействующая сил основного и дополнительного сопротивления движению; F – сила тяги/электрического торможения, развиваемая локомотивом.

В связи с тем что полная модель тягового электропривода, состоящая из электрической и механической частей, является довольно сложной для прямого применения в задаче синтеза квазиоптимального регулятора, используем аппроксимацию этой модели. Экспериментальные данные, полученные на обкатном кольце полигона Щербинка, позволяют представить модель тягового электропривода в следующем виде [22]:

$$T_1 T_2 \ddot{M} + (T_1 + T_2) \dot{M} + M = k_u u,$$

где T_1, T_2 – постоянные времени; M – момент вала тягового электропривода; k_u – коэффициент, связывающий напряжение на тяговом электроприводе и развиваемый момент.

Таким образом, модель всей системы движения поезда может быть описана уравнениями Лагранжа второго рода в обобщенных координатах $q = \begin{bmatrix} s \\ M \end{bmatrix}$:

$$\begin{cases} m\ddot{s} = k_m M - R, \\ T_1 T_2 \ddot{M} = -(T_1 + T_2) \dot{M} - M + k_u u, \end{cases} \tag{6}$$

где u – управление тягового электропривода; k_m – коэффициент, связывающий момент на валу тягового электропривода и развиваемую силу тяги.

Система функционирует в условиях ограничений на силу тяги $|k_m M| \leq F_{\max}$ в соответствии с тяговой характеристикой поезда. Ограничения на ускорение поезда $\ddot{s}_{\min} \leq \ddot{s} \leq \ddot{s}_{\max}$ определяются техническими требованиями.

Величина силы сопротивления определяется известной зависимостью [23]

$$R(\dot{s}) = P w_l + Q w_c = P(a_p + b_p \dot{s} + c_p \dot{s}^2) + Q(a_Q + b_Q \dot{s} + c_Q \dot{s}^2),$$

где P – вес локомотива; Q – вес состава; w_l – удельное сопротивление локомотива; w_c – удельное сопротивление состава; $a_p, b_p, c_p, a_Q, b_Q, c_Q$ – коэффициенты, зависящие от характеристик поезда.

Рассматривается сценарий, когда скорость движения поезда отклоняется от заданного режима в силу априорно неизвестных воздействий. Процесс достижения требуемого режима после отклонения считается завершённым при достижении графика движения $v_{\text{ит}}$ при требуемой скорости $v_{\text{ц}}$. В соответствии с этой целью управление синтезируется так, чтобы интегральный критерий следующего вида достигал минимума:

$$J = \int_0^{t_k} (s - v_{ц}t)^2 dt \rightarrow \min. \quad (7)$$

Построение нечеткого регулятора скоростью поезда

Повышение робастности системы, ее быстродействия и уменьшение перерегулирования могут быть достигнуты за счет использования нечеткой логики [19] для параметрического синтеза закона управления (5).

В разрабатываемом нечетком регуляторе определяются следующие входные и выходные переменные:

– вход 1: $\Delta s = s - v_{ц}t$ (отклонение по координате);

– вход 2: $\Delta \dot{s} = \dot{s} - v_{ц}$ (отклонение по скорости);

– выход: значение параметра регулятора α_k , который влияет на форму поверхности переключения.

Структура нечеткого контроллера реализована на основе TS-модели типа MISO (много входов – один выход). База правил формируется для каждого параметра $\alpha_k, k = \overline{1, 6}$ в управлении (5) с использованием продукционных правил вида:

R^1 : если Δs есть A_1 и $\Delta \dot{s}$ есть B_1 , то $\alpha_k = f_1$, иначе

R^2 : если Δs есть A_2 и $\Delta \dot{s}$ есть B_1 , то $\alpha_k = f_2$, иначе

...

R^{25} : если Δs есть A_5 и $\Delta \dot{s}$ есть B_5 , то $\alpha_k = f_{25}$,

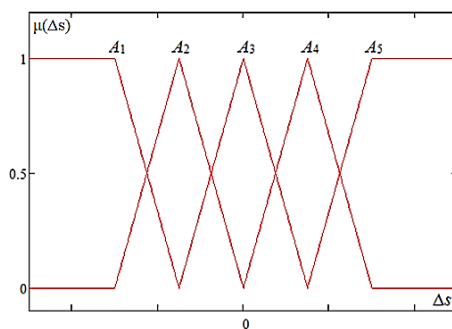
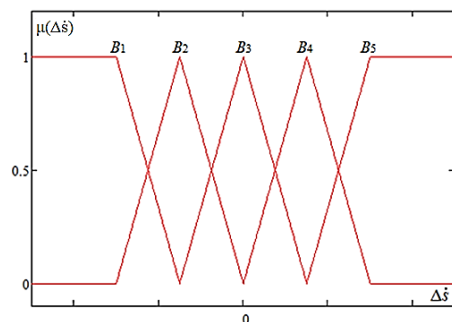
где $A_i, B_i, i = \overline{1, 5}$ – области отклонения s и $\dot{s}$ соответственно, определяемые функциями принадлежности; $f_j, j = \overline{1, 25}$ – оптимальные по критерию (7) значения параметра α_k для конкретных отклонений.

Значения f_j (таблица) были определены в результате серии численных экспериментов с использованием метода скользящей оптимизации. Для каждой комбинации лингвистических термов A_i и B_j (дискретные значения ошибок) решалась задача параметрической оптимизации по критерию (7) с помощью градиентного метода. Полученные таким образом оптимальные значения α_k фиксировались как константы f_j . Такой подход гарантирует воспроизводимость результатов и позволяет использовать базу правил без дополнительной настройки.

База правил параметра α_k

Ошибка пути Δs Ошибка скорости $\Delta \dot{s}$		← +		0	- →	
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
↑ +	B_1	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
	B_2	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
○	B_3	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}
↓ -	B_4	f_{16}	f_{17}	f_{18}	f_{19}	f_{20}
	B_5	f_{21}	f_{22}	f_{23}	f_{24}	f_{25}

Для фаззификации входных переменных выбраны традиционно используемые для задач управления треугольные функции принадлежности [24]. На рис. 1, 2 представлены функции принадлежности для ошибки пути Δs и ошибки скорости $\Delta \dot{s}$ соответственно.

Рис. 1. Функции принадлежности для Δs Рис. 2. Функции принадлежности для $\Delta \dot{s}$

$$\mu(\Delta s) = \begin{cases} 0, & \Delta s < a_1 \text{ или } \Delta s > c_1 \\ \frac{\Delta s - a_1}{b_1 - a_1}, & a_1 \leq \Delta s \leq b_1 \\ \frac{c_1 - \Delta s}{c_1 - b_1}, & b_1 \leq \Delta s \leq c_1 \end{cases}, \quad \mu(\Delta \dot{s}) = \begin{cases} 0, & \Delta \dot{s} < a_2 \text{ или } \Delta \dot{s} > c_2 \\ \frac{\Delta \dot{s} - a_2}{b_2 - a_2}, & a_2 \leq \Delta \dot{s} \leq b_2 \\ \frac{c_2 - \Delta \dot{s}}{c_2 - b_2}, & b_2 \leq \Delta \dot{s} \leq c_2 \end{cases} \quad (8)$$

где $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ – параметры, определяющие границы функций принадлежности. Композиция функций принадлежности (8) $\mu' = \mu(\Delta s) \wedge \mu(\Delta \dot{s})$ определяет границы на фазовой плоскости. Для получения конкретного значения параметра $\alpha_k, k = \overline{1, 6}$ используется метод взвешенного среднего, являющийся стандартным для TS-моделей:

$$\alpha_k = \frac{\sum_{j=1}^{25} \mu'_j f_j}{\sum_{j=1}^{25} \mu'_j}.$$

Анализ эффективности нечеткого регулятора

Рассмотрим пример моделирования движения пассажирского электровоза ЭП20 в условиях неизвестных возмущений с характерными для его модели параметрами [22]. Численное моделирование проводится на интервале времени $t = [0, 100]$ с при шаге $\Delta t = 0,1$ с, значениях параметров $k_m = 6,36 \frac{1}{\text{М}}$, $k_u = 50 \frac{\text{кг} \cdot \text{М}^2}{\text{В} \cdot \text{с}^2}$, $T_1 = 1,44$ с, $T_2 = 2,53$ с, $m = 779$ т, $P = 1265$ кН, $Q = 6370$ кН, $F_{\max} = 350$ кН, $a_p = 2,4$, $b_p = 0,011 \frac{\text{с}}{\text{М}}$, $c_p = 0,00035 \frac{\text{с}^2}{\text{М}}$, $a_Q = 0,75$, $b_Q = 0,0011 \frac{\text{с}}{\text{М}}$, $c_Q = 0,000019 \frac{\text{с}^2}{\text{М}}$, $\ddot{s}_{\max} = 0,7 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$, $\ddot{s}_{\min} = -1,5 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$,

начальных значениях $s(0) = 0$ м, $\dot{s}(0) = 17 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $M(0) = \frac{R(\dot{s}(0))}{k_m}$, $\dot{M}(0) = 0 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3}$ и целевом значении скорости для достижения требуемого режима движения $v_{\text{ц}} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Процесс достижения требуемого режима ведения поезда после отклонения в соответствии с техническими характеристиками и нормативными требованиями будем считать завершенным при достижении отклонения Δs в пределах ± 5 м и $\Delta \dot{s}$ в пределах $\pm 0,8$ м/с. Необходимо обеспечить достижение требуемого режима ведения поезда при условии, что критерий эффективности (7) достигает минимума.

Предлагаемый закон управления (5) в соответствии со структурой модели (6) и критерием (7) принимает вид

$$u_{\text{cmp}} = \text{sat} \left[\frac{k_m}{m} \left(\alpha_1 (s - v_{\text{ц}} t) + \alpha_2 \frac{|\dot{s} - v_{\text{ц}}| (\dot{s} - v_{\text{ц}})}{|s - v_{\text{ц}} t| + \alpha_3} \right) + \frac{k_u}{T_1 T_2} \left(\alpha_4 M + \alpha_5 \frac{|\dot{M}| \dot{M}}{|\dot{M}| + \alpha_6} \right) \right], \quad (9)$$

где sat – функция насыщения.

Для анализа эффективности разработанного нечеткого контроллера проведем сравнение результатов моделирования с законом управления на основе прямого применения принципа декомпозиции [3]:

$$u_{\text{pyat}} = \text{sat} \left[\frac{k_m}{m} (\alpha_{s1} (s - v_{\text{ц}} t) + \alpha_{s2} (\dot{s} - v_{\text{ц}})) + \frac{k_u}{T_1 T_2} (\alpha_{M1} M + \alpha_{M2} \dot{M}) \right]. \quad (10)$$

Из-за нелинейности законов управления (9) и (10) их параметрический синтез представляет сложную задачу, в связи с чем расчет параметров производится с помощью предложенной выше схемы нечетко-логического вывода на всем диапазоне априорно неизвестных отклонений.

Результаты моделирования для вышеописанного варианта исходных данных представлены на рис. 3, 4, где графики изменения параметров движения, полученные с помощью предлагаемого закона управления (9), изображены сплошной линией, а с помощью известного закона управления (10) – штрихом.

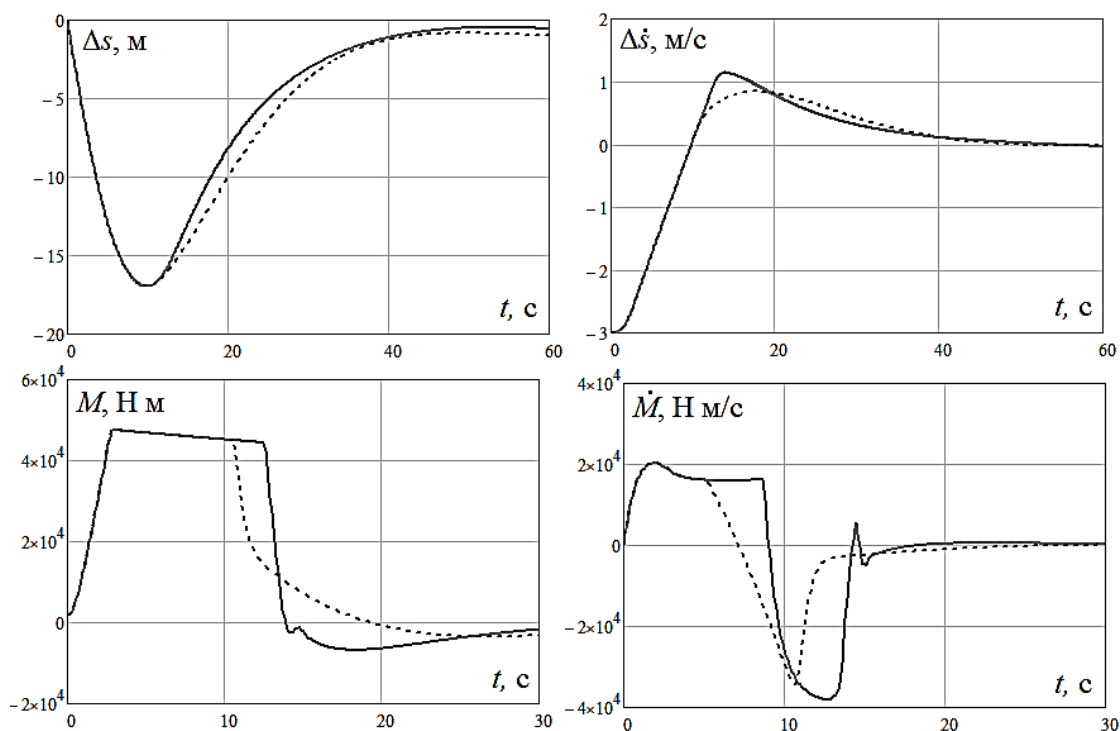


Рис. 3. Переходные процессы управления движением поезда

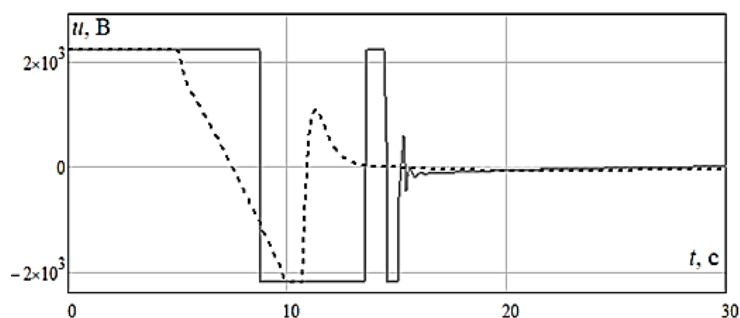


Рис. 4. Величина управляющего воздействия

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что синтезированный закон управления (9) дает возможность повысить качество регулирования скорости поезда в сравнении с известным законом управления (10) на 11,2 % по критерию (7).

Заключение

Анализ результатов проведенного численного моделирования показывает, что модель нечеткого квазиоптимального регулятора с предлагаемым законом управления позволяет повысить качество управления скоростью поезда по критерию минимума отклонения от графика движения на 11,2 % в сравнении с известным законом, основанным на прямом применении принципа декомпозиции в условиях априорной неопределенности.

Использование аппарата нечетко-логического вывода позволяет решить вопрос выбора параметров регулятора и демонстрирует возможность интеллектуализации алгоритмов управления на основе экспериментальных данных, что позволяет обеспечить повышение качества функционирования систем автоматического управления скоростью поезда в условиях неопределенности. При этом создание интеллектуальных алгоритмов управления торможением и стабилизации, способных в режиме реального времени адаптироваться к изменяющимся условиям и выбирать оптимальный режим ведения поезда, является исключительно актуальным для высокоскоростных поездов и соответствует приоритетному направлению развития интеллектуальных транспортных систем.

Заметим, что в данной работе при моделировании движения поезда использовалась упрощенная модель, не учитывающая профиль пути и внешние воздействия, что определяет перспективы дальнейших исследований и анализа функционирования такой системы в более сложных условиях.

Также следует отметить, что для механических систем, отличающихся существенной нелинейностью модели движения, используемый подход синтеза управления может повысить не только качество управления по заданному критерию, но и увеличить область устойчивости при больших отклонениях от заданного режима движения [13, 14].

Кроме системы управления скоростью поезда, разработанный нечеткий регулятор имеет перспективы применения в системах управления различных видов транспортных средств, например, при управлении угловой ориентацией мультироторных беспилотных летательных аппаратов, при управлении различными видами роботов и прочих механических систем с дефицитом управляющих воздействий, которые могут быть описаны уравнениями Лагранжа второго рода.

Список литературы

- 1 UDE-based dynamic surface control for quadrotor drone attitude tracking under nonideal actuators / L. Xu, K. Qin, F. Tang [et al.] // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 5. – P. 305. – DOI 10.3390/drones7050305.
- 2 Le, H. D. A novel hierarchical recursive nonsingular terminal sliding mode control for inverted Pendulum / H. D. Le, T. Nestorović // Actuators. – 2023. – Vol. 12. – P. 462. – DOI 10.3390/act12120462.
- 3 Пятницкий, Е. С. Принцип декомпозиции в управлении механическими системами / Е. С. Пятницкий // Доклады Академии наук СССР. – 1988. – Т. 300, № 2. – С. 300–303.

References

- 1 UDE-based dynamic surface control for quadrotor drone attitude tracking under non-ideal actuators / L. Xu, K. Qin, F. Tang [et al.] // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 5. – P. 305. – DOI 10.3390/drones7050305.
- 2 Le, H. D. A novel hierarchical recursive nonsingular terminal sliding mode control for inverted Pendulum / H. D. Le, T. Nestorović // Actuators. – 2023. – Vol. 12. – P. 462. – DOI 10.3390/act12120462.
- 3 Pyatnitsky, E. S. Decomposition principle in the control of mechanical systems / E. S. Pyatnitsky // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1988. – Vol. 300, No. 2. – P. 300–303.

4 **Костоглотов, А. А.** Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования / А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2021. – Т. 6, № 6. – С. 3–12. – DOI 10.31857/S0002338821060111.

5 A GoA4 control architecture for the autonomous driving of high-speed trains over ETCS : design and experimental validation / L. Barruffo, B. Caiazzo, A. Petrillo, S. Santini // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2024. – Vol. 25, No. 6. – P. 5096–5111. – DOI 10.1109/TITS.2023.3338295.

6 **Liang, B.** Fractional order nonsingular terminal sliding mode cooperative fault-tolerant control for high-speed trains with actuator faults based on grey wolf optimization / B. Liang, T. Zhang // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 63932–63946. – DOI 10.1109/ACCESS.2023.3288902.

7 **Zhu, Y.** A loss-model-based efficiency optimization control method for induction traction system of high-speed train under emergency self-propelled mode / Y. Zhu, Y. Li // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. – 2024. – Vol. 8, No. 2. – P. 227–239.

8 **Баранов, Л. А.** Энергооптимальное управление движением поезда с рекуперативным тормозом при учете ограничений на фазовую координату / Л. А. Баранов, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 4. – С. 19–29. – ISSN 2074-9325.

9 Электровоз с плавным управлением в режимах независимого и последовательного возбуждения тяговых электродвигателей / Н. Л. Михальчук, О. Е. Пудовиков, А. Н. Савоскин, А. А. Чучин // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 9. – С. 35–39. – ISSN 0044-4448.

10 Внедрение системы автоведения для повышения точности управления и энергоэффективности высокоскоростного электропоезда / О. С. Валинский, А. Н. Марикин, Н. П. Калинин, Е. В. Суханов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22, № 1. – С. 7–18. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-7-18.

11 **Zhang, Z.** Energy-efficient driving strategy for high-speed trains with considering the checkpoints / Z. Zhang, Y. Cao, S. Su // Chinese Journal of Electronics. – 2024. – Vol. 33, No. 3. – P. 847–858.

12 Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь ; под редакцией Л. А. Баранова. – Москва : МИИТ, 2011. – 164 с. – ISBN 978-5-7876-0151-0.

4 **Kostoglotov, A. A.** Method of quasi-optimal synthesis of control laws based on reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem using asynchronous variation / A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya (Journal of Computer and System Sciences International). – 2021. – Vol. 6, No. 6. – P. 3–12. – DOI 10.31857/S0002338821060111.

5 A GoA4 control architecture for the autonomous driving of high-speed trains over ETCS : design and experimental validation / L. Barruffo, B. Caiazzo, A. Petrillo, S. Santini // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2024. – Vol. 25, No. 6. – P. 5096–5111. – DOI 10.1109/TITS.2023.3338295.

6 **Liang, B.** Fractional order nonsingular terminal sliding mode cooperative fault-tolerant control for high-speed trains with actuator faults based on grey wolf optimization / B. Liang, T. Zhang // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 63932–63946. – DOI 10.1109/ACCESS.2023.3288902.

7 **Zhu, Y.** A loss-model-based efficiency optimization control method for induction traction system of high-speed train under emergency self-propelled mode / Y. Zhu, Y. Li // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. – 2024. – Vol. 8, No. 2. – P. 227–239.

8 **Baranov, L. A.** Energy-optimal train motion control with regenerative braking under phase coordinate constraints / L. A. Baranov, I. S. Meleshin, L. M. Chin // Science and Technology in Transport. – 2010. – No. 4. – P. 19–29. – ISSN 2074-9325.

9 Electric locomotive with smooth control in independent and sequential excitation modes of traction motors / N. L. Mikhalechuk, O. E. Pudovikov, A. N. Savoskin, A. A. Chuchin // Railway Transport. – 2022. – No. 9. – P. 35–39. – ISSN 0044-4448.

10 Implementation of an automatic driving system to improve control accuracy and energy efficiency of a high-speed electric train / O. S. Valinsky, A. N. Marikin, N. P. Kalinin, E. V. Sukhanov // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2025. – Vol. 22, No. 1. – P. 7–18. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-7-18.

11 **Zhang, Z.** Energy-efficient driving strategy for high-speed trains with considering the checkpoints / Z. Zhang, Y. Cao, S. Su // Chinese Journal of Electronics. – 2024. – Vol. 33, No. 3. – P. 847–858.

12 Optimization of train traffic control / L. A. Baranov, E. V. Erofeev, I. S. Meleshin, L. M. Chin ; edited by L. A. Baranov. – Moscow : MIIT, 2011. – 164 p. – ISBN 978-5-7876-0151-0.

13 **Костоглотов, А. А.** Метод синтеза квазиоптимальных систем с дефицитом управления на базе редукции задачи Лагранжа / А. А. Костоглотов, В. О. Зехцер // Информационно-управляющие системы. – 2024. – № 4 (131). – С. 40–49. – DOI 10.31799/1684-8853-2024-4-40-49.

14 **Костоглотов, А. А.** Квазиоптимальный закон управления для лагранжевых систем с дефицитом управляющих воздействий / А. А. Костоглотов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2024. – № 3 (223). – С. 4–14. – DOI 10.18522/1026-2237-2024-3-4-14.

15 Hybrid PI and fuzzy logic control for energy optimization in train operations / H.-H. Cho [et al.] // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 59366–59376.

16 Event-triggered robust fuzzy control of high-speed trains under virtual coupling operational scenarios / M. Zhu [et al.] // IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2026. – Vol. 7. – P. 875–890.

17 On train dynamics modeling based on parameter fuzzy identification method / R. Li [et al.] // International Journal of Fuzzy Systems. – 2026. – Vol. 28. – P. 1030–1041.

18 **Wang, X.** Stability-enhanced model predictive control for urban rail transit train / X. Wang, K. Xing, J. Wang // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 52302–52314.

19 Построение баз знаний нечетких регуляторов: превосходство интеллектуальных технологий на основе мягких вычислений для моделирования управления неустойчивыми динамическими системами / П. В. Зрелов, Д. П. Зрелова, О. Ю. Тятюшкина, С. В. Ульянов // Нечеткие системы и мягкие вычисления. – 2024. – Т. 19, № 1. – С. 5–46. – DOI 10.26456/fssc92.

20 Моделирование нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока на основе векторно-матричного описания / С. П. Черный, А. В. Бузикаева, А. И. Годяев, Ю. А. Давыдов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2023. – № 3 (67). – С. 35–41. – DOI 10.17084/20764359-2023-67-35.

21 Метод синтеза нелинейных квазиоптимальных законов управления многомерными системами на основе условия максимума функции обобщенной мощности и анализа пучка квадратичных форм / В. О. Зехцер, А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко, А. А. Агапов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2023. – № 4 (220). – С. 34–42. – DOI 10.18522/1026-2237-2023-4-34-42.

13 **Kostoglotov, A. A.** Synthesis method of quasi-optimal underactuated systems based on the reduction of Lagrange problem / A. A. Kostoglotov, V. O. Zekhtser // Information and Control Systems. – 2024. – No. 4 (131). – P. 40–49. – DOI 10.31799/1684-8853-2024-4-40-49.

14 **Kostoglotov, A. A.** Quasi-optimal control law for Lagrangian underactuated systems / A. A. Kostoglotov // Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences Series. – 2024. – No. 3 (223). – P. 4–14. – DOI 10.18522/1026-2237-2024-3-4-14.

15 Hybrid PI and fuzzy logic control for energy optimization in train operations / H.-H. Cho [et al.] // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 59366–59376.

16 Event-triggered robust fuzzy control of high-speed trains under virtual coupling operational scenarios / M. Zhu [et al.] // IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2026. – Vol. 7. – P. 875–890.

17 On train dynamics modeling based on parameter fuzzy identification method / R. Li [et al.] // International Journal of Fuzzy Systems. – 2026. – Vol. 28. – P. 1030–1041.

18 **Wang, X.** Stability-enhanced model predictive control for urban rail transit train / X. Wang, K. Xing, J. Wang // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 52302–52314.

19 Building knowledge bases of fuzzy controllers: the superiority of intelligent technologies based on soft computing for modeling control of unstable dynamic systems / P. V. Zrelov, D. P. Zrelova, O. Yu. Tyatyushkina, S. V. Ulyanov // Fuzzy Systems and Soft Computing. – 2024. – Vol. 19, No. 1. – P. 5–46. – DOI 10.26456/fssc92.

20 Modeling of a fuzzy control system for a DC electric drive based on vector-matrix description / S. P. Cherny, A. V. Buzikaeva, A. I. Godyaev, Yu. A. Davydov // Scientific Notes of Komskomsk-on-Amur State Technical University. – 2023. – No. 3 (67). – P. 35–41. – DOI 10.17084/20764359-2023-67-35.

21 Synthesis method of nonlinear quasi-optimal control laws for multidimensional systems based on the maximum condition of the generalized power function and the analysis of a beam of quadratic forms / V. O. Zekhtser, A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko, A. A. Agapov // Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences Series. – 2023. – No. 4 (220). – P. 34–42. – DOI 10.18522/1026-2237-2023-4-34-42.

22 **Притыкин, Д. Е.** Метод обратных задач динамики для синтеза регулятора скорости магистрального электровоза / Д. Е. Притыкин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 5. – С. 48–54. – ISSN 0136-3360.

23 **Гребенюк, П. Т.** Тяговые расчеты : справочник / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцова ; под редакцией П. Т. Гребенюка. – Москва : Транспорт, 1987. – 272 с.

24 Моделирование развитой нечёткой системы управления многосвязным объектом в условиях многокритериальности / С. П. Черный [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2023. – № 3 (67). – С. 62–69. – DOI 10.17084/20764359-2023-67-62.

22 **Pritykin, D. E.** Method of inverse dynamics problems for synthesis of a speed controller for a mainline electric locomotive / D. E. Pritykin // Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics. – 2012. – No. 5. – P. 48–54. – ISSN 0136-3360.

23 **Grebenyuk, P. T.** Traction calculations : handbook / P. T. Grebenyuk, A. N. Dolganov, A. I. Skvortsova ; edited by P. T. Grebenyuk. – Moscow : Transport, 1987. – 272 p.

24 Modeling of an advanced fuzzy control system for a multivariable object under multicriteria conditions / S. P. Cherny [et al.] // Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. – 2023. – No. 3 (67). – P. 62–69. – DOI 10.17084/20764359-2023-67-62.

V. O. Zekhtser, A. A. Kostoglotov, X. Wu, B. Li

SYNTHESIS OF A QUASI-OPTIMAL FUZZY CONTROLLER MODEL UNDER A PRIORI UNCERTAINTY IN INTELLIGENT TRANSPORT UNDERACTUATED SYSTEMS

Abstract. The research paper presents the synthesis of a fuzzy quasi-optimal controller model and an analysis of its effectiveness compared to a known train speed controller for short-term deviations from the specified operating mode. The task of controlling an underactuated system is of particular importance for railway transport, especially for high-speed transportation. Mechanical systems as control objects are essentially nonlinear dynamical systems of high order. In addition, the complexity of optimizing the operating modes of such systems is due to the fact that even detailed modeling does not accurately predict the cumulative effect of all dynamic factors acting on a dynamic system under operating conditions. Traditionally used in practice linear control laws with constant coefficients are designed to stabilize only one specific mode of motion, which makes them ineffective in conditions of control deficit and a priori uncertainty. Using the reduction of the Lagrange optimization problem to the isoperimetric one makes it possible to obtain a quasi-optimal solution to the structural synthesis problem, which increases control efficiency compared to known methods. The use of the fuzzy logic apparatus allows for parametric synthesis of control, providing adaptability to a priori uncertain operating conditions.

Keywords: quasi-optimal control law, reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric one, underactuated system, train speed control, fuzzy logic.

For citation: Synthesis of a quasi-optimal fuzzy controller model under a priori uncertainty in intelligent transport underactuated systems / V. O. Zekhtser, A. A. Kostoglotov, X. Wu, B. Li // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 8–20. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_8.

Сведения об авторах

Зехцер Владимир Олегович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Связь на железнодорожном
транспорте»,
документовед,
e-mail: vova-zehcer@yandex.ru

Костоглотов Андрей Александрович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),

Information about the authors

Zekhtser Vladimir Olegovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Communication on Railway Transport”,
Document Specialist,
e-mail: vova-zehcer@yandex.ru

Kostoglotov Andrey Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Communication on Railway Transport”,

кафедра «Связь на железнодорожном транспорте»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: kostoglotov@me.com

У Ся

Пекинский технологический институт,
Школа компьютерных наук и технологий,
доктор психологических наук, профессор,
e-mail: wuxia@bit.edu.cn

Ли Бэньжань

Shandong Big Data Medical Technology Co.,
Ltd,
генеральный директор,
e-mail: libenran@chinesehis.com

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: kostoglotov@me.com

Wu Xia

Beijing Institute of Technology,
School of Computer Science and Technology,
Doctor of Psychological Sciences, Professor,
e-mail: wuxia@bit.edu.cn

Li Benran

Shandong Big Data Medical Technology Co.,
Ltd,
General Director,
e-mail: libenran@chinesehis.com

А. А. Лохматов

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАДАЧА РАЗМЕЩЕНИЯ РЕМОНТНЫХ УЧАСТКОВ
СПЕЦИАЛЬНОГО САМОХОДНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА:
МУЛЬТИПЕРИОДИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА И ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ
ЗАДАЧЕ О ПОТОКЕ МИНИМАЛЬНОЙ СТОИМОСТИ**

Аннотация. Рассматривается задача размещения, специализации и развития сети ремонтных участков специального самоходного подвижного состава как пространственно-распределённого комплекса инфраструктуры железнодорожного транспорта. Обоснована актуальность поставленной задачи. Предложена формальная постановка задачи размещения в мультипериодической форме, отличающаяся одновременным учётом бинарного фильтра допусков, порога рентабельности загрузки производственного участка и явной оси периодов планирования, что позволяет описать сезонную неравномерность ремонтной кампании. Доказана эквивалентность данной задачи (при освобождении от бинарных переменных активации) задаче о потоке минимальной стоимости на расширенной во времени сети, включение переменных активации и порога рентабельности переводит её к задаче о потоке с фиксированной стоимостью объекта. Операционно-тактический уровень (целочисленное линейное программирование) дополнен стратегическим уровнем многокритериального выбора сценария развития сети методами анализа иерархий и упорядочения по близости к идеальному решению с робастной оценкой по диапазону программы путевых работ. Аппарат апробирован в условиях Восточного полигона ОАО «РЖД». Устойчивым результатом является адресный приоритет развития восточной части сети.

Ключевые слова: размещение ремонтных участков, специальный самоходный подвижной состав, задача размещения с ограничением мощности, мультипериодическая постановка, поток минимальной стоимости, расширенная во времени сеть, метод анализа иерархий, метод TOPSIS, Восточный полигон.

Для цитирования: Лохматов, А. А. Многокритериальная задача размещения ремонтных участков специального самоходного подвижного состава: мультипериодическая постановка и эквивалентность задаче о потоке минимальной стоимости / А. А. Лохматов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 21–29. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_21.

Введение

Эффективность системы ремонта на железнодорожном транспорте во многом зависит от рационального размещения ремонтных мощностей, оптимального распределения функций между ремонтными предприятиями и правильной организации логистических цепочек. Неоптимальная конфигурация ремонтной сети приводит к ухудшению показателей работы железнодорожного комплекса в целом, поскольку в таком случае могут возрастать транспортные и эксплуатационные затраты, увеличиваться время простоя ремонтной техники, снижаться уровень технической готовности подвижного состава. В условиях ограниченности финансовых и производственных ресурсов особую значимость приобретает поиск таких вариантов конфигурации ремонтной сети, которые обеспечивают минимизацию совокупных затрат на техническое обслуживание и ремонт при сохранении требуемого уровня надежности и доступности ремонтных услуг. Необходимость адаптации ремонтной инфраструктуры к реальным объемам работ, развитию технологий диагностики и ремонта, а также к территориальным особенностям эксплуатации специального самоходного подвижного состава (СПС) диктует необходимость применения современных методов оптимизации и моделирования. Таким образом, разработка научно обоснованных подходов к определению оптимальной конфигурации ремонтной сети СПС является весьма актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность использования техники, сократить эксплуатационные расходы, повысить доступность ремонтных услуг, сократить сроки восстановления техники после отказов и плановых ремонтов, улучшить использование производственных ресурсов и обеспечить устойчивое функционирование железнодорожной инфраструктуры в целом.

Ремонтная сеть СПС представляет собой совокупность производственных площадок (базовых предприятий и участков служб механизации, а также ремонтных участков сетевого подрядчика), обслуживаемого парка и связывающих их транспортных плеч, являясь, таким образом, пространственно-распределённым комплексом инфраструктуры. Конфигурация ремонтной сети зависит от того, какие площадки задействованы для ремонта, на каких видах ремонта и сериях машин они специализированы, как распределён парк ремонтных площадок и других факторов, и определяет эксплуатационные и экономические показатели системы. Задачей данного исследования является обоснованный выбор этой конфигурации – оптимального размещения и специализации объектов инфраструктуры.

Потребность в строгой постановке задачи обусловлена двумя обстоятельствами: 1) на ранних этапах конфигурация ремонтной сети описывалась содержательно, и результат получался сравнением заранее заданных вариантов, что не приводило к целевому результату; 2) необходимо учитывать, что задача является многокритериальной, при этом критерии – сокращение плеч доставки, минимизация приведённых затрат, снижение потерь перевозочного процесса по сути являются частично конфликтующими целями.

Теория размещения объектов восходит к задаче о медиане графа [1] и развита в классических постановках p -медианной задачи, задачи о покрытии множества и задачи размещения с ограничением мощности [2–6]. Применительно к железнодорожной инфраструктуре известны постановки задачи о размещении депо технического обслуживания в городских сетях [7] и задачи выбора места обслуживания подвижного состава [8]. Аппарат сетевых потоков, в том числе задача о потоке минимальной стоимости, начал свое развитие с работ Л. Р. Форда и Д. Р. Фалкерсона [9]. Многокритериальный выбор опирается на метод анализа иерархий [10] и метод упорядочения по близости к идеальному решению [11].

Научная новизна настоящей работы состоит в формальной постановке задачи о размещении именно для ремонтной сети СПС, отличающейся от известных постановок тремя элементами в их совокупности:

- 1) бинарным фильтром допусков, отражающим аттестацию площадки на серию и вид ремонта;
- 2) порогом рентабельности загрузки производственного участка;
- 3) явной осью периодов планирования, описывающей сезонную неравномерность ремонтной кампании.

В данной работе показана эквивалентность постановки задачи о потоке минимальной стоимости на расширенной во времени сети, и установлена связка операционного уровня со стратегическим уровнем многокритериального выбора. Объектом исследования является ремонтная сеть СПС.

1 Формальная постановка задачи размещения

Множества, используемые в модели

В нашей постановке задачи будут использованы следующие обозначения множеств.

Пусть I – множество точек спроса; точка спроса – это группа транспортов СПС, однородная по пункту дислокации, виду требуемого ремонта (ТР-1, ТР-2, КР) * и транспортной скорости класса машины.

Далее обозначим:

J – множество площадок-кандидатов с известными координатами станции базирования;

$T = \{1, 2, \dots, M\}$ – множество периодов планирования (в базовом расчёте $M = 12$ месяцев годового горизонта);

$J_i \subseteq J$ – подмножество площадок, допущенных к обслуживанию группы i (ограничение допусков);

$T_i \subseteq T$ – допустимое временное окно обслуживания заявки i (в базовой настройке – единственный период возникновения заявки по графику планово-предупредительного ремонта. При включении сглаживания сезонной загрузки окно расширяется на допустимое опережение и запаздывание норматива.

Параметры модели

Определим основные параметры модели следующим образом:

n_i – число транспортов (заявок) в группе i ;

* ТР-1, ТР-2 и КР – регламентированные планово-предупредительные виды технического обслуживания и ремонта самоходного железнодорожного подвижного состава. ТР-1 – текущий ремонт первого объема, выполняется в депо приписки техники; ТР-2 – текущий ремонт второго объема, проводится в специализированных депо; КР – капитальный ремонт, выполняется на специализированных заводах.

d_i – длительность одного ремонта группы i в позиция-днях (для каждого из видов ремонта приняты значения порядка: 18 дней – для ТР-1, 30 дней – для ТР-2, 42 дня – для КР);

c_{ij} – приведённые транспортные потери (измеряемые в руб./год, не зависят от периода) от обслуживания одного транспорта группы i на площадке j ;

F – годовые условно-постоянные затраты на содержание одного активного ремонтного участка, руб./год;

Q_j^t – ёмкость площадки j в периоде t , позиция – дни (пропорциональна календарной длине периода и числу ремонтных позиций);

$\rho \in [0,1]$ – порог рентабельности, доля годовой ёмкости.

Транспортные потери рассчитываются через технологические соотношения. Число снятых ниток грузового движения на одно плечо L_{ij} (L_{ij} – длина плеча перевозки):

$$N_{ij} = 1 + \max \left(0, \frac{L_{ij} (1/v_{tr} - 1/v_{gr})}{\tau} \right), \quad (1)$$

где v_{tr} , v_{gr} – транспортная скорость пересылаемой машины и ходовая скорость грузового поезда соответственно, τ – межпоездной интервал графика. Формула (1) отражает дополнительное занятие пропускной способности инфраструктуры при следовании транспортируемой машины со скоростью, отличной от скорости грузопотока.

Приведённые транспортные потери определяются формулой:

$$c_{ij} = \left(\frac{2L_{ij}}{v_{per}} \right) s_{prst} + N_{ij} s_{nit}, \quad (2)$$

где первое слагаемое – стоимость простоя машины в процессе пересылки (в прямом и обратном направлениях) при скорости пересылки v_{per} и стоимости машино-суток простоя s_{prst} ; второе слагаемое отражает стоимость потерь перевозочного процесса, связанные со снятием ниток движения поездов при стоимости снятия одной нитки s_{nit} . Целевая функция наследует причинно-следственную цепочку технологии: размещение → плечо → простой и нитки → затраты.

Переменные величины

Поскольку мы используем бинарную фильтрацию допусков площадок, введем следующее обозначение: $y_j \in \{0,1\}$ – булева переменная активации, принимающая значение 1, если площадка j задействована как активный ремонтный участок на протяжении всего планового горизонта, и 0 – в противном случае.

Обозначим также переменную $x_{ij}^t \in [0,1]$, которая является непрерывной величиной и отражает долю спроса группы i , обслуженной на площадке j в периоде t .

Или в более строгой математической нотации можем записать:

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{если площадка } j \text{ открыта и используется, как ремонтный участок,} \\ 0 & \text{– иначе.} \end{cases}$$

$x_{ij}^t \in [0,1]$, $\forall i \in I, j \in J, t \in T$, где x_{ij}^t определяет долю потребности группы i , закрепленную за площадкой j в период t .

Целевая функция и ограничения задачи

Задача размещения ремонтных мощностей в мультипериодической постановке является задачей смешанного целочисленного линейного программирования поиска минимума функции:

$$\min_{x,y} Z = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} n_i c_{ij} x_{ij}^t + F \sum_{j \in J} y_j, \quad (3)$$

где первое слагаемое целевой функции описывает совокупные транспортные потери, а второе – фиксированные затраты на содержание ремонтных площадок, при следующих ограничениях, обозначенных формулами (4)–(8).

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} x_{ij}^t = 1, \quad \forall i \in I. \quad (4)$$

Выполнение ограничения (4) обеспечивает полное распределение спроса каждой группы техники между допустимыми площадками и периодами обслуживания.

Ограничение объема работ на площадке с ее доступной производственной мощностью в каждом периоде определяется соотношением:

$$\sum_{i \in I} n_i d_i x_{ij}^t \leq Q_j^t y_j, \quad \forall j \in J, t \in T. \quad (5)$$

Минимальный уровень загрузки активированной площадки должен отвечать условию:

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} n_i d_i x_{ij}^t \geq \rho \left(\sum_{t \in T} Q_j^t \right) y_j, \quad \forall j \in J. \quad (6)$$

Исключение назначения работ на недопустимые площадки или в недопустимые периоды определяется ограничением:

$$x_{ij}^t = 0, \quad \forall i \in I, j \notin J_i, \text{ или } t \notin T_i. \quad (7)$$

Также следует учитывать естественные ограничения, следующие из постановки задачи:

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J; \quad x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T. \quad (8)$$

Целевая функция (3) суммирует приведённые транспортные потери по всем обслуживаемым заявкам и периодам и условно-постоянные годовые затраты на содержание задействованных площадок, согласуя технологический критерий (через c_{ij}) и экономический (через F). Ограничение (4) требует полного обслуживания каждой заявки в пределах её окна T_i . Ограничение (5) определяет ёмкость работ в каждом периоде. Ограничение (6) означает порог рентабельности, заданный суммарно по горизонту планирования (участок может быть мало загружен летом и насыщен в зимний период; рентабельность естественно оценивать на годовом горизонте). Условие (7) реализует фильтры допусков и допустимых периодов. При вырождении горизонта к единственному периоду ($|T|=1$) постановка задачи переходит в классическую стационарную задачу размещения с ограничением мощности – одно-периодное приближение.

2 Эквивалентность задаче о потоке минимальной стоимости на расширенной во времени сети

Если временно исключить из выражений (3) и (8) бинарные переменные активации y_j и ограничение рентабельности (6), оставшаяся постановка переписывается как задача о потоке минимальной стоимости на сети, развёрнутой по оси времени. Класс таких задач и алгоритмы их решения заложены Л. Р. Фордом и Д. Р. Фалкерсоном в работе [9].

Для разработки сетевой модели построим ориентированный граф (рис. 1). Каждому требованию группы техники $i \in I$, подлежащему обслуживанию в периоде $t \in T_i$, соответствует узел (i, t) , каждой ремонтной площадке $j \in J$ в периоде $t \in T$ – узел (j, t) . Кроме того, вводятся служебные вершины: источник S и сток σ . Дуга $(i, t) \rightarrow (j, t)$, отражающая возможность обслуживания группы i на площадке j проводится только для допустимой пары $(j \in J_i, t \in T_i)$. Стоимость единицы потока на данной дуге принимается равной $n_i c_{ij}$, а ее пропускная способность определяется величиной ремонтной трудоемкости $n_i d_i$. Для ограничения производственной мощности каждой площадки вводятся дуги $(i, t) \rightarrow \sigma$, имеющие пропускную способность (ёмкость) Q_j^t . Дуги из источника S проводятся к узлам

спроса (i, t) . Переменная назначения x_{ij}^t играет роль потока по дуге обслуживания $(i, t) \rightarrow (j, t)$, а минимум суммарной стоимости потока совпадает с целевой функцией (3) при $F = 0$.

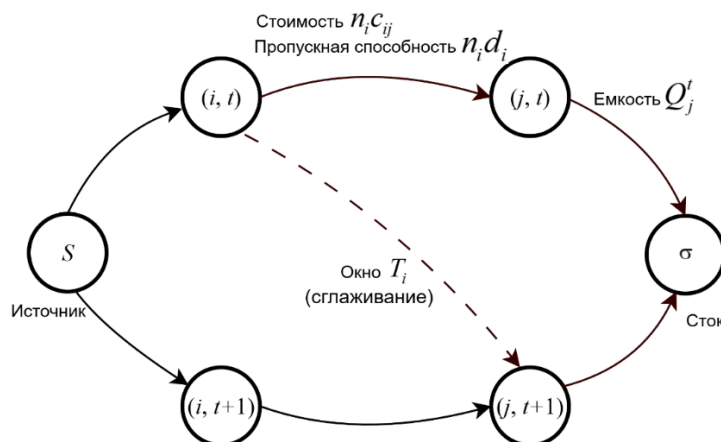


Рис. 1. Фрагмент расширенной во времени сети для задачи о потоке минимальной стоимости:

узлы требований (i, t) и площадок (j, t) , источник S и сток σ ;

пунктир – дуга обслуживания в смежном периоде при включённом сглаживании

Возврат переменных y_j и условия (6) превращает нашу задачу в задачу о потоке с фиксированной стоимостью открытия объекта: топология сети не меняется, а факт активации площадки моделируется отдельной «открывающей» дугой. Такое прочтение полезно по двум причинам. Сначала – расширение окна T_i при включённом сглаживании автоматически делает выбор периода обслуживания частью того же потокового решения. Затем оно прокладывает «мост» к динамическим задачам: цепочкам ремонтов одной машины за срок службы, её перемещениям между площадками, увязке с нитками графика. Это направление вынесено за рамки данной статьи и планируется в дальнейших исследованиях.

3 Стратегический уровень: метод анализа иерархий, TOPSIS и робастная оценка

Задача (3)–(8) оптимизирует размещение при заданном сценарии развития сети. Сам сценарий – целевой уровень сокращения плеч и режим сглаживания сезонной загрузки – выбирается на стратегическом уровне многокритериально по трём минимизируемым критериям: *технология* – K_1 – среднее плечо доставки в ремонт, км; *экономика* – K_2 – приведённые годовые затраты, руб./год; *перевозочный процесс* – K_3 – число снятых ниток грузового движения, нитки/год.

Веса критериев вычисляются методом анализа иерархий [10] на основе матрицы парных сравнений $A = (a_{kl})$, $k, l = 1, \dots, n$, где a_{kl} характеризует относительную важность критерия k по сравнению с критерием l . Компоненты вектора весов вычисляются как нормированные средние геометрические элементов строк матрицы:

$$w_k = \frac{\left(\prod_{l=1}^n a_{kl} \right)^{1/n}}{\sum_{p=1}^n \left(\prod_{l=1}^n a_{pl} \right)^{1/n}}, \quad k = 1, \dots, n, \quad \sum_{k=1}^n w_k = 1, \quad w_k \geq 0. \quad (9)$$

Согласованность экспертных оценок проверяется по отношению согласованности $CR = \frac{CI}{RI}$, где

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad \lambda_{\max} - \text{максимальное собственное значение матрицы парных сравнений, } RI - \text{случайный индекс согласованности. Матрица считается согласованной при выполнении условия } CR < 0,1.$$

Ранжирование сценариев выполняется методом TOPSIS [10] по коэффициенту близости к идеальной точке. Этот метод основан на концепции, согласно которой выбранная альтернатива должна иметь кратчайшее геометрическое расстояние от положительного идеального решения, обозначим его D^+ , и наибольшее геометрическое расстояние от отрицательного идеального решения – D^- . Коэффициент относительной близости сценария s к идеальному решению определяется выражением:

$$C^*(s) = \frac{D^-(s)}{D^+(s) + D^-(s)}, \quad C^*(s) \in [0, 1], \quad (10)$$

где $D^+(s)$, $D^-(s)$ – евклидовы расстояния взвешенного нормированного вектора критериев сценария до идеальной и антиидеальной точек; оптимальным признаётся сценарий с максимальным $C^*(s)$.

Экономический критерий K_2 характеризует приведённые годовые затраты и определяется как годовой эквивалент совокупной стоимости жизненного цикла ремонтной сети:

$$K_2 = C_{rem} + C_{tr} + C_{nedozagr} + AK, \quad (11)$$

где C_{rem} , C_{tr} , $C_{nedozagr}$ – годовые затраты, соответственно, на выполнение годового ремонта, транспортные потери и на непроизводительную недозагрузку ремонтного персонала; K – капитальные вложения в развитие и модернизацию ремонтной сети; A – коэффициент приведения капитальных затрат к годовому эквиваленту (аннуитетный коэффициент), который определяется выражением:

$$A = \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1}, \quad (12)$$

где r – ставка дисконтирования (*discount rate*); T – расчетный горизонт планирования.

Для обеспечения робастности стратегического выбора к неопределённости программы путевых работ выполняется анализ сценариев по множеству коэффициентов масштабирования:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\},$$

характеризующих возможные уровни изменения производственной программы.

Для каждого сценария s значение критерия F определяется как среднее по всем элементам множества P :

$$\bar{F}(s) = \frac{1}{|P|} \sum_{p \in P} F(s, p), \quad (13)$$

где $F(s, p)$ – значение рассматриваемого критерия для сценария s при коэффициенте масштабирования p , а $|P|$ – число рассматриваемых вариантов изменения производственной программы.

Сравнение сценариев ведётся по робастным оценкам $\bar{F}(s)$, что делает стратегический выбор независимым от точечного прогноза программы. На рис. 2 приведена диаграмма ранжирования восьми управляемых состояний сети по коэффициенту близости к идеальному решению C^* с применением метода TOPSIS. Апробация проводилась в условиях Восточного полигона. Выделены два лидирующих состояния.

4 Апробация на Восточном полигоне

Уточним, что в масштабе всего проекта исследование еще находится в стадии разработки. Приведем пояснения и уточнения для представленных в данной статье результатов. Математический аппарат (формулы (3)–(13)) реализован в виде специализированного программного комплекса. Программная реализация была выполнена на языке программирования Python с использованием открытого программного обеспечения. Для решения задачи смешанного целочисленного линейного программирования применён свободно распространяемый решатель Coin-or Branch and Cut, подключённый через

библиотеку PuLP (модули расчётного ядра и многокритериального выбора). Разработанный на основе нашей математической модели программный комплекс был апробирован и применён к условиям Восточного полигона со следующими параметрами: около восьмидесяти площадок-кандидатов, несколько сотен групп заявок, горизонт – двенадцать месяцев. Числовые результаты – средневзвешенное плечо доставки, число снятых ниток, приведённые годовые затраты по восьми сценариям развития сети – приводятся диапазонами с анализом чувствительности; рекомендуемое число активных ремонтных участков оценивается диапазоном. Устойчивым (не зависящим от значений допущений) результатом является адресный приоритет развития восточной части полигона. Валидация расчётного ядра выполнена ретроспективным прогнозом на истории ремонтов 2021–2025 гг. с расхождением около 2 %.

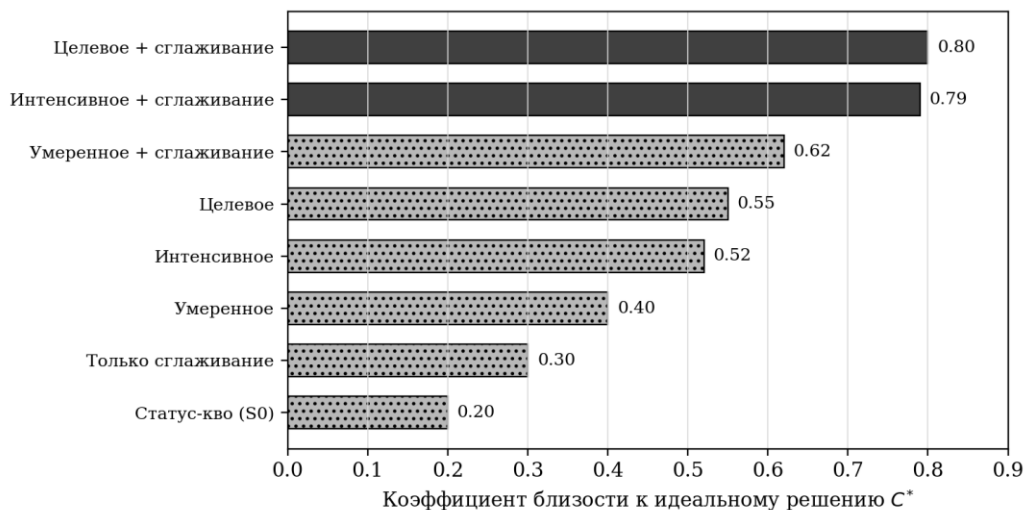


Рис. 2. Ранжирование управляемых состояний сети по коэффициенту близости к идеальному решению

Заключение

Предложенная постановка соединяет операционно-тактический уровень (строгое решение задачи целочисленного программирования для размещения под заданный сценарий) и стратегический уровень (многокритериальный робастный выбор сценария), что отличает её от одноуровневых постановок размещения. Три отличительных элемента – фильтр *sapability* (способность), порог рентабельности и явная ось периодов – введены не как абстрактные обобщения, а как формализация конкретных свойств ремонта СПС: аттестации участков, минимальной рентабельной загрузки и сезонности ремонтной кампании. Эквивалентность задаче о потоке минимальной стоимости на расширенной во времени сети обеспечивает связь с классическим аппаратом сетевых потоков и открывает направление перехода к динамическим задачам управления ремонтным производством. Ограничения постановки – экзогенность программы путевых работ (учитываемая диапазонным прогнозом) и зависимость числовых результатов от значений ёмкости, окон и порога – определяют программу дальнейшей валидации параметров и продолжения исследования.

Список литературы

- 1 **Hakimi, S. L.** Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph-theoretic problems / S. L. Hakimi // Operations Research. – 1965. – Vol. 13, No. 3. – P. 462–475.
- 2 **Daskin, M. S.** Network and discrete location : models, algorithms and applications / M. S. Daskin. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2013. – 494 p.
- 3 Discrete location theory / ed. by P. B. Mirchandani, R. L. Francis. – New York : Wiley, 1990. – 555 p.

References

- 1 **Hakimi, S. L.** Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph-theoretic problems / S. L. Hakimi // Operations Research. – 1965. – Vol. 13, No. 3. – P. 462–475.
- 2 **Daskin, M. S.** Network and discrete location : models, algorithms and applications / M. S. Daskin. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2013. – 494 p.
- 3 Discrete location theory / ed. by P. B. Mirchandani, R. L. Francis. – New York : Wiley, 1990. – 555 p.

4 Location Science / ed. by G. Laporte, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama. – 2nd ed. – Cham : Springer, 2019. – 767 p.

5 **Church, R. L.** Theoretical and computational links between the p-median, location set-covering, and the maximal covering location problem / R. L. Church, C. S. ReVelle // *Geographical Analysis*. – 1976. – Vol. 8, No. 4. – P. 406–415.

6 **ReVelle, C. S.** Location analysis : a synthesis and survey / C. S. ReVelle, H. A. Eiselt // *European Journal of Operational Research*. – 2005. – Vol. 165, No. 1. – P. 1–19.

7 Optimum location analysis for an infrastructure maintenance depot in urban railway networks / Eu Wang Kim, Seok Kim // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2021. – DOI 10.1007/s12205-021-1496-5.

8 **Tönissen, D. D.** The maintenance location choice problem for railway rolling stock : Preprint / D. D.-Tönissen, J. J. Arts. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2012.04565> (date of access: 25.05.2026).

9 **Ford, L. R.** Flows in Networks / L. R. Ford, D. R. Fulkerson. – Princeton : Princeton University Press, 1962. – 194 p.

10 **Саати, Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. П. Г. Вачнадзе. – Москва : Радио и связь, 1993. – 278 с.

11 **Hwang, C. L.** Multiple attribute decision making : methods and applications. A state-of-the-art survey / C.-L. Hwang, K. Yoon // *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. – Vol. 186. – Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 1981.

12 **Melo, M. T.** Facility location and supply chain management : a review / M. T. Melo, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama // *European Journal of Operational Research*. – 2009. – Vol. 196, No. 2. – P. 401–412.

13 Единые правила технической эксплуатации и ремонта специального самоходного подвижного состава : распоряжение ОАО «РЖД» от 27.12.2024 № 3341/р. – Москва, 2024. – 312 с.

14 Положение о системе планово-предупредительного ремонта специального подвижного состава : распоряжение ОАО «РЖД» от 14.03.2014 № 659/р (с изменениями от 13.03.2026). – Москва, 2014. – URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-19122016-n-2585r-ob-utverzhenii/> (дата обращения 12.06.2026).

4 Location Science / ed. by G. Laporte, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama. – 2nd ed. – Cham : Springer, 2019. – 767 p.

5 **Church, R. L.** Theoretical and computational links between the p-median, location set-covering, and the maximal covering location problem / R. L. Church, C. S. ReVelle // *Geographical Analysis*. – 1976. – Vol. 8, No. 4. – P. 406–415.

6 **ReVelle, C. S.** Location analysis : a synthesis and survey / C. S. ReVelle, H. A. Eiselt // *European Journal of Operational Research*. – 2005. – Vol. 165, No. 1. – P. 1–19.

7 Optimum location analysis for an infrastructure maintenance depot in urban railway networks / Eu Wang Kim, Seok Kim // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2021. – DOI 10.1007/s12205-021-1496-5.

8 **Tönissen, D. D.** The maintenance location choice problem for railway rolling stock : Preprint / D. D.-Tönissen, J. J. Arts. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2012.04565> (date of access: 05/25/2026).

9 **Ford, L. R.** Flows in Networks / L. R. Ford, D. R. Fulkerson. – Princeton : Princeton University Press, 1962. – 194 p.

10 **Saaty, T.** Decision making. The Analytic hierarchy process / T. Saaty ; translated from English by R. G. Vachnadze. – Moscow : Radio i Svyaz, 1993. – 278 p.

11 **Hwang, C. L.** Multiple attribute decision making : methods and applications. A state-of-the-art survey / C.-L. Hwang, K. Yoon // *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. – Vol. 186. – Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 1981.

12 **Melo, M. T.** Facility location and supply chain management : a review / M. T. Melo, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama // *European Journal of Operational Research*. – 2009. – Vol. 196, No. 2. – P. 401–412.

13 Uniform rules for the technical operation and repair of special self-propelled rolling stock : Order of JSC Russian Railways dated 12/27/2024 No. 3341/r. – Moscow, 2024. – 312 p.

14 Regulations on the system of scheduled preventive maintenance of special rolling stock : Order of JSC Russian Railways dated 03/14/2014 No. 659/r (as amended on 13.03.2026). – Moscow, 2014. – URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-19122016-n-2585r-ob-utverzhenii/> (date of access: 06/12/2026).

*A. A. Lokhmatov***THE MULTI-CRITERIA TASK OF LOCATING REPAIR SITES FOR SPECIAL SELF-PROPELLED ROLLING STOCK: MULTIPERIODIC FORMULATION AND EQUIVALENCE TO THE MINIMUM COST FLOW PROBLEM**

Abstract. The paper considers the problem of placement, specialization, and development of a network of repair sites for special self-propelled rolling stock as a spatially distributed complex of railway transport infrastructure. The relevance of the task is substantiated. A formal formulation of the placement problem in a multi-period form is proposed, which differs from the previous one by simultaneously considering a binary tolerance filter, the profitability threshold for the production site, and an explicit axis of planning periods, which allows for the description of seasonal unevenness in the repair campaign. The equivalence of the problem (when the binary activation variables are removed) to the minimum cost flow problem on a time-extended network is proven, and the inclusion of activation variables and the breakeven point transforms it into a problem of minimizing the cost of a flow with a fixed cost of an object. The operational and tactical level (integer linear programming) is complemented by the strategic level of multi-criteria selection of a network development scenario using hierarchical analysis and ordering based on proximity to the ideal solution with robust assessment of the range of the track maintenance program. The approach has been tested under the conditions of the Eastern Polygon of JSC Russian Railways. The sustainable result is the targeted priority for the development of the eastern part of the network.

Keywords: repair site placement, special self-propelled rolling stock, capacity-constrained allocation problem, multi-period formulation, minimum cost flow, time-extended network, analytic hierarchy process, TOPSIS method, Eastern Polygon.

For citation: Lokhmatov, A. A. The multi-criteria task of locating repair sites for special self-propelled rolling stock: multiperiodic formulation and equivalence to the minimum cost flow problem / A. A. Lokhmatov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 21–29. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_21.

Сведения об авторах

Лохматов Алексей Анатольевич
Открытое акционерное общество
«Российские железные дороги»
(ОАО «РЖД»),
Центральная дирекция инфраструктуры,
г. Москва,
заместитель главного инженера,
e-mail: lokhmatov@bk.ru

Information about the authors

Lokhmatov Alexey Anatolyevich
Open Joint Stock Company
“Russian Railways” (JSC “RZD”),
Central Directorate of Infrastructure,
Moscow,
Deputy Chief Engineer,
e-mail: lokhmatov@bk.ru

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.331 : 621.311 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_30

*В. А. Осипов***К ВОПРОСУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЯГОВОЙ СЕТИ С ЭКРАНИРУЮЩИМ И УСИЛИВАЮЩИМ ПРОВОДАМИ ***

Аннотация. Исследованы закономерности изменения эквивалентного сопротивления при параллельном подключении дополнительных проводников к активно-индуктивным цепям. На основе аналитических зависимостей рассмотрены случаи подключения активного сопротивления, активно-индуктивного элемента без взаимоиндуктивной связи и проводников, связанных взаимной индукцией. Выполненные расчеты показали существование области параметров, в которой подключение дополнительного проводника приводит не к снижению, а к увеличению активной составляющей эквивалентного сопротивления. Установлены граничные условия возникновения данного эффекта, показано его влияние на распределение токов в системе. Полученные результаты распространены на тяговую сеть с экранирующим проводом. Доказано, что применение экранирующего проводника не всегда обеспечивает снижение активных потерь мощности. При определенных соотношениях параметров рельсовой цепи и экранирующего провода возможно увеличение активного сопротивления эквивалентной цепи обратного тока, несмотря на уменьшение полного сопротивления сети. Сделан вывод о необходимости индивидуальной оценки эффективности применения экранирующих проводов для каждого конкретного участка железной дороги с учетом параметров тяговой сети и режимов ее работы.

Ключевые слова: тяговая сеть, система с экранирующим проводником, потери энергии в тяговой сети.

Для цитирования: Осипов, В. А. К вопросу энергетической эффективности тяговой сети с экранирующим и усиливающим проводами / В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 30–36. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_30.

Введение

Тяговые сети являются одним из основных элементов системы электроснабжения электрифицированных железных дорог однофазного переменного тока. Энергетическая эффективность каждого отдельного типа тяговой сети определяется величиной потерь при передаче электрической энергии от тяговых подстанций к электроподвижному составу с показателем минимального уровня напряжения на токоприемнике электровоза. В условиях роста грузонапряженности железнодорожных линий и прогнозируемого увеличения массы поездов задача повышения пропускной способности участков становится все более актуальной. Одним из основных факторов, ограничивающих возможности существующих систем тягового электроснабжения, является такой показатель, как удельное сопротивление тяговой сети.

Тяговая сеть железной дороги представляет собой частный случай двухпроводной линии электропередачи, конструкция которой в значительной степени отличается от обычных линий, предназначенных для передачи электроэнергии от источника к потребителю. Особенность тяговой сети заключается в том, что ток нагрузки протекает по разнесенным в пространстве проводникам прямого и обратного тока. В качестве проводника прямого тока выступает контактная подвеска, а в качестве проводника обратного тока – рельсовый путь и земля. Значительное расстояние между контактными проводами и рельсами ведет к увеличению магнитного потока рассеяния и, как следствие, к росту индуктивности тяговой сети. В результате увеличивается удельное сопротивление линии, ограничивающее максимальную нагрузочную способность участка.

* Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта

Основная часть

Для уменьшения реактивного сопротивления тяговой сети в различные периоды развития железнодорожной энергетики были предложены и внедрены технические решения, основанные на использовании в системе тягового электроснабжения дополнительных проводников. Наибольшее распространение получили системы с усиливающим проводом, системы с экранирующим проводом и системы с экранирующим и усиливающим проводом. Наибольший эффект достигается при совместном использовании усиливающего и экранирующего проводов. В системе с ЭУП усиливающий провод принимает на себя часть прямого тока, а экранирующий провод – часть обратного тока. В результате расстояние между эквивалентными проводниками прямого и обратного тока существенно уменьшается. С точки зрения теории электромагнитного поля такая система приближается к двухпроводной линии передачи энергии с относительно малым расстоянием между проводниками. Одним из вариантов создания электрически скомпенсированной сети является сеть с экранирующим проводом, в этом случае усиливающий провод не используется. При этом также достигается снижение реактивного сопротивления, что приводит к повышению напряжения на токоприемниках электропоездов и улучшению условий работы ЭПС.

Для дальнейшей оценки эффективности введения в систему дополнительных проводников перейдем вначале к простейшему случаю параллельного подключения – к сосредоточенному активно-индуктивному сопротивлению проводника с чисто активным сопротивлением. Очевидно, что при этом эквивалентное сопротивление такой цепочки ожидаемо снизится. Исследуем, как будет происходить изменение величины активной составляющей эквивалентного сопротивления при изменении сопротивления подключаемого проводника. Для расчета используем соотношение

$$R = \operatorname{Re} \left[\frac{(R_1 + jX_1) \cdot R_2}{R_1 + jX_1 + R_2} \right] = \frac{R_1^2 R_2 + R_1 R_2^2 + R_2 X_1^2}{(R_1 + R_2)^2 + X_1^2}. \quad (1)$$

Для анализа динамики изменения активной составляющей эквивалентного сопротивления, рассчитанного по выражению (1), примем следующие исходные данные: $R_1 = 0,15$ (Ом), $X_1 = 0,5$ (Ом). Сопротивление R_2 примем изменяющимся в широких пределах от 0 до 100 (Ом).

Как видно из представленной зависимости, с ростом сопротивления R_2 увеличивается и эквивалентное активное сопротивление. Следует отметить, что при достижении некоторого значения, эквивалентное активное сопротивление становится больше сопротивления R_1 и, достигая максимума в некоторой точке, начинает снижаться, асимптотически приближаясь к значению R_1 (рис. 1).

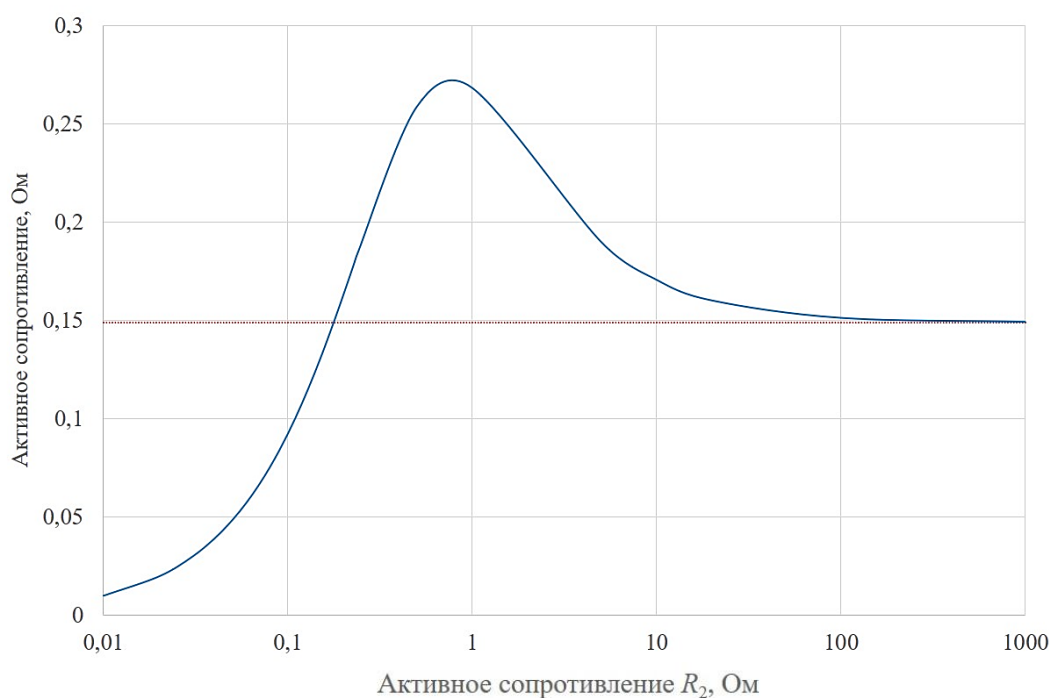


Рис. 1. Диаграмма зависимости активного сопротивления цепочки от параметров параллельных ветвей

Для определения граничного значения сопротивления R_2 , после которого дальнейшее увеличение приведет к росту активной компоненты эквивалентного сопротивления, приравняем левую часть уравнения (1) и R_2 , затем, решив полученное уравнение, получим

$$R_2 = \frac{R_1^3 + X_1^2 R_1}{X_1^2 - R_1^2}. \quad (2)$$

Используя выражение (2), несложно получить, что предельное значение $R_2 = 0,671$ (Ом), при котором еще не наступает рост активной составляющей эквивалентного сопротивления. Другая особенность полученного выражения – это его область допустимых значений. Очевидно, что при условии равенства активной и реактивной составляющей первого сопротивления величина R_2 обращается в бесконечность, а в случае дальнейшего роста активной составляющей описанный эффект пропадает. Таким образом, условием возникновения описанного явления является условие $R_1 < X_1$, что выполняется практически для всех воздушных линий, в том числе для тяговой сети без дополнительных проводников.

Исследуем, сохранится ли данный эффект в случае подключения к активно-индуктивному сопротивлению другого активно-индуктивного элемента, при этом магнитные потоки этих сопротивлений не пересекаются, явления взаимоиндукции нет.

$$R = \operatorname{Re} \left[\frac{(R_1 + jX_1) \cdot (R_2 + jX_2)}{R_1 + jX_2 + R_2 + jX_2} \right] = \frac{(R_1 + R_2)(R_1 R_2 - X_1 X_2) + (X_1 + X_2)(X_1 R_2 + R_1 X_2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}. \quad (3)$$

Выполним расчет, аналогичный проворимому ранее, параметры первого сопротивления такие же, как и в первом случае. Полученная зависимость, приведенная на рис. 2, свидетельствует о том, что эффект сохраняется, однако зависит от реактивной составляющей параллельно подключаемого сопротивления.

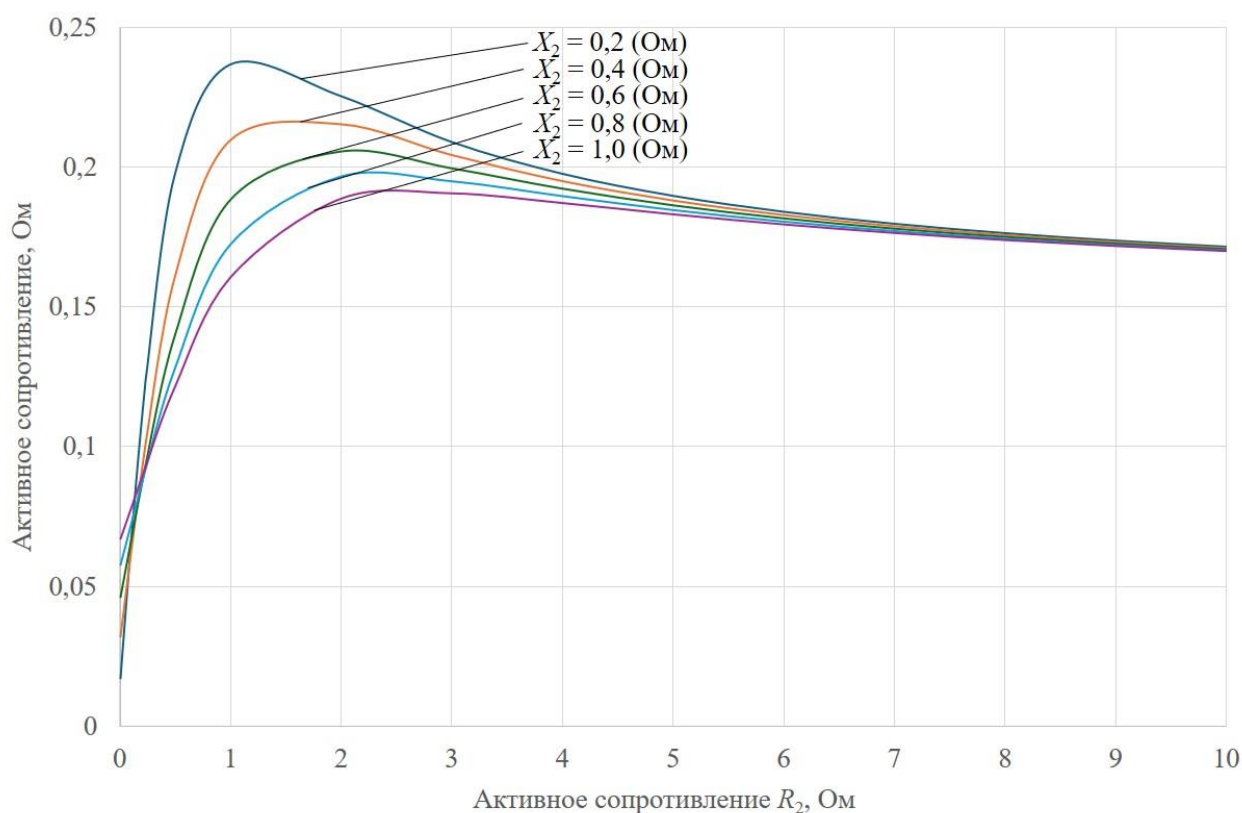


Рис. 2. Зависимость активного сопротивления цепочки от параметров параллельных ветвей при активно-индуктивных элементах

Для определения граничного значения сопротивления R_2 , как и в предыдущем случае, приравняем левую часть уравнения (3) и R_2 , после чего, решив полученное уравнение, получим

$$R_2 = \frac{R_1^3 + X_1^2 R_1 + 2 X_1 X_2 R_1}{X_1^2 - R_1^2}. \quad (4)$$

Таким образом, установлено, что при соединении двух активно-индуктивных сопротивлений, не имеющих взаимной индуктивной связи, активное сопротивление проводника, эквивалентного исходной параллельной схеме, не всегда будет меньше обоих значений активных составляющих проводников.

Перейдем к рассмотрению эквивалентного сопротивления двух проводников, имеющих взаимную индуктивную связь. Эквивалентное сопротивление в таком случае при условии, что токи в этих проводниках направлены в одну сторону, а следовательно, магнитосвязанные цепи включены согласно, будет определяться выражением

$$Z_{\text{экв}} = \frac{Z_1 Z_2 - Z_{12}^2}{Z_1 + Z_2 - 2 \cdot Z_{12}}. \quad (5)$$

Для поиска активной составляющей эквивалентного сопротивления перепишем выражение в виде:

$$Z_{\text{экв}} = \frac{(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2) + X_{12}^2}{R_1 + jX_1 + R_2 + jX_2 - 2 \cdot jX_{12}} = \frac{(R_1 R_2 - X_1 X_2 + X_{12}^2) + j(R_1 X_2 + R_2 X_1)}{(R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2 - 2X_{12})}; \quad (6)$$

$$R = \text{Re}(Z_{\text{экв}}) = \frac{(R_1 + R_2)(R_1 R_2 - X_1 X_2 + X_{12}^2) + (X_1 + X_2 - 2X_{12})(R_1 X_2 + R_2 X_1)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2 - 2X_{12})^2}. \quad (7)$$

Результаты расчета по выражению (7) с использованием ранее указанных данных и принятием дополнительного сопротивления взаимной индукции $X_{12} = 0,29$ (Ом) приведены на рис. 3.

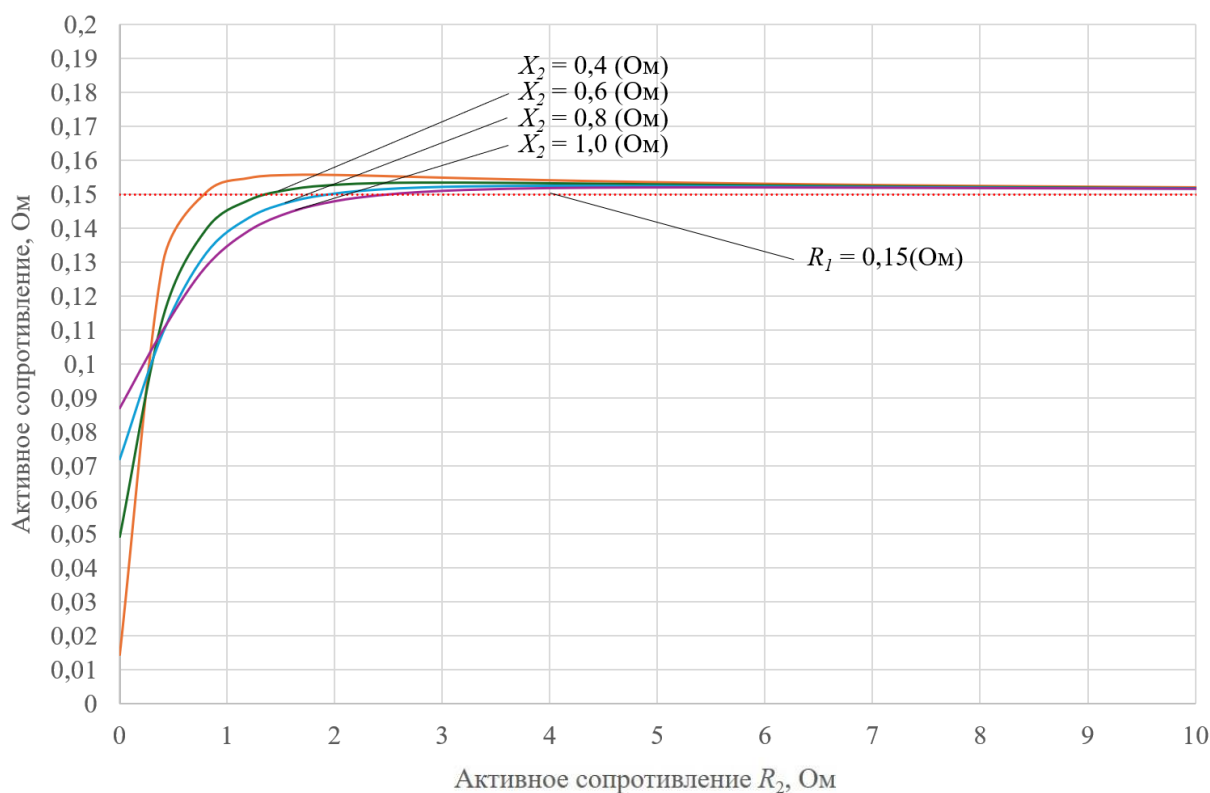


Рис. 3. Зависимость активного сопротивления цепочки от параметров параллельных ветвей при активно-индуктивных элементах и наличии взаимной индуктивной связи

На полученной зависимости отчетливо просматривается участок, на котором также наблюдается рост активной составляющей эквивалентного сопротивления.

Рассмотрим тяговую сеть с экранирующим проводом (рис. 4). Более подробно в объеме работы рассмотрим только цепь обратного тока – рельсовый путь и экранирующий проводник. Собственные сопротивления проводников обозначим как Z_K – для эквивалентного контактного провода, Z_P – для эквивалентного рельса и $Z_Э$ – для экранирующего провода. В расчете будем полагать, что рельсовая цепь и экран соединены параллельно в весьма большом числе мест.

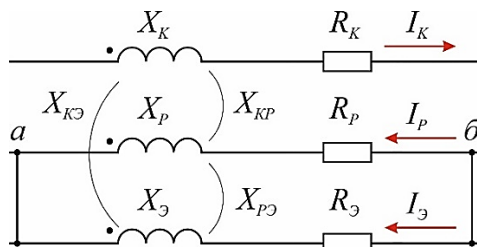


Рис. 4. Участок тяговой сети

Для участка тяговой сети, показанной на рис. 4, справедливы соотношения:

– ток в эквивалентном проводнике

$$\dot{I} = \dot{I}_P \frac{Z_P + Z_Э - 2 \cdot Z_{ЭP}}{Z_Э - Z_{ЭP}} + \dot{I}_K \frac{Z_{KЭ} - Z_{KP}}{Z_Э - Z_{ЭP}}; \quad (8)$$

– ток в рельсе

$$\dot{I}_P = \frac{\dot{I}(Z_Э - Z_{ЭP}) + \dot{I}_K(Z_{KЭ} - Z_{KP})}{Z_P + Z_Э - 2 \cdot Z_{ЭP}}; \quad (9)$$

– ток в экранирующем проводнике

$$\dot{I}_Э = \frac{\dot{I}(Z_P - Z_{ЭP}) + \dot{I}_K(Z_{KЭ} - Z_{KP})}{Z_P + Z_Э - 2 \cdot Z_{ЭP}}. \quad (10)$$

Коэффициент, который стоит при токе в рельсах в выражении (8), в точности повторяет выражение (5), являясь эквивалентным сопротивлением параллельно включенных рельсового пути и экранирующего проводника. Как было показано выше, при превышении некоторого значения сопротивления проводника (в данном случае экранирующего), подключаемого параллельно существующему (рельсовая цепь), вместо ожидаемого снижения активного сопротивления, а следовательно, и активных потерь будет наблюдаться рост активной составляющей при снижении модуля эквивалентного сопротивления. Аналогичный эффект можно показать при использовании усиливающих проводов, следовательно, приводимые рассуждения можно распространить на тяговые сети с экранирующим и усиливающим проводами.

Выводы

В результате проведенного исследования показано, что параллельное подключение активно-индуктивных элементов к рельсовым цепям может дать обратный эффект и вместо ожидаемого снижения потерь привести к возрастанию активного сопротивления со всеми вытекающими из этого результатами. Расчеты, приводимые в работе, выполнялись для значений сопротивлений, соизмеримых

с удельными значениями активных и реактивных значений для существующих марок проводов и тросов. Принимая решение об использовании дополнительных проводников, необходимо с осторожностью подходить к их выбору, проверяя в каждом конкретном случае, какой эффект дает такое решение на конкретном участке железной дороги.

Список литературы

- 1 **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 26.06.2026).
- 2 Техника высоких напряжений / И. М. Богатенков, Ю. Н. Бочаров, Н. И. Гумерова, Г. М. Иманов ; под общей редакцией профессора Г. С. Кучинского. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с. – ISBN 5-283-04757-1.
- 3 **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: 26.06.2026).
- 4 **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.
- 5 **Безуглый, А. В.** Актуальные проблемы повышения энергетической эффективности в современных условиях / А. В. Безуглый, В. Н. Черных // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство». Том 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 16–19. – ISBN 978-5-907295-89-6.
- 6 **Трубицин, М. А.** Продление срока службы электрооборудования / М. А. Трубицин // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство». Том 3. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. – С. 51–54. – ISBN 978-5-907295-68-1.
- 7 **Осипов, В. А.** Определение электрических параметров тяговых сетей, интегрированных с волоконно-оптическими линиями связи / В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1 (101). – С. 28–35. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_28.
- 8 **Патент № 2492074 С1 Российская Федерация, МПК В60М 3/02.** Тяговая сеть электрифицированных железных дорог переменного тока : № 2012106369/11 : заявл. 21.02.2012 : опубл. 10.09.2013 / В. А. Осипов, А. А. Капкаев. – EDN VSILCS.

References

- 1 **Osipova, A. I.** Calculation of short-circuit currents of the DC network when using a two-level system of group grounding system of supports. – Text : electronic / A. I. Osipova, Yu. I. Zharkov // Engineering Journal of Don. – 2023. – No. 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489 (date of access: 06/26/2026).
- 2 High voltage engineering / I. M. Bogatenkov, Yu. N. Bocharov, N. I. Gumerova, G. M. Imanov ; edited by professor G. S. Kuchinsky. – Saint Petersburg : Energoatomizdat. Saint Petersburg Branch, 2003. – 608 p. – ISBN 5-283-04757-1.
- 3 **Mikaelyan, E. Yu.** Modeling of electromagnetic fields of an AC Railway Section. – Text : electronic / E. Yu. Mikaelyan, V. N. Chernykh // Engineering Journal of Don. – 2019. – No. 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (date of access: 06/26/2026).
- 4 **Lysenko, V. G.** Defining the boundaries of a traction network section with a stable short circuit / V. G. Lysenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2020. – No. 1. – P. 145–152. – ISSN 0201-727X.
- 5 **Bezugly, A. V.** Actual problems of increasing energy efficiency in modern conditions / A. V. Bezugly, V. N. Chernykh // Transport : science, education, production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference. Vol. 2. – Rostov-on-Don : RSTU, 2023. – P. 16–19. – ISBN 978-5-907295-89-6.
- 6 **Trubitsin, M. A.** Prolongation of the service life of electrical equipment / M. A. Trubitsin // Transport : science, education, production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference. Vol. 3. – Rostov-on-Don : RSTU, 2022. – P. 51–54. – ISBN 978-5-907295-68-1.
- 7 **Osipov, V. A.** Determination of electrical parameters of traction networks integrated with fiber-optic communication lines / V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1 (101). – P. 28–35. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_28.
- 8 **Patent No. 2492074 C1 Russian Federation, IPC B60M 3/02.** Traction network of electrified railways with alternating current : No. 2012106369/11 : declared. 21.02.2012: publ. 10.09.2013 / V. A. Osipov, A. A. Kapkaev. – EDN VSILCS.

V. A. Osipov

**ON THE ISSUE OF ENERGY EFFICIENCY
OF A TRACTION NETWORK
WITH SHIELDING AND REINFORCING WIRES**

Abstract. The patterns of changes in equivalent resistance during parallel connection of additional conductors to active-inductive circuits are investigated. Based on analytical dependencies, cases of connection of an active resistance, an active-inductive element without an inter-inductive coupling and conductors connected by mutual induction are considered. The calculations performed have shown the existence of a parameter range in which the connection of an additional conductor leads to an increase, rather than a decrease, in the active component of the equivalent resistance. The boundary conditions for the occurrence of this effect are established, and its effect on the current distribution in the system is shown. The results obtained are extended to a traction network with a shielding wire. It is proved that the use of a shielding conductor does not always provide a reduction in active power losses. With certain correlations of the parameters of the track circuit and the shielding wire, it is possible to increase the active resistance of an equivalent reverse current circuit, despite a decrease in the total network resistance. The conclusion is made about the need for an individual assessment of the effectiveness of the use of shielding wires for each specific section of the railway, taking into account the parameters of the traction network and its operating modes.

Keywords: traction network, system with shielding conductor, energy losses in traction network.

For citation: Osipov, V. A. On the issue of energy efficiency of a traction network with shielding and reinforcing wires / V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 30–36. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_2_30.

Сведения об авторах

Осипов Владимир Александрович

Ростовский государственный
университет путей сообщения
(РГУПС),
кафедра «Теоретические основы
электротехники»,
кандидат технических наук, доцент,
декан, заведующий кафедрой,
e-mail: dw_@rambler.ru

Information about the authors

Osipov Vladimir Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Foundations of Electrical
Engineering”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Dean, Head of the Chair,
e-mail: dw_@rambler.ru

В. Н. Черных

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЯМОЙ
И ОБРАТНОЙ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГОЛОЛЁДНОЙ НАГРУЗКИ
В БЛОЧНЫХ КОМПЕНСАТОРАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

Аннотация. Статья посвящена развитию математического аппарата автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети, предназначенной для раннего обнаружения гололёдно-изморозевых отложений. В ранее выполненных исследованиях были получены зависимости между углами отклонения ветвей, параметрами компенсатора и измеряемыми усилиями для двухблочных и трёхблочных компенсирующих устройств, а также обосновано минимально необходимое количество тензометрических датчиков для корректного контроля гололёдной нагрузки. В настоящей работе выполнен переход от зависимостей для углов отклонения ветвей каната к формулам, непосредственно связывающим добавочную гололёдную нагрузку с усилием, регистрируемым тензометрическим датчиком. Показано, что различие коэффициентов передачи нагрузки в указанных схемах должно учитываться при выборе чувствительности датчиков и настройке алгоритмов обработки данных АСКВП.

Ключевые слова: контактная сеть, гололёдообразование, гололёдно-изморозевые отложения, компенсатор натяжения, двухблочная система, трёхблочная система, тензометрический контроль, приращение усилия, автоматизированная система контроля веса проводов.

Для цитирования: Черных, В. Н. Математическое обоснование прямой и обратной зависимостей для определения гололёдной нагрузки в блочных компенсаторах контактной сети / В. Н. Черных // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 37–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_37.

Введение

В ранее опубликованных работах [8, 9] был предложен подход к раннему обнаружению гололёдно-изморозевых отложений на контактной сети электрифицированных железных дорог, основанный на регистрации изменения усилия в элементах компенсирующего устройства контактной подвески. В отличие от методов, ориентированных преимущественно на метеорологические признаки или визуальную фиксацию уже сформировавшихся отложений, данный подход предполагает использование механического отклика самой контактной подвески на увеличение массы провода. Поэтому компенсирующее устройство в такой постановке рассматривается не только как элемент поддержания постоянного натяжения, но и как чувствительный механический узел, через который может быть получена информация о начальной стадии гололёдообразования.

В работе [8] было показано, что установка тензометрического измерительного органа в точке крепления неподвижного блока компенсатора к анкерной опоре позволяет регистрировать изменение силового состояния системы при увеличении весовой нагрузки на контактный провод. Тем самым была обоснована принципиальная возможность построения автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети, в которой диагностическим параметром выступает не только температура воздуха или проводника, а изменение усилия, возникающее непосредственно в механической системе компенсации натяжения.

Дальнейшее развитие данного направления выполнено в работе [9], где рассмотрены двухблочная и трёхблочная схемы компенсирующих устройств. В указанной работе на основании уравнений статики и геометрических соотношений для ветвей канатов были получены зависимости, связывающие углы отклонения ветвей с параметрами системы и измеряемыми усилиями. Кроме того, было показано, что для корректного контроля гололёдной нагрузки в двухблочной схеме требуется установка не менее двух тензометрических датчиков, а для трёхблочной схемы – не менее трёх. Эти результаты имеют значение для выбора состава измерительных органов автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети (АСКВП) и определения минимально необходимого объёма первичной информации о состоянии компенсатора.

Вместе с тем для практического применения АСКВП одних угловых зависимостей недостаточно. Углы отклонения ветвей каната позволяют описать геометрию силового равновесия, однако в алгоритме работы системы необходимо оперировать величинами, непосредственно связанными с измерительным сигналом тензометрического датчика. Для эксплуатационного использования требуется определить, как добавочная нагрузка от гололёдно-изморозевых отложений преобразуется в приращение усилия в точке крепления неподвижного блока. Иными словами, требуется перейти от геометрической интерпретации силовой схемы к явным аналитическим зависимостям, позволяющим рассчитать силу S , её чистое приращение ΔS , а также выполнить обратный расчёт добавочной нагрузки ΔG по зарегистрированному изменению сигнала.

Такой переход является необходимым этапом при формировании расчётного ядра АСКВП. Если на стадии теоретического анализа достаточно установить наличие взаимосвязи между изменением массы провода и изменением усилий в компенсаторе, то для автоматизированной системы требуется более строгая форма этой связи. Измерительный блок системы фиксирует не саму гололёдную нагрузку, а изменение усилия в контролируемой точке. Поэтому задача обработки данных сводится к двум взаимосвязанным операциям: прямому расчёту ожидаемого приращения усилия при заданной добавочной нагрузке и обратному определению величины этой нагрузки по измеренному приращению сигнала.

В настоящей работе рассматривается следующий этап развития указанной модели: получение прямых зависимостей для расчёта приращения усилия в точке установки датчика и обратных зависимостей для восстановления добавочной гололёдной нагрузки по измеренному сигналу. В качестве расчётных схем рассматриваются двухблочная и трёхблочная системы компенсации натяжения, ранее исследованные с точки зрения угловых зависимостей и минимально необходимого количества измерительных органов.

Для достижения поставленной цели в статье последовательно решаются следующие задачи: уточняется связь между суммарной вертикальной нагрузкой на провод и углами отклонения ветвей компенсирующего устройства; выполняется переход от угловых зависимостей к выражениям для силы S ; определяется исходное значение усилия S_0 при отсутствии гололёдной нагрузки; вводится понятие чистого приращения ΔS , обусловленного только добавочной массой отложений; выводятся обратные зависимости для определения ΔG по измеренному сигналу. Полученные соотношения могут быть использованы при построении структурных и алгоритмических схем АСКВП, а также при разработке расчётных блоков программной обработки данных тензометрического контроля.

Основная часть

Общая логика перехода от полученных угловых зависимостей к расчётным зависимостям АСКВП представлена на рис. 1. На первом этапе используется силовая схема компенсатора и система уравнений равновесия. На втором этапе из неё определяется связь между углами ветвей и суммарной вертикальной нагрузкой на провод. На третьем этапе эта связь преобразуется к выражению для силы S , регистрируемой тензометрическим датчиком. После вычитания исходной составляющей S_0 получается чистое приращение ΔS , а обратное преобразование позволяет определить добавочную нагрузку ΔG .

В дальнейшем используются следующие обозначения: P – вес одного груза компенсирующего устройства; Q – сила натяжения ветви, связанной с контактной подвеской; Q' – горизонтальная составляющая силы натяжения; S – усилие, регистрируемое в точке крепления неподвижного блока к анкерной опоре; G – собственный вес рассматриваемого участка провода; ΔG – добавочная нагрузка от гололёдно-изморозевых отложений; S_0 – исходное значение силы S при отсутствии гололёдной нагрузки; ΔS – чистое приращение сигнала тензометрического датчика. Как и в ранее рассмотренных моделях, блоки считаются идеальными, трением в опорах пренебрегают, канаты принимаются невесомыми и нерастяжимыми, а процесс рассматривается как квазистатический.



Рис. 1. Обобщённая структурная схема перехода от угловых зависимостей к расчётному ядру АСКВП

Двухблочная система компенсации

Рассмотрим двухблочную схему компенсации натяжения, для которой ранее были получены угловые зависимости и показана необходимость использования не менее двух измеряемых параметров. В настоящей работе эта схема используется для вывода прямой зависимости между добавочной нагрузкой на провод и усилием, регистрируемым в точке крепления неподвижного блока. Силовая схема двухблочного компенсатора приведена на рис. 2.

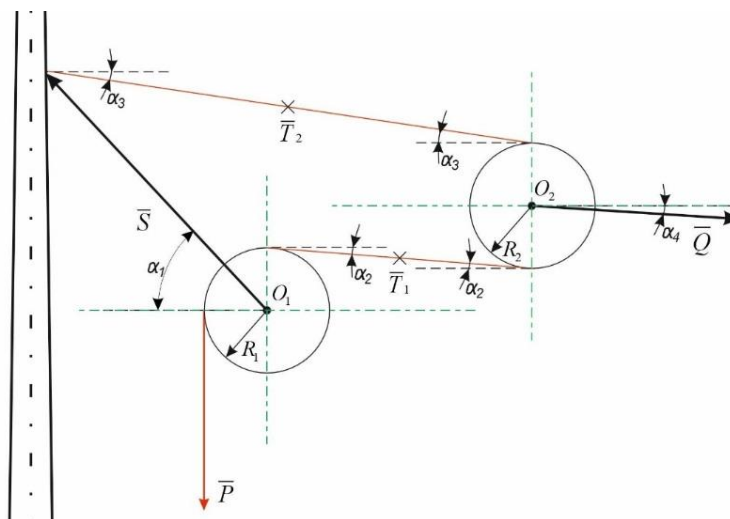


Рис. 2. Силовая схема двухблочной системы компенсации натяжения проводов

Вертикальная составляющая силы натяжения ветви, связанной с контактной подвеской, уравновешивает суммарную нагрузку от собственного веса рассматриваемого участка провода и добавочной нагрузки от гололёдообразования:

$$Q \sin \alpha_4 = G + \Delta G. \quad (1)$$

Для двухблочной схемы принимается, что результирующая сила натяжения ветви, связанной с контактной подвеской, определяется весами двух грузовых ветвей:

$$Q = 2P = \text{const}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует связь угла ветви с суммарной вертикальной нагрузкой:

$$\sin \alpha_4 = \frac{G + \Delta G}{2P}. \quad (3)$$

Горизонтальная составляющая силы натяжения, определяющая полезную составляющую натяжения контактного провода, в таком случае может быть записана как

$$Q' = 2P \sqrt{1 - \left(\frac{G + \Delta G}{2P} \right)^2}. \quad (4)$$

Условие физической реализуемости равновесия требует, чтобы аргумент обратной тригонометрической функции не выходил за допустимые пределы. Для положительной вертикальной нагрузки это условие имеет вид:

$$G + \Delta G \leq 2P. \quad (5)$$

Далее необходимо связать найденный угол с усилием S , которое регистрируется в точке крепления неподвижного блока. Для второго блока двухблочной схемы уравнения равновесия после подстановки $Q = 2P$ приводятся к двум соотношениям:

$$2 \cos \alpha_4 = \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3, \quad (6)$$

$$2 \sin \alpha_4 = \sin \alpha_2 + \sin \alpha_3. \quad (7)$$

Возведение выражений (6) и (7) в квадрат и последующее сложение позволяет исключить угол α_4 :

$$(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)^2 + (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_3)^2 = 4. \quad (8)$$

После раскрытия скобок и применения тождеств $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$ и $\cos x \cos y + \sin x \sin y = \cos(x - y)$ получаем:

$$\cos(\alpha_2 - \alpha_3) = 1. \quad (9)$$

Следовательно, ветви, сходящиеся во втором блоке, занимают симметричное положение, а углы могут быть приравнены:

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4. \quad (10)$$

Для первого блока сохраняется связь между углом α_1 и измеряемым усилием S , полученная из уравнений равновесия по осям и моментного равновесия:

$$\sin \alpha_1 = \frac{S}{2P}. \quad (11)$$

С учётом указанной связи выражение для угла α_2 может быть приведено к виду

$$\sin \alpha_2 = \frac{S^2 - 2P^2}{2P^2}. \quad (12)$$

Так как для двухблочной схемы $\alpha_2 = \alpha_4$, выражения (3) и (12) могут быть приравнены:

$$\frac{S^2 - 2P^2}{2P^2} = \frac{G + \Delta G}{2P}. \quad (13)$$

Отсюда после алгебраических преобразований получается явное выражение для силы, регистрируемой датчиком в точке крепления неподвижного блока:

$$S = \sqrt{2P^2 + P(G + \Delta G)}. \quad (14)$$

Если гололёдная нагрузка отсутствует, то $\Delta G = 0$, а исходное значение силы равно:

$$S_0 = \sqrt{2P^2 + PG}. \quad (15)$$

Для алгоритма АСКВП практический интерес представляет не абсолютное значение S , а чистое приращение, обусловленное именно появлением добавочной массы на проводе. Поэтому введём:

$$\Delta S = \sqrt{2P^2 + P(G + \Delta G)} - \sqrt{2P^2 + PG}. \quad (16)$$

То же выражение удобно представить через исходное значение S_0 :

$$\Delta S = \sqrt{S_0^2 + P\Delta G} - S_0. \quad (17)$$

Выражение (17) является прямой зависимостью, позволяющей по заданной добавочной нагрузке ΔG определить ожидаемое приращение сигнала датчика. Для практического применения также требуется обратная зависимость, поскольку в реальной системе сначала измеряется ΔS , а величина ΔG должна быть восстановлена расчётным способом.

Из (17) получаем:

$$\Delta G = \frac{\Delta S^2 + 2\Delta S S_0}{P}. \quad (18)$$

С учётом выражения для ΔS окончательно можно записать:

$$\Delta G = \frac{\Delta S^2}{P} + 2\Delta S \sqrt{2 + \frac{G}{P}}. \quad (19)$$

Формулы (16)–(19) образуют расчётный блок для двухблочной системы компенсации. Первая зависимость используется при моделировании реакции компенсатора на заданное приращение массы провода, вторая – при обработке реального сигнала тензометрического датчика. При этом величины P и G для конкретного анкерного участка являются заданными или предварительно определяемыми параметрами, что делает обратное восстановление ΔG алгоритмически реализуемым.

Трёхблочная система компенсации

Трёхблочная схема отличается от двухблочной не только увеличением числа ветвей, но и иным перераспределением усилий между блоками. Поэтому прямое перенесение формул, полученных для двухблочной схемы, на трёхблочную систему недопустимо. Вместе с тем общий принцип вывода сохраняется: сначала устанавливается связь углов ветвей с суммарной вертикальной нагрузкой, затем эта связь преобразуется к выражению для силы S , регистрируемой датчиком. Силовая схема трёхблочного компенсатора приведена на рис. 3.

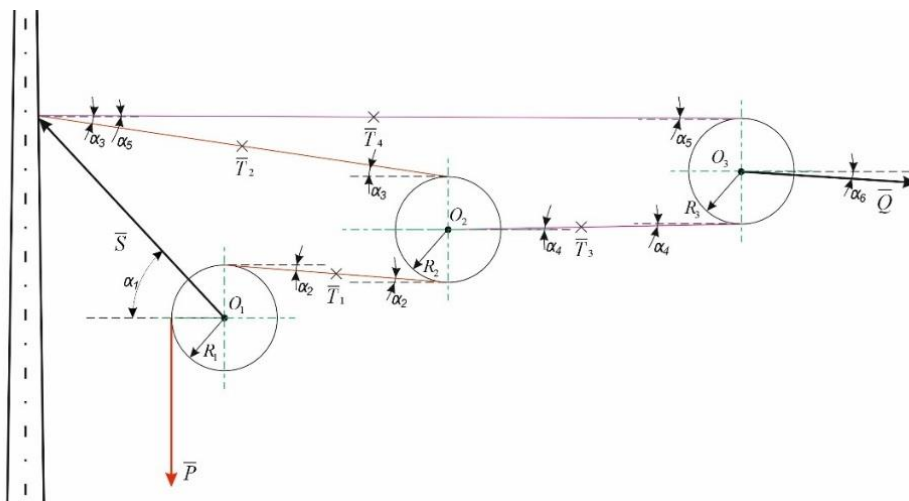


Рис. 3. Силовая схема трёхблочной системы компенсации натяжения проводов

Для принятой трёхблочной схемы соотношения между усилиями в ветвях канатов записываются следующим образом:

$$T_1 = T_2 = P, \quad T_3 = T_4 = 2P, \quad Q = 4P. \quad (20)$$

Для третьего блока уравнения равновесия по осям с учётом (20) имеют вид

$$4P \cos \alpha_6 - 2P \cos \alpha_5 - 2P \cos \alpha_4 = 0, \quad (21)$$

$$-4P \sin \alpha_6 + 2P \sin \alpha_5 + 2P \sin \alpha_4 = 0, \quad (22)$$

После деления на $2P$ получаем

$$2 \cos \alpha_6 = \cos \alpha_4 + \cos \alpha_5, \quad (23)$$

$$2 \sin \alpha_6 = \sin \alpha_4 + \sin \alpha_5. \quad (24)$$

Дальнейшее преобразование выполняется аналогично двухблочному случаю: выражения возводятся в квадрат, складываются, после чего используется тождество для косинуса разности. В результате получаем

$$\alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6. \quad (25)$$

Для второго блока трёхблочной схемы после подстановки соответствующих усилий имеем

$$2 \cos \alpha_4 = \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3, \quad (26)$$

$$2 \sin \alpha_4 = \sin \alpha_2 + \sin \alpha_3. \quad (27)$$

Отсюда, по той же логике, следует равенство углов во втором блоке. С учётом результата для третьего блока все углы, характеризующие отклонение ветвей после первого блока, могут быть сведены к одной обобщённой угловой координате:

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \alpha. \quad (28)$$

Вертикальная составляющая силы натяжения ветви, связанной с контактной подвеской, уравновешивает суммарную нагрузку от собственного веса провода и гололёдных отложений:

$$Q \sin \alpha = G + \Delta G. \quad (29)$$

Так как для принятой трёхблочной схемы $Q = 4P$, получаем:

$$\sin \alpha = \frac{G + \Delta G}{4P}. \quad (30)$$

Соответственно горизонтальная составляющая силы натяжения может быть представлена выражением:

$$Q' = 4P \sqrt{1 - \left(\frac{G + \Delta G}{4P} \right)^2}. \quad (31)$$

Как и для двухблочной схемы, для первого блока сохраняется зависимость между углом ветви и измеряемым усилием S . С учётом $\alpha_2 = \alpha$ имеем:

$$\frac{S^2 - 2P^2}{2P^2} = \frac{G + \Delta G}{4P}. \quad (32)$$

После преобразования получаем явное выражение для силы, регистрируемой тензометрическим датчиком:

$$S = \sqrt{2P^2 + \frac{P}{2}(G + \Delta G)}. \quad (33)$$

При отсутствии гололёдной нагрузки исходное значение силы равно:

$$S_0 = \sqrt{2P^2 + \frac{PG}{2}}. \quad (34)$$

Чистое приращение измеряемого усилия для трёхблочной системы определяется как

$$\Delta S = \sqrt{2P^2 + \frac{P}{2}(G + \Delta G)} - \sqrt{2P^2 + \frac{PG}{2}}. \quad (35)$$

Или через исходное значение S_0 :

$$\Delta S = \sqrt{S_0^2 + \frac{P\Delta G}{2}} - S_0. \quad (36)$$

Переход к обратной зависимости выполняется возведением обеих частей выражения (36) в квадрат и последующим выделением ΔG . В результате:

$$\Delta G = \frac{2\Delta S^2 + 4\Delta S S_0}{P}. \quad (37)$$

С учётом выражения для S_0 окончательно получаем:

$$\Delta G = \frac{2\Delta S^2}{P} + 4\Delta S \sqrt{2 + \frac{G}{2P}}. \quad (38)$$

Формулы (35)–(38) показывают, что трёхблочная система сохраняет возможность обратного определения добавочной гололёдной нагрузки по измеренному приращению усилия. Однако коэффициент, с которым ΔG входит в подкоренное выражение, отличается от двухблочной схемы. Это обстоятельство принципиально важно для дальнейшего выбора чувствительности тензометрических датчиков и настройки порогов срабатывания системы.

Сравнение полученных зависимостей и их использование в АСКВП

Сопоставление полученных выражений удобно выполнить через прямые зависимости для чистого приращения усилия. Для двухблочной системы имеем:

$$\Delta S_2 = \sqrt{S_{02}^2 + P\Delta G} - S_{02}. \quad (39)$$

Для трёхблочной системы аналогичная зависимость принимает вид:

$$\Delta S_3 = \sqrt{S_{03}^2 + \frac{P\Delta G}{2}} - S_{03}. \quad (40)$$

Здесь S_{02} и S_{03} – исходные значения контролируемого усилия соответственно для двухблочной и трёхблочной схем. Из выражений (39) и (40) видно, что при одинаковом P и одинаковой добавочной нагрузке ΔG в двухблочной системе прирост измеряемого усилия будет более выраженным. Для малых приращений нагрузки это различие можно показать через производные в окрестности $\Delta G = 0$:

$$\left. \frac{dS_2}{d(\Delta G)} \right|_{\Delta G=0} = \frac{P}{2S_{02}}; \quad (41)$$

$$\left. \frac{dS_3}{d(\Delta G)} \right|_{\Delta G=0} = \frac{P}{4S_{03}}. \quad (42)$$

Полученные производные характеризуют начальную чувствительность измеряемого усилия к появлению добавочной нагрузки. Иначе говоря, они показывают, какое приращение силы S будет зарегистрировано тензометрическим датчиком при малом увеличении ΔG в начальной области гололёдообразования. Такой подход не заменяет точные выражения для ΔS_2 и ΔS_3 , приведённые выше, а используется только для наглядного сравнения двух схем компенсации вблизи исходного состояния.

С учётом найденных значений производных малое изменение измеряемого усилия можно представить в виде:

$$\Delta S_2 \approx \frac{P}{2S_{02}} \Delta G, \quad (43)$$

$$\Delta S_3 \approx \frac{P}{4S_{03}} \Delta G. \quad (44)$$

Знак приближённого равенства в данном случае означает, что рассматривается начальный участок зависимости, соответствующий малым значениям добавочной нагрузки. Из приведённых выражений видно, что для двухблочной схемы коэффициент при ΔG в два раза больше, чем для трёхблочной схемы при сопоставимых исходных параметрах. Следовательно, одна и та же добавочная гололёдная нагрузка вызывает в двухблочной системе более выраженное приращение усилия, регистрируемого датчиком. Для алгоритма АСКВП это означает необходимость раздельного задания расчётных коэффициентов и порогов срабатывания для разных типов компенсирующих устройств.

Полученный результат не означает преимущества одной схемы компенсации как эксплуатационного устройства. Тип компенсатора определяется конструкцией контактной подвески, условиями анкерования и принятой схемой натяжения. Однако для измерительной системы это различие имеет принципиальное значение. При переходе от двухблочной к трёхблочной схеме полезный сигнал, соответствующий одной и той же добавочной нагрузке, изменяется по иной зависимости. Поэтому алгоритм АСКВП не должен использовать единый универсальный коэффициент пересчёта для всех типов компенсаторов. В программной реализации необходимо предварительно идентифицировать тип схемы, задать соответствующие параметры P и G , после чего применять формулы прямого или обратного расчёта, полученные для конкретной конфигурации.

С инженерной точки зрения полученные зависимости позволяют сформировать два взаимосвязанных блока обработки данных. Первый блок является расчётно-прогноznым: по заданной величине ΔG определяется ожидаемое приращение ΔS , что используется при моделировании чувствительности системы и назначении порогов обнаружения. Второй блок является измерительно-диагностическим: по фактически зарегистрированному ΔS определяется добавочная нагрузка ΔG , которая затем может быть интерпретирована как признак начального гололёдообразования. Такая структура хорошо согласуется с общей логикой АСКВП, в которой тензометрический датчик фиксирует силовой отклик компенсатора, а программный модуль выполняет фильтрацию, выделение полезной составляющей и пересчёт измеренного сигнала в оценку дополнительной массы провода.

Следует отдельно отметить, что в эксплуатационных условиях измеряемое усилие S будет содержать не только полезную составляющую, связанную с ростом массы отложений, но и кратковременные возмущения от динамического воздействия подвижного состава, температурных перемещений, ветровых нагрузок и особенностей работы компенсирующего устройства. Поэтому формулы, полученные в настоящей работе, не исключают необходимости первичной обработки сигнала. Напротив, они задают расчётную основу для такого алгоритма: после фильтрации и выделения устойчивой составляющей приращения усилия именно обратные зависимости (18) и (37) позволяют перейти от измеренного сигнала к физически интерпретируемой величине ΔG .

Таким образом, полученные выражения являются недостающим звеном между ранее разработанной угловой моделью блочных компенсаторов и практическим алгоритмом работы автоматизированной системы контроля веса проводов. Угловые зависимости позволяют описать силовую геометрию системы, а выражения для S , ΔS и ΔG переводят эту геометрию в форму, пригодную для расчётного блока АСКВП.

Выводы

Сравнение прямых зависимостей для ΔS показывает, что двухблочная и трёхблочная системы требуют различных алгоритмов пересчёта измеряемого усилия в добавочную гололёдную нагрузку. Это должно учитываться при выборе чувствительности тензометрических датчиков, назначении порогов срабатывания и разработке программного обеспечения АСКВП.

Полученные зависимости могут быть использованы как расчётная основа для структурных и алгоритмических блок-схем АСКВП: прямой расчёт позволяет моделировать ожидаемый сигнал при заданной гололёдной нагрузке, а обратный расчёт обеспечивает восстановление ΔG по фактически измеренному приращению усилия.

Список литературы

- 1 Методические указания по борьбе с гололёдом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПП, автоблокировки и продольного электропитания. Кн. 1. Основы профилактического подогрева, плавки гололёдно-изморозевых образований и меры борьбы с автоколебаниями проводов контактной сети и высоковольтных линий. – Москва : ОАО «РЖД», 2004. – 132 с.
- 2 **Фигурнов, Е. П.** Условия успешной плавки гололёда на неизолированных проводах воздушных линий / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Т. Е. Петрова // Электричество. – 2013. – № 8. – С. 21–27. – ISSN 0013-5380.
- 3 **Жарков, Ю. И.** Повышение надёжности и безопасности электроснабжения на основе мониторинга и раннего обнаружения опасных внешних воздействий и скрытых дефектов в устройствах электроснабжения / Ю. И. Жарков, Ю. Г. Семенов, Е. П. Фигурнов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 1 (45). – С. 190–195. – ISSN 0201-727X.
- 4 **Кубкина, О. В.** Исследование возможности применения емкостного способа контроля толщины стенки гололёдно-изморозевых образований на проводах. Математическая модель ёмкости планарного конденсатора / О. В. Кубкина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 2 (30). – С. 95–100. – ISSN 0201-727X.

References

- 1 Guidelines for combating ice and self-oscillation on the contact network, DPR lines, automatic block signaling and longitudinal power supply lines. Book 1. Fundamentals of preventive heating, melting of ice and frost formations and measures to combat self-oscillation of contact network and high-voltage line wires. – Moscow : JSC “RZD”, 2004. – 132 p.
- 2 **Figurnov, E. P.** Conditions of successful melting of ice on uninsulated wires of overhead lines / E. P. Figurnov, Yu. I. Zharkov, T. E. Petrova // Elektrichestvo. – 2013. – No. 8. – P. 21–27. – ISSN 0013-5380.
- 3 **Zharkov, Yu. I.** Increasing the reliability and safety of the power supply on the basis of monitoring and early detection of dangerous external effects and hidden defects in the power supply devices / Yu. I. Zharkov, Yu. G. Semenov, E. P. Figurnov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2012. – No. 1 (45). – P. 190–195. – ISSN 0201-727X.
- 4 **Kubkina, O. V.** Investigation of the possibility of using the capacitive method of controlling the wall thickness of ice-rime formations on wires. Mathematical model of the planar capacitor capacity / O. V. Kubkina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2008. – No. 2 (30). – P. 95–100. – ISSN 0201-727X.

5 **Трубицин, М. А.** Анализ способов обнаружения гололёда на проводах ЛЭП и их применение для контактной сети / М. А. Трубицин, О. Г. Лукашевич // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4 (43). – С. 23. – ISSN 2073-8633.

6 **Михеев, В. П.** Контактные сети и линии электропередачи : учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. П. Михеев. – Москва : Маршрут, 2003. – 416 с. – ISBN 5-89035-086-2.

7 **Фрайфельд, А. В.** Проектирование контактной сети электрифицированных железных дорог / А. В. Фрайфельд. – Москва : Транспорт, 1984. – 327 с.

8 **Черных, В. Н.** Совершенствование системы обнаружения раннего гололёдообразования для контактных сетей электрифицированных железных дорог / В. Н. Черных, В. А. Осипов. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (94). – С. 110–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_110.

9 **Осипов, В. А.** Математическое обоснование минимально необходимого количества тензодатчиков для корректного контроля гололёдной нагрузки в составе АСКВП / В. А. Осипов, В. Н. Черных // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 10–19. – ISSN 2220-4245.

10 **Черных, В. Н.** Метод раннего обнаружения гололёда на контактной сети / В. Н. Черных // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сборник научных трудов международной научно-практической конференции ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 12–15. – EDN PNDASB.

11 **Черных, В. Н.** Алгоритмы и техническая реализация автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети / В. Н. Черных, В. А. Осипов // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов международной научно-практической конференции ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2025. – С. 103–107. – EDN JYHGRF.

12 **Патент № 2823373 C1.** Российская Федерация, МПК В60М 1/12, В60М 1/26. Автоматизированная система контроля веса проводов контактной сети железной дороги / В. А. Осипов, В. Н. Черных, Н. В. Черных. – № 2024103146 ; заявлено 08.02.2024 ; опубликовано 22.07.2024, Бюл. 21. – 5 с. – EDN AHWIHS.

5 **Trubitsin, M. A.** Analysis of methods for detecting ice on power line wires and their application for the contact network / M. A. Trubitsin, O. G. Lukashevich // Engineering Bulletin of Don. – 2016. – No. 4 (43). – P. 23. – ISSN 2073-8633.

6 **Mikheev, V. P.** Contact networks and power lines : textbook for railway transport universities / V. P. Mikheev. – Moscow : Marshrut, 2003. – 416 p. – ISBN 5-89035-086-2.

7 **Freifeld, A. V.** Design of the contact network of electrified railways / A. V. Freifeld. – Moscow : Transport, 1984. – 327 p.

8 **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 Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 2 (94). – P. 110–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_110.

9 **Osipov, V. A.** Mathematical justification of the minimum required number of strain gauges for accurate ice load monitoring in an automated overhead contact wire monitoring system / V. A. Osipov, V. N. Chernykh // Journal of Transsib Railway Studies. – 2025. – No. 4 (64). – P. 10–19. – ISSN 2220-4245.

10 **Chernykh, V. N.** Method of early detection of ice on the contact network / V. N. Chernykh // Transport power engineering. Current problems and tasks : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference ; Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don, 2024. – P. 12–15. – EDN PNDASB.

11 **Chernykh, V. N.** Algorithms and technical implementation of an automated weight control system for the wires of the contact network / V. N. Chernykh, V. A. Osipov // Transport : science, education, production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference ; Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don, 2025. – P. 103–107. – EDN JYHGRF.

12 **Patent No. 2823373 C1.** Russian Federation, IPC B60M 1/12, B60M 1/26. Automated system for monitoring the weight of wires in the overhead contact network of a railway / V. A. Osipov, V. N. Chernykh, N. V. Chernykh. – No. 2024103146 ; declared 08.02.2024; published 22.07.2024, Bulletin 21. – 5 p. – EDN AHWIHS.

V. N. Chernykh

**MATHEMATICAL JUSTIFICATION OF DIRECT AND INVERSE DEPENDENCES
FOR DETERMINING ICE LOAD IN BLOCK COMPENSATORS
OF THE OVERHEAD CONTACT NETWORK**

Abstract. The article is devoted to the development of a mathematical framework of an automated system for monitoring the weight of overhead contact wires intended for early detection of ice and frost formations. Previous studies have derived relationships between the branch deflection angles, compensator parameters, and measured forces for two- and three-block compensating devices, and substantiated the minimum number of strain gauges required for accurate ice load monitoring. This paper transitions from relationships for the branch deflection angles to formulas directly linking the additional ice load to the force recorded by the strain gauge. It is shown that the difference in load transfer coefficients in these systems should be taken into account when selecting sensor sensitivity and configuring automated wire weight monitoring (AWM) data processing algorithms.

Keywords: overhead catenary, ice accretion, glaze-ice and rime depositions, tension compensator, two-block system, three-block system, strain-gauge monitoring, force increment, automated wire weight monitoring system.

For citation: Chernykh, V. N. Mathematical justification of direct and inverse dependences for determining ice load in block compensators of the overhead contact network / V. N. Chernykh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 37–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_37.

Сведения об авторах**Черных Владимир Николаевич**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы электротехники»,
ассистент,
e-mail: v0l4nd94@yandex.ru

Information about the authors**Chernykh Vladimir Nikolayevich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Basis of Electrical
Engineering”,
Assistant,
e-mail: v0l4nd94@yandex.ru

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.139.5

DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_48

*Е. И. Нагаев, Д. А. Усов, А. Л. Ланис, Д. В. Величко***ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ АДАПТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ
ПРИ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ
В ОСНОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Аннотация. В условиях изменения климата особую актуальность приобретает обеспечение устойчивой эксплуатации транспортной инфраструктуры, расположенной в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Для сооружений, эксплуатируемых по I принципу повышение среднегодовых температур создает предпосылки для деградации ММГ, что приводит к развитию криогенных деформаций, снижению надежности и безопасности сооружения. В статье представлены результаты геокриологического моделирования системы «сооружение – основание» на участке железной дороги Чум – Лабытнанги в Ямало-Ненецком автономном округе, выполненное с использованием специализированных программных комплексов. Подтверждена возможность распространения базовой геокриологической модели на другие участки транспортной инфраструктуры путем сопоставления результатов численного моделирования с данными инженерно-геокриологического мониторинга, включая термометрические измерения в скважинах, не превышающих 0,1 °С. На основе анализа температурного поля и деформаций обоснован критерий целесообразности адаптационных мероприятий. Полученные результаты имеют практическое значение для обоснования долгосрочной стратегии адаптации транспортной инфраструктуры к климатическим изменениям.

Ключевые слова: деградация многолетнемерзлых грунтов, прогнозное моделирование, железнодорожный путь, криогенные деформации, изменения климата.

Для цитирования: Обоснование целесообразности адаптационных мероприятий при деградации многолетнемерзлых грунтов в основании транспортных сооружений / Е. И. Нагаев, Д. А. Усов, А. Л. Ланис, Д. В. Величко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 48–60. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_48.

Введение

Общая протяженность земляного полотна на сети железных дорог составляет более 86,4 тыс. км, в том числе дефектного и деформирующегося земляного полотна 8,6 тыс. км или 10 % от общей протяженности [1]. Средний процент дефектности земляного полотна и искусственных сооружений $X_{\text{ср.}}$ составляет 11,6 %. При этом на 6 железных дорогах процент дефектности превышает сетевой показатель (рис. 1).

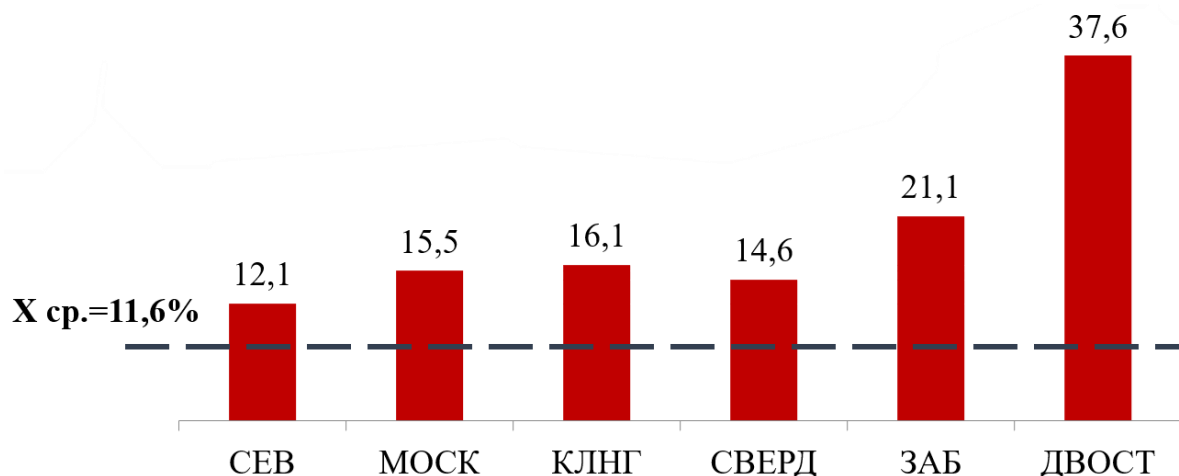


Рис. 1. Дефектность земляного полотна на дорогах, превышающих сетевой показатель [1]

В структуре дефектов и деформаций железнодорожного пути на дефекты земляного полотна приходится более 50 % (рис. 2). Превышает это значение в процентном соотношении только такие деформации, как осадки, в том числе криогенного характера, общее количество которых составляет 15 % от общего количества [2].

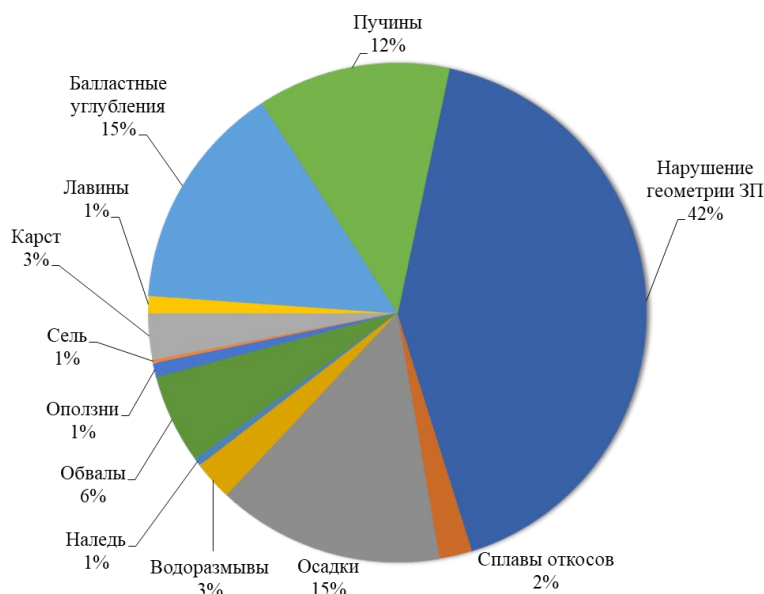


Рис. 2. Структура дефектов и деформаций железнодорожного пути, 2022 г. [2]

Одной из главных причин возникновения деформаций криогенного характера является глобальное изменение климата, оказывающее повсеместное влияние на эксплуатацию транспортных сооружений в условиях Арктической зоны РФ в связи с деградацией многолетнемерзлых грунтов (ММГ) естественного основания [3]. Помимо глобального изменения климата сопутствующими причинами деградации ММГ являются:

- несовершенство водоотводных сооружений, приводящее к застою поверхностных вод вблизи сооружения [3];
- снежный покров, в связи с особенностями метелевого снегопереноса [4];
- неравномерность температурного поля основания [5];
- техногенное воздействие, служащее катализатором для изменения теплообмена в системе «сооружение-основание» [4–7].

Согласно исследованиям китайских ученых [2], аналогичная проблема деформирования присутствует на Цинхай-Тибетской железной дороге, на которой примерно 275 км ММГ находится в диапазоне температур выше -1°C и половина обладает высоким содержанием льда [2]. То есть порядка 122 км высокотемпературной мерзлоты с высоким содержанием льда могут быть особенно подвержены таянию при повышении температуры всего на 1°C , что уже сейчас приводит к значительному увеличению просадок насыпи железной дороги при оттаивании [2]. Аналогичная проблема сложилась и на Цинхай-Тибетской автомагистрали.

В Арктической зоне РФ темпы повышения среднегодовой температуры воздуха превышают глобальные показатели – они примерно вдвое выше мировых. Это явление особенно заметно в Западной Сибири, где за последние сто лет температура возросла на $4,0\text{--}5,5^{\circ}\text{C}$ [8]. Такие изменения отражаются на состоянии окружающей среды и грунтовых условиях.

В большей или меньшей степени, в зависимости от конкретных ландшафтных условий местности, на теплообмен влияет сукцессия растительности [9]. От интенсивности сукцессии и техногенной депрессии экосистемы, вызванной деятельностью человека, зависит регуляция тепла, влаги, кровля ММГ и минерализация [9].

Как отдельно на сукцессию, так и на теплообмен ММГ оказывает влияние грунтовый и поверхностный сток воды, который может быть нарушен в ходе строительства и эксплуатации линейных сооружений, в связи с несовершенством водоотводных сооружений или их отсутствием.

Необходимо рассмотреть метелевый снегоперенос, как один из факторов теплообмена с атмосферой. Как известно, отложения снега, скопившиеся в пределах эксплуатируемой насыпи, а также

термокарстовых понижениях, оказывают отопляющее воздействие. Причем в пределах термокарстовых понижений снегоперенос будет способствовать развитию процессов термокарста и обводнения оттаивающих грунтов [10].

Анализ состояния вопроса показывает, что деградация ММГ является одним из ключевых процессов, влияющих на безопасную эксплуатацию железнодорожного пути без ограничения скорости движения в Арктической зоне.

Таким образом, развитие транспортной сети в Арктической зоне РФ в условиях глобального изменения климата и воздействия антропогенных факторов будет неотъемлемо связано с адаптацией существующих и проектируемых сооружений к особенностям, связанным с деградацией ММГ в основании, как и в условиях Цинхай-Тибетской железной дороги [11]. Это возможно лишь при условии разработки новых и усовершенствовании существующих методик строительства и эксплуатации, которые должны опираться на геотехнический и геокриологический прогноз. Однако, в этом случае возникнет проблема обоснования целесообразности применения адаптационных мероприятий.

В статье исследование проведено на фактических материалах инженерно-геокриологических изысканий участка Северной железной дороги Чум – Лабытнанги в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО), расположенном в северной части Западной Сибири, характеризующемся распространением ММГ, подверженных деградации. Исходные параметры, включая литологический состав, влажность, теплофизические характеристики грунтов, начальные температурные условия, приняты на основании данных полевых наблюдений и лабораторных испытаний, выполненных в ходе инженерных изысканий и проводимого инженерно-геокриологического мониторинга по данному объекту в рамках гранта Российского научного фонда № 24-19-20036.

Для решения выявленной проблемы в настоящей статье поставлены следующие задачи:

1) подтвердить возможность использования ранее составленной геокриологической модели [3] на другие участки транспортной инфраструктуры путем количественной верификации расчетных температурных полей с данными инженерно-геокриологического мониторинга;

2) выявить динамику понижения кровли ММГ и развития неравномерных осадок основания на прогнозный период с выявлением критических рубежей изменения термодинамического состояния грунтового массива;

3) предложить критерий целесообразности применения адаптационных мероприятий в условиях ЯНАО.

Материалы и методы исследования

Для численного прогнозирования теплового режима системы «сооружение-основание» была использована геокриологическая модель, структурно и параметрически ориентированная на особенности линейных транспортных сооружений (рис. 3) [7]. Входные параметры модели, включая теплофизические характеристики инженерно-геологических элементов и граничные условия на поверхности, были параметризованы под конкретные инженерно-геологические и климатические условия исследуемого участка, что позволило воспроизвести реальный гидротермический режим системы в условиях деградации ММГ.

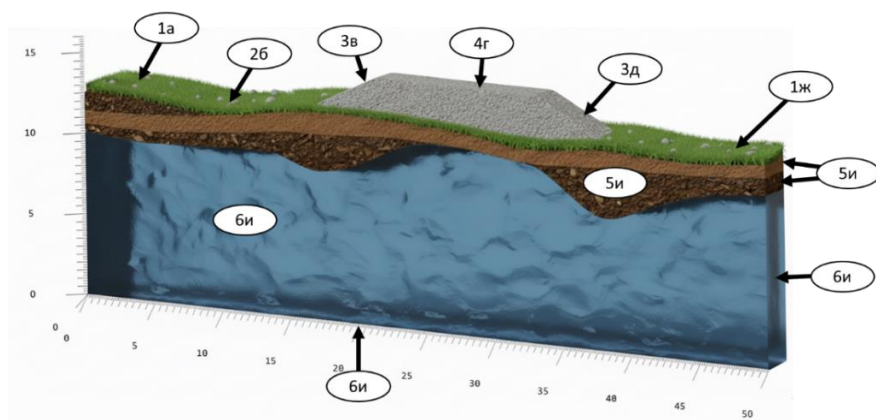


Рис. 3. Геокриологическая модель поперечного профиля насыпи железнодорожного пути в условиях деградации ММГ в ЯНАО

Условные обозначения элементов модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Поэлементное описание геокриологической модели

Граничное условие	Вид грунта	Элемент
Юго-восточная экспозиция, нормальное снегонакопление	Сезоннооттаивающий грунт – сильноразложившийся водонасыщенный торф с глинистым грунтом текучей консистенции	1а
Северо-западная экспозиция, нормальное снегонакопление		1ж
Юго-восточная экспозиция, ямообразный профиль, без аккумуляции поверхностных вод, повышенное снегонакопление	Зона термической просадки	2б
Юго-восточная экспозиция, наклонная поверхность, повышенное снегонакопление	Существующее тело земляного полотна после возникновения деградации ММГ – техногенный грунт: песок неоднородный маловлажный средней плотности	3в
Северо-западная экспозиция, наклонная поверхность, повышенное снегонакопление		3д
Горизонтальная поверхность с отсутствием снегонакопления	Верхнее строение пути	4г
Основание земляного полотна (деятельный слой) – супесь пылеватая, текучей консистенции	Адиабатическое граничное условие, соответствующее нулевому тепловому потоку	5и
Основание земляного полотна (многолетнемерзлый грунт) – суглинок легкий, пылеватый, пластичномерзлый, льдистый, слоисто-сетчатой криотекстуры, при оттаивании текучий	Адиабатическое граничное условие, соответствующее нулевому тепловому потоку	6и

В рамках численного моделирования были заданы граничные условия, учитывающие инсоляцию, скорость ветра, сезонную изменчивость высоты и теплопроводности снегового покрова, наличие поверхностных вод и атмосферную температуру. Особое внимание было уделено заданию адиабатических условий, которые моделировались как области с нулевым тепловым потоком, исключающие теплообмен с окружающей средой.

Исходные данные для моделирования, включая сезонно-переменную высоту снежного покрова и пространственно-временное распределение температур, были получены на основе результатов натурных измерений, выполненных в ходе инженерно-геокриологического мониторинга на участке Северной железной дороги Чум – Лабытнанги.

Данные по высоте снежного покрова учитывали его изменчивость по месяцам холодного периода. Высота снежного покрова определялась на основании регулярных замеров в точках наблюдения, выбранных с учетом метелевого перераспределения снега и аккумуляции в термокарстовых понижениях. Для элементов, не подверженных снегонакоплению (верхнее строение пути, тип «г»), высота покрова принята равной нулю. Указанные параметры использованы для задания нестационарных граничных условий теплообмена с атмосферой.

Температурный режим ММГ и деятельного слоя определялся с использованием термодатчиков, установленных в скважинах на различных глубинах. Полученные зависимости изменения температуры во времени использованы для формирования граничных и начальных условий при численном моделировании теплового поля.

Климатические параметры граничных условий, представленные в табл. 2, разделены по типам поверхностей модели (элементы 1а–6и, табл. 2) с учетом их экспозиции, режима снегонакопления и влияния конструктивных элементов железнодорожного пути. Региональный климатический прогноз принят в соответствии со сценарием SSP5-8.5, согласно которому темп потепления составляет 0,77 °C/десятилетие [12].

Таблица 2

Климатические параметры граничных условий

Характеристика	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Граничные условия типа «а»												
Температура, °С	-27,30	-26,30	-16,40	-8,80	2,90	15,80	27,20	17,50	6,50	-6,10	-17,50	-23,90
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	2,00	2,00	2,00	2,10	1,50	0,50	-	-	-	0,50	1,00	1,50
Граничные условия типа «б»												
Температура, °С	-27,30	-26,30	-16,40	-8,80	2,90	15,80	27,20	17,50	6,50	-6,10	-17,50	-23,90
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	2,20	2,40	2,40	2,10	1,50	0,50	-	-	-	0,50	1,00	1,50
Граничные условия типа «в»												
Температура, °С	-24,10	-23,10	-15,10	-8,60	-0,80	12,79	18,61	13,32	6,07	-3,80	-14,90	-20,30
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	1,55	2,00	2,26	2,10	2,00	-	-	-	-	0,20	0,35	1,00
Граничные условия типа «г»												
Температура, °С	-27,10	-24,80	-12,90	-2,80	8,00	18,70	27,50	17,60	7,10	-4,60	-17,30	-23,90
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Граничные условия типа «д»												
Температура, °С	-27,30	-26,30	-16,40	-8,80	2,90	15,80	27,20	17,50	6,50	-6,10	-17,50	-23,90
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	2,20	2,40	2,40	2,10	1,50	0,50	-	-	-	0,50	1,00	1,50
Граничные условия типа «е»												
Температура, °С	-27,30	-26,30	-16,40	-8,80	2,90	15,80	27,20	17,50	6,50	-6,10	-17,50	-23,90
Скорость ветра, м/с	0,71	0,69	0,85	0,87	0,89	0,83	0,73	0,75	0,77	0,77	0,81	0,73
Высота снежного покрова, м	1,68	2,02	2,46	2,10	0,4	-	-	-	-	0,60	0,96	1,20
Граничные условия типа «ж»												
Температура, °С	-27,30	-26,30	-16,40	-8,80	2,90	15,80	27,20	17,50	6,50	-6,10	-17,50	-23,90
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	2,00	2,00	2,00	2,10	1,50	0,50	-	-	-	0,50	1,00	1,50
Граничные условия типа «и»												
Температура, °С	Тепловое распределение по термометрическим скважинам											
Скорость ветра, м/с	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Высота снежного покрова, м	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Теплофизические характеристики грунтов и материалов, использованные в численном моделировании, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Теплофизические свойства грунтов

№ ИГЭ	Теплопроводность, Вт/(м·К)		Объемная теплоемкость, МДж/(м³·К)		Суммарная влажность, доля единицы	Плотность в сухом состоянии, кг/м³	Температура начала замерзания, °С
	талого	мерзлого	талого	мерзлого			
1	0,25	0,54	1,48	1,08	1,35	520	–0,18
3	1,20	1,36	1,66	1,42	0,07	1640	0,00
5	1,80	2,01	3,14	2,23	0,37	1300	–0,15
6	1,57	1,78	3,50	2,53	0,42	1290	–0,20

Распределение температурных полей в грунте на начальный момент времени расчета в интерфейсе программного комплекса представлено на рис. 4. Эти данные были получены в результате нулевого цикла измерений, выполненных 24.09.2024.

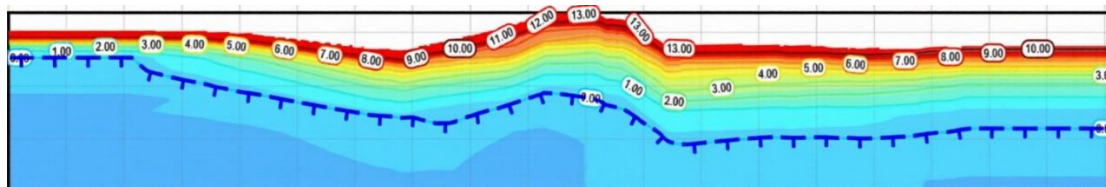


Рис. 4. Температурное распределение на нулевой цикл измерения (24.09.2024)

Верификация расчетной схемы выполнена путем количественного сопоставления температурных полей, полученных в программном комплексе, с данными инженерно-геокриологического мониторинга на контрольных скважинах участка Чум – Лабитнанги (рис. 5).

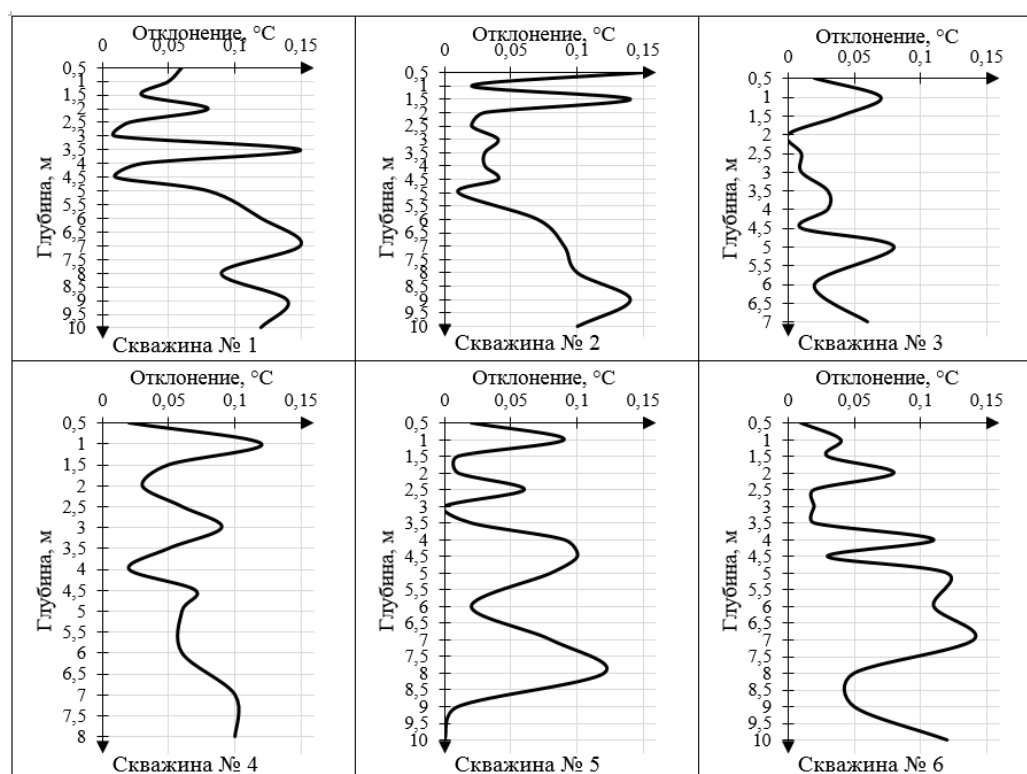


Рис. 5. Сравнение расчетов геокриологической модели и результатов инженерно-геокриологического мониторинга на 15.05.2025

По результатам расчета полученные значения не превышают погрешность измерительных приборов для выполнения термометрических измерений – 0,1 °С.

Полученные результаты верификации позволяют сделать вывод о принципиальной возможности распространения базовой (ранее разработанной) геоэкологической модели [3] на другие транспортные сооружения. Устойчивость расчетного решения при варьировании локальных параметров (рельеф, экспозиция склонов, режим снегонакопления, теплофизические характеристики ИГЭ) свидетельствует о том, что модель может использоваться в качестве универсального инструмента для прогнозного анализа деградации ММГ при условии корректной параметризации под конкретные инженерно-геологические и климатические условия объекта.

Результаты исследования

Для оценки долгосрочного теплового поведения ММГ основания земляного полотна железнодорожного пути выполнен прогнозный расчет, который позволил получить пространственное распределение температурного поля в теле насыпи и основании, а также оценить динамику изменения теплового режима грунтов в условиях естественного воздействия климатических факторов без применения специальных мероприятий.

На пятом году моделирования отмечено постепенное повышение температуры в нижней части разреза. Наиболее выраженные изменения наблюдаются в верхней части разреза, где отмечаются значительные колебания температур и деградация ММГ со стороны откоса с солнечной экспозицией. Средняя глубина протаивания многолетнемерзлых грунтов составила два метра относительно начального момента измерения. При этом сохраняется слабо выраженное мерзлое «ядро» в теле насыпи и удаленные от дневной поверхности области, в особенности с теневой экспозиции (рис. 6).

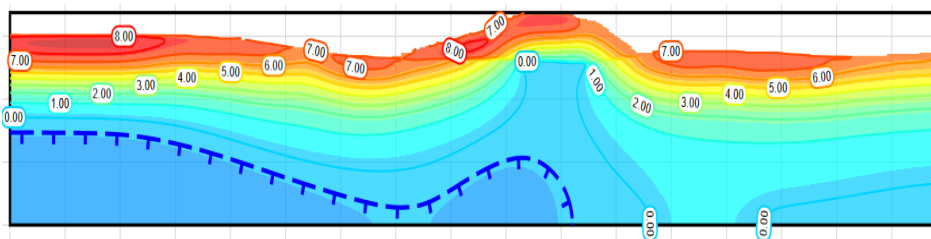


Рис. 6. Температурное распределение на пятый год моделирования (15.09.2029)

К десятому году моделирования (рис. 7) наблюдается дальнейшее развитие положительных температур в основании насыпи. Формируется устойчивая тенденция к увеличению глубины деятельного слоя и продолжению деградации ММГ. Средняя глубина протаивания ММГ составила более 4 м относительно начального момента измерения.

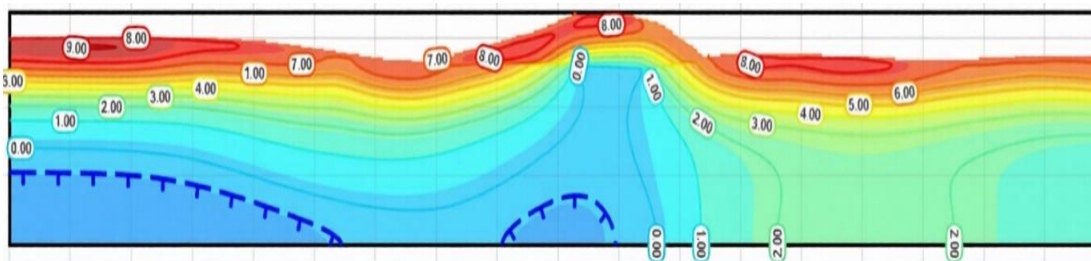


Рис. 7. Температурное распределение на десятый год моделирования (15.09.2034)

Выполненный прогнозный расчет температурного режима грунтов показал, что в условиях естественной эксплуатации с учетом глобального изменения климата без применения мер по адаптации наблюдается постепенная деградация ММГ. Это может привести к развитию неравномерных деформаций основания и снижению надежности железнодорожного пути.

Результаты моделирования также позволили оценить осадку сооружения, вызванную оттаиванием, и выполнить разделение на зоны поперечного профиля земляного полотна (рис. 8). Критериями зонирования послужили различия в тепловом режиме, гидрологических условиях, экспозиции склонов и степени техногенного воздействия. Таким образом, выделены четыре характерные зоны, отличающиеся по интенсивности криогенных процессов и уровню деформационной угрозы в период с 2024 по 2044 год (рис. 9). Такое пространственное разделение позволяет учитывать неоднородность криогенных процессов при обосновании специальных мероприятий и организации системы инженерно-геоэкологического мониторинга.

На рис. 8 обозначены границы зон, а также расположение контрольных скважин.

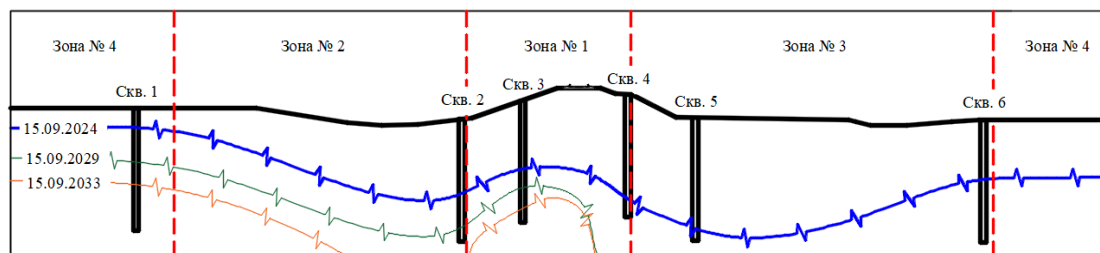


Рис. 8. Геокриологический поперечный профиль железнодорожного пути с выделенными характерными зонами и прогнозным положением кровли ММГ

Зона № 1 охватывает участок непосредственно под насыпью железнодорожного пути. Здесь наблюдается деградация ММГ, однако она менее интенсивна, чем в зоне № 2.

Зона № 2 расположена в непосредственной близости к откосной части насыпи и характеризуется увеличенной деградацией ММГ. В пределах зоны № 2 формируются термические просадки, в которых скапливаются поверхностные воды, создающие отепляющий эффект и способствующие дальнейшему оттаиванию грунтов. Деформации носят преимущественно вертикальный характер (термические просадки) и локализуются у подошвы откосов.

Зона № 3 расположена на откосной части насыпи с солнечной экспозицией склона. Она подвержена максимальному комплексу неблагоприятных факторов: влиянию насыпи, затоплению в теплый период года и интенсивной инсоляции. Сочетание этих факторов создает условия для наиболее интенсивной деградации ММГ на всем ее протяжении. Данная зона является наиболее уязвимой с точки зрения обеспечения надежности железнодорожного пути.

Зона № 4 представлена двумя видами территорий не подверженных прямому техногенному воздействию железнодорожной насыпи, но различающихся по экспозиции и степени деградации ММГ. Это участки с затененной экспозицией и сохранным мохово-торфяным покровом, выполняющим функцию природного теплоизолятора. Зона № 4 служит естественным индикатором изменения климата и может использоваться в качестве фоновой при сравнении с техногенно нарушенными участками.

Для визуализации деградации ММГ на рис. 9 для четырех временных горизонтов: 2024–2029 гг., 2024–2034 гг., 2024–2039 гг. и 2024–2044 гг., – выполнено распределение суммарной осадки дневной поверхности в поперечном профиле, где за начало отсчета по оси абсцисс принята левая грань модели. При расчетах осадки нагрузка от подвижного состава не учитывалась, что позволяет оценить влияние глобального изменения климата и криогенных процессов на развитие деформаций.

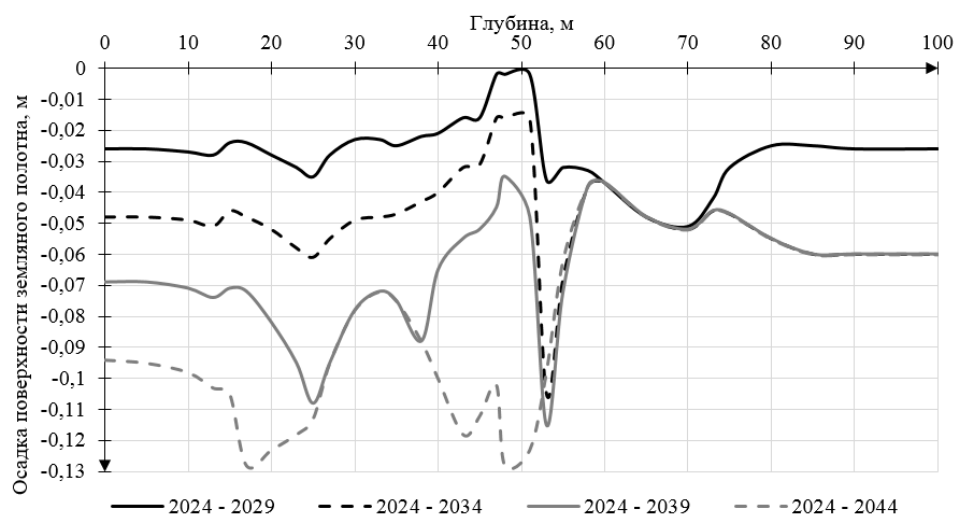


Рис. 9. Прогнозируемые значения суммарной осадки дневной поверхности при оттаивании в поперечном профиле

В течение первых пяти лет (2024–2029 гг.) осадки носят умеренный и относительно равномерный характер, локализованный преимущественно в зонах откосов. Под телом насыпи значительных деформаций не наблюдается, что свидетельствует о сохранении мерзлого состояния грунтов в этой области.

К концу десятилетнего периода (2024–2034 гг.) происходит интенсивное увеличение осадок, особенно в подоткосной части насыпи с солнечной экспозиции. Зона III полностью оттаивает, и осадка достигает своего пика на данном этапе. При этом скорость деформаций в этой зоне превышает значения в остальных участках.

На 15-летнем горизонте (2024–2039 гг.) наблюдается резкое усиление неравномерности осадок, что представляет повышенную опасность для надежности сооружения. Впервые появляется осадка под телом земляного полотна, что свидетельствует о начале оттаивания грунтов непосредственно под насыпью.

К концу 20-летнего периода (2024–2044 гг.) осадки достигают максимальных значений и обладают высокой степенью неравномерности.

Таким образом, криогенные деформации развиваются от начальной стадии локального проседания до критического состояния, характеризующегося общим прогрессирующим оттаиванием основания и развитием опасных неравномерных осадок.

Анализ результатов теплотехнического расчета и деформирования основания насыпи железнодорожного пути в условиях деградации ММГ позволил обосновать критерий целесообразности адаптационных мероприятий, основанный на выявлении границы перехода между двумя принципами использования ММГ.

На основе результатов численного моделирования установлено, что в течение первых 10 лет (2024–2034 гг.) процесс деградации ММГ носит локальный характер. В этот период под телом насыпи сохраняется мерзлое состояние грунтов, а деформации, хотя и интенсивно развиваются, остаются управляемыми и поддающимися регулированию, что позволяет эксплуатировать сооружение по I принципу.

После 10-летнего рубежа (с 2034 г.) наблюдается качественное изменение в характере криогенных процессов: начинается оттаивание грунтов непосредственно под телом насыпи, сопровождающееся значительной и неравномерной осадкой. Этот процесс указывает на переход системы в новое термодинамическое состояние, при котором восстановление и поддержание ММГ становится сложнее и экономически более затратным.

С этого момента развитие деформаций становится прогрессирующим и необратимым, а распределение осадок резко неравномерным, что создает опасность для надежности железнодорожного пути. Это свидетельствует о необходимости перехода на II принцип проектирования на ММГ.

На основе результатов выполненного моделирования обоснование целесообразности применения специальных мероприятий можно выполнить в соответствии с критерием недостижения допустимых осадок в связи с оттаиванием ММГ при глобальном изменении климата, который может быть выражен неравенством:

$$k_d = \frac{S_{sub}^i}{S_{lim}} \geq 1, \quad (1)$$

где S_{sub}^i – осадка основания сооружения на i год теплотехнического расчета;

S_{lim} – допустимая осадка основания сооружения в связи с оттаиванием ММГ.

Стоит отметить, что благодаря такому критерию можно выбрать очередность выполнения работ на линейно-протяженных объектах, так как осадка основания сооружения на разных участках будет достигать допустимых значений на различный год теплотехнического расчета.

Однако такие специальные мероприятия могут быть направлены как на поддержание I принципа проектирования на ММГ (замораживание), так и на переход ко II принципу проектирования на ММГ (оттаивание). В таком случае необходимо выполнить дополнительную проверку по технико-экономическому обоснованию термостабилизации грунтов. В этом случае предлагается эффективность термостабилизации оценивать через коэффициент теплообмена термостабилизаторов. Так критерий возможности сохранения I принципа проектирования на ММГ можно сформулировать следующим образом: эффективность термостабилизации достигается при поднятии границы ММГ до необходимого уровня с учетом глобального изменения климата и ограничивается значением коэффициента теплообмена, при котором технико-экономическая эффективность термостабилизации снижается при изменении параметров термостабилизаторов в сравнении с переходом на II принцип проектирования на ММГ, что может быть представлено в виде неравенств:

$$\alpha_{min} < \alpha \leq \alpha_{lim}, \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{lim}} \leq \alpha_{\text{max}}, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплообмена термостабилизатора, необходимый для поднятия ММГ до нужного уровня;

α_{min} – минимальный коэффициент теплообмена термостабилизатора, принимаемый 2 Вт/К·м²;

α_{lim} – предельный коэффициент теплообмена термостабилизатора, после которого снижается технико-экономическая эффективность в сравнении с переходом на II принцип проектирования на ММГ;

α_{max} – максимальный коэффициент теплообмена термостабилизатора, принимаемый 20 Вт/К·м².

Указанные предельные значения коэффициента теплообмена приняты на основе анализа технических характеристик, наиболее распространенных двухфазных термосифонов, функционирующих на основе парорефрижераторных циклов. Нижний порог соответствует минимальной эффективности пассивных охлаждающих устройств при неблагоприятных условиях теплоотдачи, тогда как верхний порог отражает предельную интенсивность теплопереноса, достижимую для серийных конструкций термосифонов при оптимальном режиме фазовых переходов теплоносителя [13, 14].

При этом переход ко II принципу проектирования на ММГ с использованием мероприятий по принудительному оттаиванию на эксплуатируемых сооружениях может быть выполнен только в случае отсутствия слабых и длительно консолидирующих грунтов, попадающих в область оттаивания, что связано с возможным значительным деформированием основания сооружения. В случае наличия таких грунтов необходимо прибегать к специальным мероприятиям, позволяющим осуществить плавный переход от I принципа ко II без допущения снижения надежности и дополнительных скачкообразных деформаций сооружения до завершения консолидации грунтов.

Так, авторами обоснован критерий целесообразности адаптационных мероприятий, который определяется наступлением момента перехода от локального оттаивания ММГ в подоткосных зонах к началу деградации непосредственно под телом земляного полотна, сопровождающимся интенсивными и неравномерными осадками; до этого момента сохраняется техническая возможность и экономическая целесообразность адаптационных мероприятий с эксплуатацией по I принципу, после него – ставится обоснованный переход на II принцип с учетом полного оттаивания основания и переработкой условий эксплуатации и мониторинга сооружения.

Заключение

Подтверждена возможность распространения базовой (ранее разработанной) геокриологической модели на другие участки транспортной инфраструктуры на основе сопоставления результатов инженерно-геокриологического мониторинга и результатов численного моделирования. Средние значения отклонений температур по всем скважинам находятся в пределах допустимой погрешности (0,1 °C) и изменяется от 0,06 до 0,1 °C.

Проведен прогнозный расчет деградации ММГ на период с 2024 по 2044 гг. с использованием программного комплекса. Получены данные о динамике изменения температурного поля и положения кровли многолетнемерзлых грунтов, а также осадки сооружения.

На основе анализа динамики изменения температурного поля и осадки сооружения выделены четыре характерные зоны, отличающиеся по интенсивности криогенных процессов и уровню деформационной угрозы в период с 2024 по 2044 год. Такое пространственное разделение позволяет учитывать неоднородность криогенных процессов при обосновании адаптационных мероприятий и организации системы инженерно-геокриологического мониторинга.

Предложен критерий обоснования целесообразности адаптационных мероприятий, позволяющий корректно определить дальнейший принцип проектирования на ММГ в условиях глобального изменения климата.

Список литературы

- 1 Андреева, Т. С. Цена курса не изменит / Т. С. Андреева // РЖД-Партнер. – 2019. – № 11–12. – С. 399–400. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/publications/rzd-partner/-11-12-399-400-iyun-2019/tsena-kursa-ne-izmenit/> (дата обращения: 12.04.2026).
- 2 Permafrost Degradation Threatening the Qinghai – Xizang Railway / Q. Wu, W. Ma, Y. Lai,

References

- 1 Andreeva, T. S. The price trend will not change the way / T. S. Andreeva // RZD-Partner. – 2019. – No. 11–12. – P. 399–400. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/publications/rzd-partner/-11-12-399-400-iyun-2019/tsena-kursa-ne-izmenit/> (date of access: 04/12/2026).
- 2 Permafrost Degradation Threatening the Qinghai – Xizang Railway / Q. Wu, W. Ma, Y. Lai, G. Cheng

G. Cheng // Engineering. – 2025. – Vol. 49. – P. 177–189. – ISSN 2095-8099. – DOI 10.1016/j.eng.2024.01.023.

3 Обоснование системы инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемых насыпей линейных транспортных сооружений в условиях Ямало-Ненецкого автономного округа / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, Д. А. Усов, Р. С. Печенкин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1 (73). – С. 68–76. – DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_68.

4 **Liston, G.** A snow-transport model for complex terrain / G. Liston, M. Sturm // Journal of Glaciology. – 1998. – Vol. 44 (148). – P. 498–516. – DOI 10.3189/S0022143000002021.

5 **Qingbai, W.** The thermal effect of differential solar exposure on embankments along the Qinghai – Tibet Railway / W. Qingbai, L. Yongzhi, H. Zeyong // Cold Regions Science and Technology. – 2011. – Vol. 66 (1). – P. 30–38. – ISSN 0165-232X. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.01.001> (дата обращения: 12.04.2026).

6 Sunny-shady slope effect on the thermal and deformation stability of the highway embankment in warm permafrost regions / Yaling Chou, Yu Sheng, Yuwen Li [et al.] // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – Vol. 63 (1–2). – P. 78–86. – ISSN 0165-232X. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.001> (дата обращения: 12.04.2026).

7 **Ланис, А. Л.** Геокриологическое моделирование системы «сооружение – основание» в условиях деградации многолетнемерзлых грунтов / А. Л. Ланис, Д. А. Усов, Е. И. Нагаев // Construction and Geotechnics. – 2025. – Т. 16, № 4. – С. 46–63. – DOI 10.15593/2224-9826/2025.4.04.

8 Социальная устойчивость регионов российского Севера и Арктики : оценка и пути достижения / Е. П. Башмакова, И. А. Гущина, Д. Л. Кондратович [и др.]. – Апатиты : Колеский научный центр Российской академии наук, 2018. – 169 с. – ISBN 978-5-91137-384-9.

9 **Cheng, G.** Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau / G. Cheng, T. Wu // Journal of Geophysical Research : Earth Surface. – 2007. – Vol. 112, F02S03. – DOI 10.1029/2006JF000631.

10 **Wu, Q.** Engineering geological characteristics and processes of permafrost along the Qinghai – Xizang (Tibet) Highway / Q. Wu, B. Shi, H.-Y. Fang // Engineering Geology. – 2003. – Vol. 68. – P. 387–396.

// Engineering. – 2025. – Vol. 49. – P. 177–189. – ISSN 2095-8099. – DOI 10.1016/j.eng.2024.01.023.

3 Substantiation of the engineering-geocryological monitoring system for operated embankments of linear transport facilities in the conditions of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug / A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, D. A. Usov, R. S. Pechenkin // The Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport. – 2025. – No. 1 (73). – P. 68–76. – DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_68.

4 **Liston, G.** A snow-transport model for complex terrain / G. Liston, M. Sturm // Journal of Glaciology. – 1998. – Vol. 44 (148). – P. 498–516. – DOI 10.3189/S0022143000002021.

5 **Qingbai, W.** The thermal effect of differential solar exposure on embankments along the Qinghai – Tibet Railway / W. Qingbai, L. Yongzhi, H. Zeyong // Cold Regions Science and Technology. – 2011. – Vol. 66 (1). – P. 30–38. – ISSN 0165-232X. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.01.001> (date of access: 04/12/2026).

6 Sunny-shady slope effect on the thermal and deformation stability of the highway embankment in warm permafrost regions / Yaling Chou, Yu Sheng, Yuwen Li [et al.] // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – Vol. 63 (1–2). – P. 78–86. – ISSN 0165-232X. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.001> (date of access: 04/12/2026).

7 **Lanis, A. L.** Geocryological modeling of the “structure – foundation” system under conditions of permafrost degradation / A. L. Lanis, D. A. Usov, E. I. Nagaev // Construction and Geotechnics. – 2025. – Vol. 16, No. 4. – P. 46–63. – DOI 10.15593/2224-9826/2025.4.04.

8 Social sustainability of the regions of the Russian North and the Arctic : assessment and ways of achievement / E. P. Bashmakova, I. A. Gushchina, D. L. Kondratovich [et al.]. – Apatity : Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2018. – 169 p. – ISBN 978-5-91137-384-9.

9 **Cheng, G.** Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau / G. Cheng, T. Wu // Journal of Geophysical Research : Earth Surface. – 2007. – Vol. 112, F02S03. – DOI 10.1029/2006JF000631.

10 **Wu, Q.** Engineering geological characteristics and processes of permafrost along the Qinghai – Xizang (Tibet) Highway / Q. Wu, B. Shi, H.-Y. Fang // Engineering Geology. – 2003. – Vol. 68. – P. 387–396.

11 Comparison of permafrost degradation under natural ground surfaces and embankments of the Qinghai – Tibet Highway / F. Yu, J. Qi, X. Yao, Y. Liu // Cold Regions Science and Technology. – 2015. – Vol. 114. – P. 1–8.

12 Projection of Regional Climate Change for 2023–2064 In The Northern Part of the Western Russian Arctic : A Support for Russian Railways / A. G. Kostianoy, A. D. Gvishiani, S. A. Lebedev [et al.] // Geography, Environment, Sustainability. – 2025. – Vol. 4 (18). – P. 61–79. – URL: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2025-4179> (дата обращения: 12.04.2026).

13 **Ибрагимов, Э. В.** Экспериментальные исследования инновационных конструкций полонаклонных конструкций термостабилизаторов грунта / Э. В. Ибрагимов, Я. А. Кроник, Е. В. Куплинова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 4 (45). – № 3. – С. 208–220.

14 Сравнительная оценка эффективности работы двухфазных термосифонов для термостабилизации грунтов в криолитозоне / Р. М. Баясан, А. Д. Лобанов, Т. В. Баясан, С. И. Голубин // Инженерные изыскания. – 2012. – № 7. – С. 61–63. – ISSN 1997-8650.

11 Comparison of permafrost degradation under natural ground surfaces and embankments of the Qinghai – Tibet Highway / F. Yu, J. Qi, X. Yao, Y. Liu // Cold Regions Science and Technology. – 2015. – Vol. 114. – P. 1–8.

12 Projection of Regional Climate Change for 2023–2064 In The Northern Part of the Western Russian Arctic : A Support for Russian Railways / A. G. Kostianoy, A. D. Gvishiani, S. A. Lebedev [et al.] // Geography, Environment, Sustainability. – 2025. – Vol. 4 (18). – P. 61–79. – URL: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2025-4179> (date of access: 04/12/2026).

13 **Ibragimov, E. V.** Experimental studies of innovative designs of hollow-inclined soil thermal stabilizer structures / E. V. Ibragimov, Ya. A. Kronik, E. V. Kuplinova // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Building. – 2014. – No. 4 (45). – No. 3. – P. 208–220.

14 Comparative assessment of the performance of two-phase thermosyphons for thermal stabilization of soils in the cryolithic zone / R. M. Bayasan, A. D. Lobanov, T. V. Bayasan, S. I. Golubin // Engineering Survey. – 2012. – No. 7. – P. 61–63. – ISSN 1997-8650.

E. I. Nagaev, D. A. Usov, A. L. Lanis, D. V. Velichko

JUSTIFICATION OF THE FEASIBILITY OF ADAPTATION MEASURES FOR PERMAFROST DEGRADATION IN THE FOUNDATIONS OF TRANSPORT STRUCTURES

Abstract. In the context of climate change, ensuring the sustainable operation of transport infrastructure located in permafrost zones has become particularly urgent. For structures operated according to Principle I (maintaining the frozen state of the ground), rising average annual temperatures create the conditions for permafrost degradation. This leads to the development of cryogenic deformations and reduction in the reliability and safety of the structures. This article presents the results of geocryological modeling of the "structure-foundation" system on the Chum-Labytnangi railway section in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, conducted using specialized software packages. The possibility of extending the basic geocryological model to other sections of transport infrastructure was confirmed by comparing numerical modeling results with engineering-geocryological monitoring data; including temperature measurements in boreholes not exceeding 0.1°C. Based on the analysis of temperature fields and deformations, a criterion for the feasibility of adaptation measures is substantiated. The obtained results have practical significance for substantiating a long-term strategy for adapting transport infrastructure to climate change.

Keywords: degradation of permafrost soils, predictive modeling, railway track, cryogenic deformations, climate change.

For citation: Justification of the feasibility of adaptation measures for permafrost degradation in the foundations of transport structures / E. I. Nagaev, D. A. Usov, A. L. Lanis, D. V. Velichko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 48–60. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_48.

Сведения об авторах**Нагаев Егор Игоревич**

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

Усов Дмитрий Андреевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: usovda96@yandex.ru

Ланис Алексей Леонидович

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

Величко Дмитрий Валерьевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: velichko@stu.ru

Information about the authors**Nagaev Egor Igorevich**

Siberian Transport University (STU),
Chair “Railway Track and Track Facilities”,
Postgraduate Student,
e-mail: einagaev@mail.ru

Usov Dmitry Andreevich

Siberian Transport University (STU),
Chair “Railway Track and Track Facilities”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: usovda96@yandex.ru

Lanis Alexey Leonidovich

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

Velichko Dmitry Valerievich

Siberian Transport University (STU),
Chair “Railway Track and Track Facilities”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: velichko@stu.ru

Д. А. Пятков

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПОДСИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КАК ШАГ К ЦИФРОВОМУ ДВОЙНИКУ (СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЕ) ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Аннотация. Проанализирован железнодорожный путь как сложная техническая система, управление которой базируется на регламентных подходах, ограничивающих предиктивный контроль критических участков. Применен комплекс методов системного анализа: структурная декомпозиция, функционально-структурный анализ, классификация и многокритериальный анализ. Выявлены иерархические взаимосвязи элементов верхнего и нижнего строения, установлен каскадный характер деградации, где неисправность нижележащего элемента выступает первичным фактором разрушения вышележащих. Обосновано разделение компонентов на критические (обеспечивающие мгновенную безопасность) и фундаментальные (определяющие долгосрочную устойчивость). Предложена многоуровневая модель жизненного цикла, устанавливающая дискретную шкалу состояний, коррелирующую с вероятностью отказа. Разработана концепция гибридного цифрового двойника, интегрирующего стационарные сенсорные сети и данные подвижных диагностических комплексов.

Ключевые слова: цифровой двойник, железнодорожный путь, системный анализ, оптимизация процессов диагностики, железнодорожный транспорт, методы системного анализа.

Для цитирования: Пятков, Д. А. Системный анализ подсистемы железнодорожной инфраструктуры как шаг к цифровому двойнику (стационарной системе) железнодорожного пути / Д. А. Пятков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 61–72. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_61.

Введение

Железнодорожный транспорт обеспечивает стратегическую мобильность и национальную безопасность РФ. В условиях роста грузонапряженности и скоростей на Восточном полигоне вопросы бесперебойности перевозок выходят на первый план [1]. Ключевой элемент – состояние путевого хозяйства, обслуживание которого базируется на регламентах и визуальном контроле, что не позволяет прогнозировать критические дефекты. На участках с многолетнемёрзлыми грунтами циклы оттаивания-промерзания инициируют неравномерные осадки и сплывы земляного полотна, формируя зоны перманентного риска [2].

Индустрия 4.0 предлагает управление активами на основе данных. Перспективный инструмент «цифровой двойник» (ЦД) – виртуальная динамическая модель, синхронизированная с объектом [3–8]. Однако ЦД на основе только подвижных средств имеет ограничения: дискретность измерений и невозможность контроля стационарных объектов (деформаций земляного полотна, смещений опор). Актуальна разработка стационарной системы ЦД для локальных критических участков.

Цель – системный анализ железнодорожного пути для построения стационарного ЦД, обеспечивающего непрерывный мониторинг и предиктивное управление.

Научная новизна – системно-ориентированная методология перехода к стационарному ЦД с многоуровневой моделью жизненного цикла, увязанной с нормативами.

Практическая значимость – структурированные требования к распределённым системам мониторинга для пилотных зон на БАМе и Транссибе.

Системный анализ конструкции железнодорожного пути

Железнодорожный путь – интегрированная система взаимосвязанных подсистем верхнего и нижнего строения. Схема связей представлена на рис. 1.

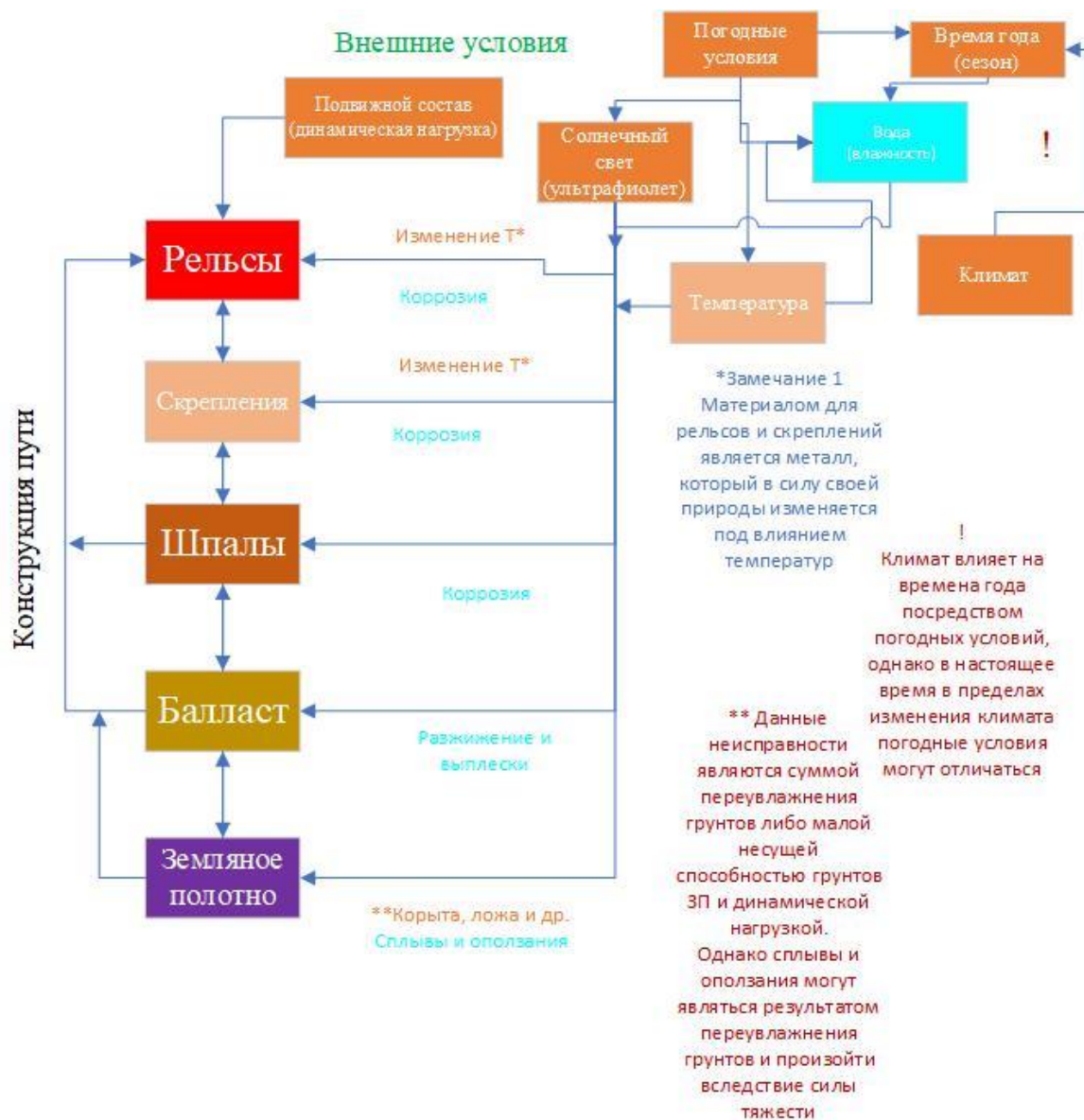


Рис. 1. Взаимосвязи элементов конструкции железнодорожного пути

Рельсы воспринимают нагрузку от колёс, направляют движение. Дефекты вызывают ударные нагрузки, разрушающие нижележащие элементы. Скрепления обеспечивают соединение рельсов со шпалами и ширину колеи. Шпалы передают нагрузку на балласт [9]. Балластная призма распределяет нагрузку, отводит воду. Земляное полотно – фундамент пути; его деформации вызывают системные нарушения всей конструкции.

Основополагающая закономерность: неисправность нижележащего элемента – первичный фактор, ускоряющий неисправности вышележащих. Деградация земляного полотна носит каскадный характер. Системный анализ элементов представлен в табл. 1.

Выявленные системные зависимости включают каскадный эффект – проблема в одной подсистеме вызывает ускоренную деградацию других. Пример: загрязнение балласта → ухудшение дренажа → накопление воды → просадка или пучина → нарушение геометрии → повышенная динамическая нагрузка → ускоренный износ рельсов, креплений и шпал. Также выделяется проблема «невидимых» дефектов (скрытые дефекты в рельсах, коррозия опор), не проявляющихся визуально до перехода в критическую стадию, и временное воздействие – между причиной и следствием может проходить значительное время. Эффективный ЦД должен объединять геометрические, дефектоскопические, динамические данные, данные о состоянии грунта и гидрометеорологию.

Таблица 1

**Системный анализ конструкции железнодорожного пути:
проблемы, риски, данные, мероприятия и факторы**

Подсистема / элемент	Ключевые проблемы	Последствия/ риски	Необходимые данные для мониторинга и ЦД	Мероприятия ликвидации	Факторы влияния на элемент (подсистему)
1	2	3	4	5	6
<i>Верхнее строение пути</i>					
Рельсы	1 Усталостные дефекты: головки, болтовые отверстия, подшвы. 2 Износ: вертикальный, боковой. 3 Дефекты поверхности: износ, выкрашивание, коррозия. 4 Нарушения целостности: поперечные и продольные трещины	Снижение прочности, риск излома рельса, ухудшение плавности хода, повышенные динамические нагрузки, шум	Геометрия пути: профиль головки, ширина колеи, уровень, возвышение и понижение рельсов и пути. Дефектоскопия: данные ультразвукового контроля (УЗК). Динамика: ускорения, силы взаимодействия с колесом	Дефект – замена, шлифовка рельса; при нарушении геометрии: устранение путем замеров, геометрии рельсового пути	Динамическая нагрузка, состояние земляного полотна (ЗП) и балласта (пучины, просадки; загрязненность (разжижение и выплески))
Рельсовые скрепления	1 Ослабление затяжки: болтов, клемм. 2 Поломка элементов: пружинных зажимов и других элементов скрепления. 3 Коррозия. 4 Потеря упругих свойств	Нарушение электрической изоляции, повышенная вибрация, нарушение геометрии пути	Визуальные данные: фото/видеофиксация. Момент затяжки: данные с динамометрических ключей. Электрические параметры: сопротивление изоляции	При слабом креплении – затяжка до нормативных значений; при неисправности компонентов – замена	Динамическая нагрузка Состояние геометрии пути Состояния ЗП и балласта (пучины, просадки; загрязненность (разжижение и выплески))
Шпалы (деревянные, железобетонные)	1 Механический износ: подрельсовые площадки, трещины. 2 Гниение (дерево), коррозия арматуры (ж/б). 3 Потеря поперечной устойчивости. 4 Неравномерное опирание на балласт	Нарушение положения рельсовой нити, неравномерное распределение нагрузок на балласт, ускоренное расстройство пути	Визуальные данные: фото/видеофиксация. Геометрия: положение в плане и по высоте	Замена	Динамическая нагрузка Состояние геометрии пути Состояния ЗП и балласта (пучины, просадки; загрязненность (разжижение и выплески))
Балластная призма	1 Загрязнение: пыление, заиливание. 2 Потеря дренирующих свойств (как следствие 1-й проблемы, см. выше). 3 Выпучивание и просадки. 4 Образование пустот под шпалами	Снижение устойчивости пути, застой воды, ускоренное накопление остаточных деформаций, неравномерная жесткость пути	Геометрия: ровность пути, продольный профиль. Жесткость: динамические отклики на нагрузку. Визуальный анализ: загрязненность	При загрязнении: «грохотка», либо досыпка нового балласта, как правило, данные мероприятия носят сопряженный характер	Динамическая нагрузка Состояния верхних элементов пути и ЗП Содержание воды (природные осадки, состояния водопропускных и водоотводящих сооружений)
<i>Нижнее строение пути</i>					
Земляное полотно	1 Просадки и неравномерные осадки. 2 Разжижение грунтов. 3 Сплывы и оползни откосов. 4 Морозное пучение	Потеря несущей способности, деформации верхнего строения пути, катастрофические нарушения геометрии пути	Данные вертикальных и горизонтальных смещений. Гидрология: уровень грунтовых вод	Укрепление откосов путем возведения дополнительных насыпей, георешетка, бетонные конструкции	Геология грунтов и вода Динамическая нагрузка

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
Мосты	1 Деформации пролетных строений: прогиб. 2 Износ опорных частей. 3 Трещины в элементах. 4 Коррозия арматуры и металлоконструкций. 5 Скалывание опор (размыв)	Снижение несущей способности, риск обрушения	Геометрия (прогибы). Динамика: частоты и амплитуды колебаний. Трещины: датчики раскрытия трещин. Коррозия элементов. Смещение опор	Замена элементов, ремонт	Вода и геология грунтов, климатические условия. Динамическая нагрузка
Тоннели	1 Деформации обделки: сжимимость, выпучивание. 2 Нарушение гидроизоляции, протечки. 3 Трещины в бетоне. 4 Осадки поверхности над тоннелем	Ухудшение состояния конструкции, обрушение обделки, затопление, нарушение габарита	Геометрия (контур обделки). Смещения элементов. Гидрология: датчики протечек, влажности. Вибрация от движения поездов. Осадки: нивелирование поверхности	Замена элементов, ремонт	Вода и геология грунтов, климатические условия. Динамическая нагрузка
Водопроточные трубы	1 Засорение и заиливание. 2 Деформации и разрушения звеньев. 3 Размыв входного/выходного оголовков. 4 Просадки грунта над трубой (ложный путь)	Подтопление земляного полотна, размыв насыпи, провал пути	Визуальный мониторинг. Геометрия: просадки пути над трубой. Гидрология: уровень воды на входе/выходе. Целостность: данные внутреннего осмотра	Замена элементов, ремонт	Вода и геология грунтов, климатические условия. Динамическая нагрузка
Водоотводные сооружения (дренажи, канавы)	1 Засорение и разрушение. 2 Недостаточная пропускная способность	Подтопление земляного полотна и балласта, снижение устойчивости, ускорение процессов морозного пучения и сплывов	Визуальный мониторинг. Данные об осадках. Уровень воды в канавах	Замена элементов, ремонт	Геология грунтов и вода. Климатические условия
<i>Сопутствующее динамическое воздействие</i>					
Взаимодействие «путь – экипаж»	1 Повышенные динамические нагрузки. 2 Резонансные явления. 3 Неравномерная жесткость пути	Ускоренное накопление повреждений всех элементов пути, дискомфорт пассажиров, риск схода с рельсов	Динамические параметры: вертикальные и горизонтальные ускорения, силы. Данные с подвижного состава: датчики путеизмерительных вагонов	Уменьшение скорости при плохих условиях видимости и состоянии пути	Техническое состояние железнодорожного пути (ВСП и НСП)

Системный анализ железнодорожного пути как сложной технической системы

Развивая методологию системного анализа, представляется обоснованным декомпозировать путь как сложную техническую систему на совокупность критических и фундаментальных компонентов. Соответствующая схема представлена на рис. 2.

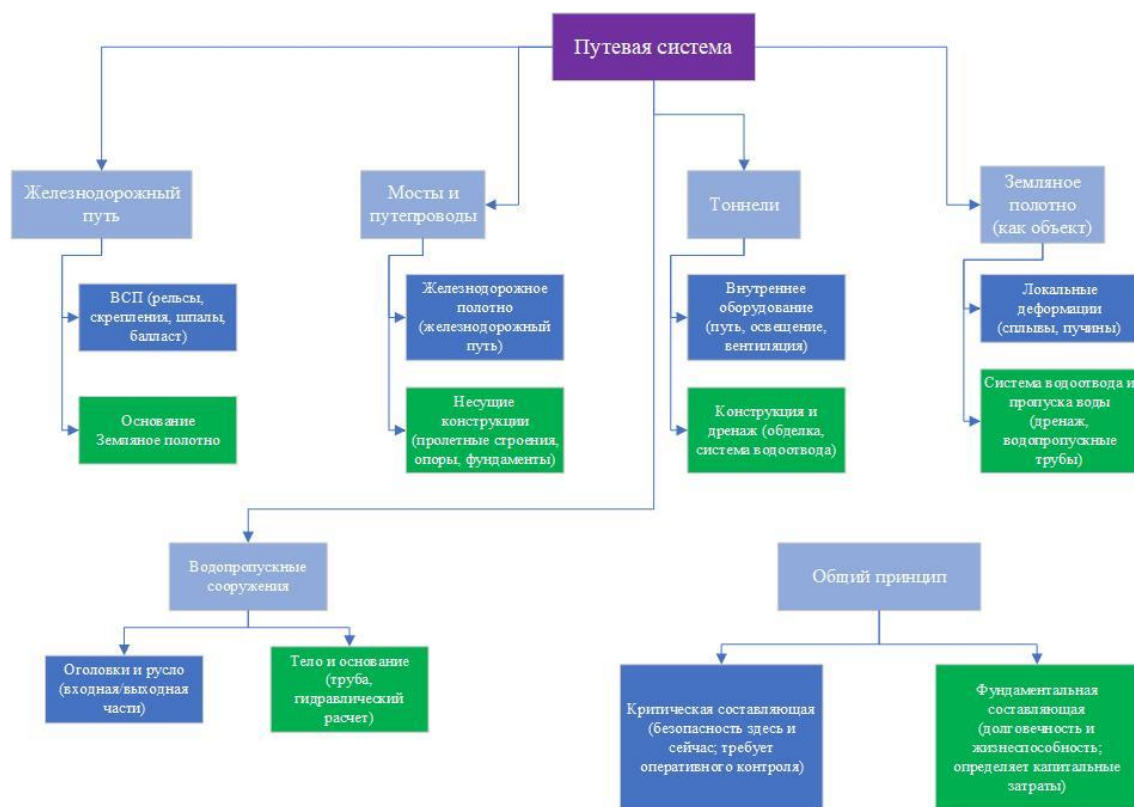


Рис. 2. Системный анализ железнодорожного пути как системы

Интерпретация и описание представленной схемы приведены ниже.

1 Железнодорожный путь (ВСП + земляное полотно)

- Критическая составляющая: верхнее строение пути (ВСП) – рельсы, скрепления, шпалы, балласт. Их целостность гарантирует безопасность здесь и сейчас;
- Фундаментальная составляющая: земляное полотно – основа всей трассы. Его стабильность – условие существования пути на десятилетия.

2 Мосты и путепроводы (искусственные сооружения)

- Критическая составляющая: рельсошпальная решётка на мосту, барьерные ограждения;
- Фундаментальная составляющая: пролётные строения, опоры и фундаменты.

3 Тоннели

- Критическая составляющая: путь, водоотвод, контактная сеть, состояние обделки;
- Фундаментальная составляющая: обделка тоннеля, дренажная система за обделкой.

4 Земляное полотно (как отдельный объект системы)

- Критическая составляющая: локальные деформации (сплывы, пучины);
- Фундаментальная составляющая: конструкция в целом (откосы, дренаж, укрепления).

5 Водопропускные сооружения (трубы, малые мосты)

- Критическая составляющая: входной и выходной оголовки, русло на входе/выходе;
- Фундаментальная составляющая: тело трубы (звенья) или опоры малого моста, а также основание (фундамент) под ними.

Принцип: неисправность диагностируется от критической ветви (симптом) к фундаментальной (первопричина). Критические компоненты – объекты непрерывного мониторинга; фундаментальные – прогнозного моделирования долгосрочной деградации.

Системный анализ уровней жизненного цикла железнодорожного пути

Эксплуатация пути – процесс управляемой деградации и восстановления. Модель жизненного цикла представлена на рис. 3.

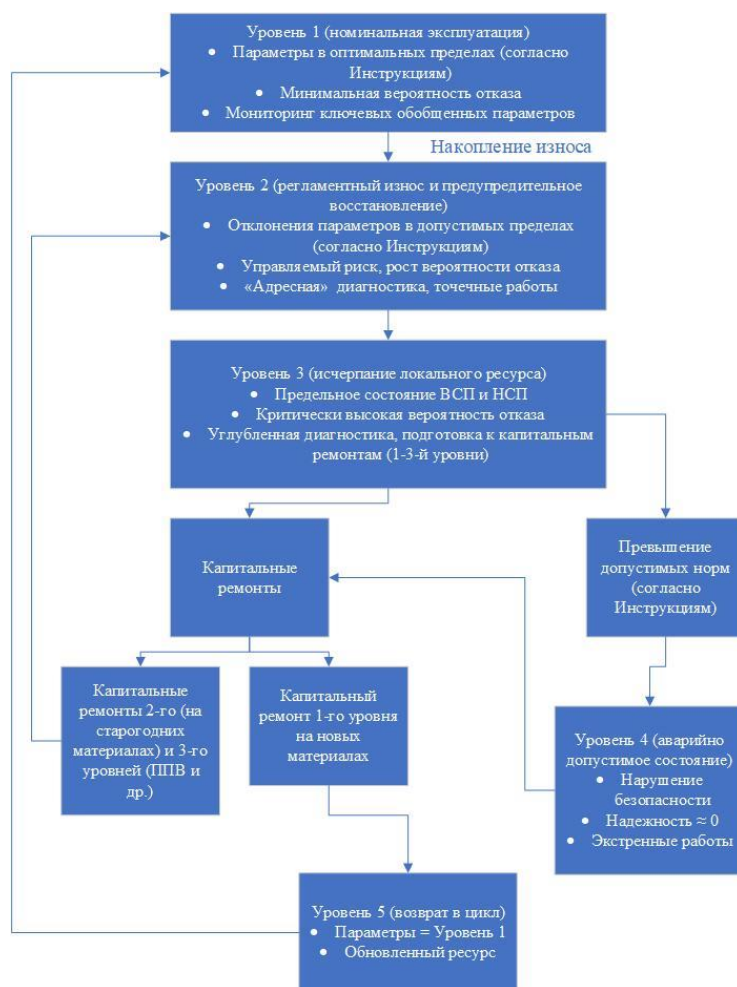


Рис. 3. Жизненный цикл железнодорожного пути

Уровень 1. Номинальная эксплуатация. Параметры оптимальны. Вероятность отказа минимальна.

Уровень 2. Регламентное обслуживание. Параметры в пределах предупредительных норм. Вероятность отказа повышена, но управляема.

Уровень 3. Исчерпание ресурса. Элементы у предельного износа. Вероятность отказа критически высока. Требуется капремонт.

Уровень 4. Аварийный. Движение запрещено. Отказ произошёл или неизбежен.

Уровень 5. После капвосстановления. Ресурс обновлён.

Уровни образуют цикл 1→2→3→5→1 с порогом уровня 4. Задача ЦД – прогноз переходов между уровнями, что позволяет перейти к предиктивному управлению [10]. Нормативные пороги – встроенные правила модели.

Концепция цифрового двойника железнодорожного пути

Архитектура ЦД предполагает двухуровневую структуру (техническую и программную подсистемы). Основные компоненты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Подсистемы предлагаемого цифрового двойника

Компонент/устройство	Основная задача
<i>1 Слой сбора данных (техническая система)</i>	
Тензодатчики	Напряжения и нагрузки
Акселерометры («умные шпалы»)	Вибрации, состояние балласта
Датчики температуры	Контроль температурного режима
Датчики смещения	Стабильность земполотна и ИССО

Окончание табл. 2

2 Слой передачи данных (стационарная сеть)	
Промышленные коммутаторы и маршрутизаторы	Образование локальной вычислительной сети (ЛВС) вдоль пути для агрегации данных с датчиков
Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС)	Обеспечение высокоскоростной и защищенной передачи больших объемов данных от сенсорной сети к центру обработки.
Полевые шлюзы и концентраторы данных	Сбор, предварительная обработка и передача данных от групп датчиков в основную сеть.
3 Слой платформы и моделей (вычислительное ядро)	
Серверы	Хранение и обработка
Физ.-мат. модель	Прогнозирование износа
3D/BIM, ГИС	Визуализация, привязка
4 Слой аналитики и управления	
Аналитический модуль	Прогноз ресурса пути, классификация дефектов
Система поддержки принятия решений	Формирование оптимальных графиков обслуживания, ремонтных кампаний и автоматизация планирования ресурсов (техника, материалы)
Единая панель управления	Графики, тревоги
Модуль управления жизненным циклом	Учет всей истории эксплуатации

Требования к свойствам ЦД систематизированы в таблице 3.

Таблица 3

Свойства цифрового двойника как системы

Свойство/атрибут	Сущность свойства	Аргументация
Достоверность	Соответствие модели прототипу	Точное моделирование напряжений
Масштабируемость	От элемента до сети	Позапное расширение
Интегративность	Объединение разнородных данных	Единое «окно истины»
Актуальность	Минимальная задержка	Безопасность, мгновенное реагирование
Прогностичность	Прогноз ресурса и отказов	Переход к предиктивному обслуживанию
Имитационное моделирование	Сценарии «что, если»	Оценка рисков в цифровой среде
Наглядность	2D/3D, цветовые кодировки	Быстрая оценка обстановки
Надёжность	24/7/365, резервирование	Недопустимость отказа
Безопасность данных	Защита от кибератак	Целостность критической информации
Открытость	Стандартизированные API	Подключение новых технологий
Автономность	Автоматическое управление	Сокращение времени реакции

Возможности внедрения ЦД в конструкцию пути – в таблице 4.

Таблица 4

Возможности внедрения системы ЦД в конструкцию железнодорожного пути

Конструкция	Состав конструкции (строения)	Элементы конструкции (части)	Параметр части	Возможность применения датчиков ЦД
Железнодорожный путь	Верхнее строение пути	Рельсы	Геометрия пути и рельсов, износ	Датчики позиционирования
		Скрепления	Затяжка, состояние	Смарт-шайбы
		Шпалы	Состояние (трещины, износ)	«Умные» шпалы
		Балласт	Загрязненность, толщина	Датчики, влажности
		Песчаная подушка	Толщина	—*
	Нижнее строение пути	Земляное полотно	Состояние, параметры откосов	Датчики позиционирования
		ИССО	Состояние, параметры элементов (балки, свод и др.)	Датчики позиционирования

* – возможна установка при капремонте.

Внедрение технически реализуемо и не создаёт помех движению. Прогнозируемые результаты и перспективы – в таблице 5.

Таблица 5

Прогнозируемые результаты и перспективные направления внедрения системы

Аспект	Результаты работы (краткосрочный и среднесрочный эффект)	Перспективы (долгосрочное развитие и трансформация)
1	2	3
Безопасность и надежность	• Снижение количества отказов и аварийных ситуаций за счет раннего выявления критических дефектов. • Автоматическое ограничение скорости на деградирующих участках пути, исключая человеческий фактор. • Постоянный мониторинг состояний пути и искусственных сооружений (мостов, тоннелей) в реальном времени.	• Переход к проактивной безопасности: система предсказывает и предотвращает инциденты до самой возможности их возникновения. • Создание «иммунной системы» инфраструктуры, способной адаптироваться к чрезвычайным ситуациям (например, автоматически усиливать мониторинг при угрозе паводка)
Техническое обслуживание и ремонты	• Сокращение затрат на ТОиР (техобслуживание и ремонты) за счет оптимизации сроков и объемов работ. • Увеличение межремонтных циклов благодаря точному прогнозу остаточного ресурса. • Минимизация «окон» и простоев инфраструктуры за счет точечного текущего ремонта.	• Полный переход к предиктивно-адаптивной модели обслуживания: ремонты выполняются строго по фактическому состоянию, а не по графику. • Внедрение роботизированных комплексов для автономного ремонта, которые получают задания напрямую от ЦД
Экономическая эффективность	• Снижение прямых расходов на материалы и зарплаты ремонтных бригад. • Снижение логистических издержек за счет уменьшения скоростных ограничений и более равномерного износа пути. • Оптимизация запасов МТР (материально-технических ресурсов): точное прогнозирование потребности в рельсах, шпалах, скреплениях.	• Максимизация пропускной способности пути за счет динамического управления его состоянием и прогнозирования нагрузки. • Создание цифрового рынка услуг ТОиР, где ЦД автоматически проводит тендеры среди подрядчиков на основе анализа их предложений и репутации
Управление и планирование	• Единое информационное пространство для всех служб (путь, мосты, энергетика, движение). • Обоснованное планирование капитальных ремонтов и модернизаций на основе объективных данных. • Повышение прозрачности использования бюджетных средств.	• Создание «Операционного центра будущего» с полностью цифровым двойником всей сети для сквозного управления перевозками и инфраструктурой. • Внедрение AI-оптимизаторов, которые самостоятельно балансируют между износом пути, графиком движения и экономическими показателями. • Сквозное планирование «от грузоотправителя до получателя» с учетом состояния инфраструктуры
Данные и технологии	• Накопление структурированного цифрового досье на каждый метр пути за весь жизненный цикл. • Создание надежной платформы для интеграции данных с дронов, дефектоскопных вагонов, стационарных датчиков.	• Развитие в сторону когнитивной системы: ЦД не только предсказывает, но и самостоятельно формирует гипотезы о причинах деградации и предлагает инженерные решения. • Стандартизация и создание экосистемы вокруг ЦД, где сторонние разработчики могут создавать приложения и сервисы

Проведенный анализ позволяет констатировать, что внедрение предиктивной системы диагностики на основе цифрового двойника приведёт к качественной трансформации всей парадигмы управления железнодорожной инфраструктурой. Ключевым результатом станет переход от реактивной, основанной на регламентах и визуальном контроле, модели к предиктивно-адаптивной системе, функционирующей в режиме реального времени.

Интеграция цифровых железнодорожных систем

Подход на основе только подвижных средств имеет ограничения: отсутствие датчиков для стационарных объектов и дискретность данных. Необходима гибридная архитектура, объединяющая динамический и стационарный ЦД (рис. 4).



Рис. 4. Архитектура гибридного цифрового двойника

Пятиуровневая архитектура включает:

- 1 Сбор данных – мобильный (путеизмерители, дефектоскопы) и стационарный (сенсорные сети) сегменты.
- 2 Транспортный – передача (LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi), пограничные вычисления.
- 3 Платформенный – микросервисное ядро, временные ряды, пространственные данные.
- 4 Аналитический – ML, конечно-элементные модели, гибридные алгоритмы.
- 5 Презентационный – центр управления, визуализация, СППР.

Интеграция обеспечивает синергетическое взаимодействие моделей, взаимное дополнение и кросс-проверку показаний, повышая достоверность и отказоустойчивость системы. На основе верифицированных данных становится возможным оптимальное планирование превентивных и восстановительных мероприятий.

Выводы

Проведенный системный анализ путевой подсистемы железнодорожной инфраструктуры позволил сформировать комплексную методологическую основу для создания стационарной системы цифрового двойника. Основные результаты:

1 Фокус на критических участках с повышенной интенсивностью деградации (сложные геологические условия, критические зоны ИССО) при реализации стационарного ЦД принесёт максимальный экономический и эксплуатационный эффект, предотвращая переходы в аварийные состояния.

2 Декомпозиция пути на критические и фундаментальные компоненты выявила их различную роль в обеспечении безопасности и надёжности. Это разграничение формирует принципиальную основу для иерархической модели данных в ЦД, где каждый уровень требует специфических подходов к диагностике и прогнозированию.

3 Систематизация требований к данным выявила необходимость дополнения традиционных источников (подвижной диагностический состав) данными от стационарных сенсорных сетей. Только гибридная архитектура может обеспечить непрерывный мониторинг параметров, критичных для долговременной устойчивости пути.

4 Разработанная модель уровней жизненного цикла устанавливает прямую связь между диагностическими параметрами, нормативными порогами и управляющими воздействиями, трансформируя понятие «техническое состояние» в дискретную шкалу категорий риска – ключевое условие алгоритмизации принятия решений.

5 Предложенная гибридная архитектура ЦД формирует целостную информационную среду для поддержки обоснованных управленческих решений и перехода от регламентного обслуживания к стратегии управления по фактическому состоянию.

Список литературы

1 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [утверждена распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р (в ред. от 6 ноября 2024 г.)] // КонсультантПлюс : [справочно-правовая система]. – Москва, 2024. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/?ysclid=mr1rq5hy4248587079 (дата обращения: 24.02.2026).

2 **Ковенькин, Д. А.** Применение программного комплекса Frost 3D Universal для проведения прогнозных теплотехнических расчетов земляного полотна / Д. А. Ковенькин, Д. Н. Насников, И. С. Чернецкая // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 80–90. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-90.

3 **Sresakoolchai, J.** Track Geometry Prediction Using Three-Dimensional Recurrent Neural Network-Based Models Cross-Functionally Co-Simulated with BIM / J. Sresakoolchai, S. Kaewunruen // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – P. 391. – DOI 10.3390/s23010391.

4 Seeking a Definition of Digital Twins for Construction and Infrastructure Management / A. Aragón, M. Arquier, O. B. Tokdemir [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). – 2025. – Vol. 15, No. 3. – P. 1557. – DOI 10.3390/app15031557.

5 **Пятков, Д. А.** Цифровой двойник железнодорожного пути : актуальность, проблемы внедрения и перспективы развития / Д. А. Пятков // Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий (НТО-VI-2025) : сборник научных статей по материалам VI Всероссийской (национальной) научной конференции, Красноярск, 06–07 ноября 2025 года. – Красноярск : Общественное учреждение «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений», 2025. – С. 118–127. – EDN EUJUXC.

6 **Суслов, О. А.** Перспективные подходы к прогнозному моделированию деградационных процессов элементов верхнего строения пути и их применение при создании цифровых двойников / О. А. Суслов, В. И. Федорова // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – Т. 80, № 5. – С. 251–259. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259.

References

1 Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 [approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r (as amended dated November 6, 2024)] // ConsultantPlus : [legal reference system]. – Moscow, 2024. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/?ysclid=mr1rq5hy4248587079 (date of access: 02/24/2026).

2 **Kovenkin, D. A.** Application of the Frost 3D Universal software package for predictive thermal engineering calculations of the road-bed / D. A. Kovenkin, D. N. Nasnikov, I. S. Chernetskaya // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2022. – No. 3 (75). – P. 80–90. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-90.

3 **Sresakoolchai, J.** Track Geometry Prediction Using Three-Dimensional Recurrent Neural Network-Based Models Cross-Functionally Co-Simulated with BIM / J. Sresakoolchai, S. Kaewunruen // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – P. 391. – DOI 10.3390/s23010391.

4 Seeking a Definition of Digital Twins for Construction and Infrastructure Management / A. Aragón, M. Arquier, O. B. Tokdemir [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). – 2025. – Vol. 15, No. 3. – P. 1557. – DOI 10.3390/app15031557.

5 **Pyatkov, D. A.** The digital twin of the railway track : relevance, problems of implementation and development prospects / D. A. Pyatkov // Science, technology, society : environmental engineering in the interests of sustainable development of territories (NTO-VI-2025) : collection of scientific articles based on the materials of the VI All-Russian (national) scientific conference, Krasnoyarsk, November 06-07, 2025. – Krasnoyarsk : Public Institution «Krasnoyarsk Regional House of Science and Technology of the Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations», 2025. – P. 118–127. – EDN EUJUXC.

6 **Suslov O. A.** Promising approaches to predictive modeling of degradation processes of elements of track superstructure elements and their application in the creation of digital twins / O. A. Suslov, V. I. Fedorova // Russian Railway Science Journal. – 2021. – Vol. 80, No. 5. – P. 251–259. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259.

7 **Чаплин, И. В.** Совершенствование системы эксплуатации искусственных сооружений за счет применения цифровых двойников на примере железнодорожного моста / И. В. Чаплин, А. В. Паторняк, С. В. Ефимов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22, № 3. – С. 831–838. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-3-831-838.

8 **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.

9 **Пятков, Д. А.** Шпалы с увеличенной площадью опирания : особенности конструкции, преимущества и перспективы применения / Д. А. Пятков, В. В. Спириухов // Молодежная наука : Труды XXVIII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Красноярск, 25 апреля 2024 года. – Красноярск : Иркутский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 235–238. – EDN QJVEZF.

10 **Пюкке, Г. А.** К вопросу об использовании марковской модели деградации при диагностировании технических систем / Г. А. Пюкке // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2017. – № 3 (19). – DOI 10.18454/2079-6641-2017-19-3-50-61. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-ispolzovanii-markovskoy-modeli-degradatsii-pri-diagnostirovanii-tehnicheskikh-sistem> (дата обращения: 15.02.2026).

7 **Chaplin, I. V.** Improvement of the system of operation of artificial structures through the use of digital twins on the example of a railway bridge / I. V. Chaplin, A. V. Patornyak, S. V. Efimov // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2025. – Vol. 22, No. 3. – P. 831–838. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-3-831-838.

8 **Shevchenko, D. V.** Methodology of building digital doubles 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.

9 **Pyatkov, D. A.** Sleepers with an increased support area : design features, advantages and application prospects / D. A. Pyatkov, V. V. Spiryukhov // Youth science : proceedings of the XXVIII All-Russian student scientific and practical conference, Krasnoyarsk, April 25, 2024. – Krasnoyarsk : Irkutsk State Transport University, 2024. – P. 235–238. – EDN QJVEZF.

10 **Pyukke G. A.** On the use of the Markov degradation model in the diagnosis of technical systems / G. A. Pyukke // Bulletin of the Kamchatka Regional Association Educational and Scientific Center (KRASEC). Physics and Mathematics Sciences. – 2017. – No. 3 (19). – DOI 10.18454/2079-6641-2017-19-3-50-61. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-ispolzovanii-markovskoy-modeli-degradatsii-pri-diagnostirovanii-tehnicheskikh-sistem> (date of access: 02/15/2026).

D. A. Pyatkov

SYSTEM ANALYSIS OF THE RAILWAY INFRASTRUCTURE SUBSYSTEM AS A STEP TOWARDS A DIGITAL TWIN (STATIONARY SYSTEM) OF A RAILWAY TRACK

Abstract. The railway track is analyzed as a complex technical system, the management of which is based on regulatory approaches that limit the predictive control of critical sections. A set of system analysis methods has been applied: structural decomposition, functional and structural analysis, classification and multi-criteria analysis. The hierarchical interrelationships of the elements of the upper and lower structures have been revealed, and the cascading nature of degradation has been established, where the malfunction of the underlying element acts as the primary factor in the destruction of the overlying ones. The division of components into critical (providing instant safety) and fundamental (determining long-term stability) is justified. A multilevel life cycle model is proposed, which establishes a discrete scale of states correlating with the probability of failure. The concept of a hybrid digital twin integrating stationary sensor networks and data from mobile diagnostic complexes has been developed.

Keywords: digital twin, railway track, system analysis, optimization of diagnostic processes, railway transport, methods of system analysis.

For citation: Pyatkov, D. A. System analysis of the railway infrastructure subsystem as a step towards a digital twin (stationary system) of a railway track / D. A. Pyatkov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 61–72. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_2_61.

Сведения об авторах

Пятков Дмитрий Александрович
Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской
академии наук»,
аспирант,
e-mail: d.pyatkov@list.ru

Information about the authors

Pyatkov Dmitry Alexandrovich
Federal Research Center
“Krasnoyarsk Scientific Center
Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences”,
Postgraduate Student,
e-mail: d.pyatkov@list.ru

В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, А. В. Морозов, А. А. Васильченко, А. В. Мозговой

ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЗАМОРОЗКЕ *

Аннотация. Работа посвящена количественной оценке совместного влияния влажности, коэффициента уплотнения и количества циклов заморозки на деформационные характеристики глинистых грунтов. Исследования выполнены в лабораторных условиях. Подготовлены образцы грунта, имеющие различную влажность в диапазоне от 14 до 25 % и коэффициент уплотнения от 0,93 до 1,06, после чего они были подвергнуты различному числу циклов заморозки (1–6 циклов), также испытывались контрольные образцы, не подверженные циклам заморозки. Все образцы были испытаны в компрессионном приборе с нагрузкой от 0 до 0,6 МПа. По результату обработки и анализа протоколов испытаний получены зависимости деформаций образцов от нагрузки при разных сочетаниях исходных свойств грунтовых образцов. Отмечено, что на увеличение деформаций оказывают влияние все рассмотренные факторы, а связь деформаций с влажностью при всех рассмотренных коэффициентах уплотнения возрастает с увеличением циклов заморозки, при этом связь деформаций с коэффициентом уплотнения во всем диапазоне влажности снижается.

Ключевые слова: глинистый грунт, заморозка, земляное полотно, деформации, влажность, компрессионные испытания.

Для цитирования: Изменение деформационных характеристик грунтов при циклической заморозке / В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, А. В. Морозов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 73–80. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_73.

Введение

Грунтовые объекты различного назначения, как правило, функционируют в условиях воздействия внешних факторов, к которым относятся и факторы природного характера. Эти факторы оказывают воздействия на грунты, слагающие сооружения, и могут влиять на их стабильность [1, 2]. К грунтовым объектам в том числе относят и земляное полотно автомобильных и железных дорог. В зависимости от территориального расположения объекта воздействия на него могут иметь различный характер. Одними из наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на стабильность и устойчивость земляного полотна, можно считать атмосферные осадки и температуру. Атмосферные осадки, помимо влияния на гидрологию водотоков, создающих при определенных условиях предпосылки для размыва грунтов земляного полотна, также могут способствовать накоплению влаги в грунте, что приведет к ухудшению физико-механических характеристик и снижению несущей способности. Фактор температурного воздействия на земляное полотно в большей степени можно отнести к воздействию отрицательных температур или многократных циклов заморозки и разморозки грунта. Промерзание грунта приводит к образованию льда из поровой воды с увеличением объема грунта с образованием пучин. Повторяющийся цикл перехода температуры через ноль приводит к разуплотнению грунта [3–6].

Целью настоящего исследования является количественная оценка совместного влияния влажности, коэффициента уплотнения и количества циклов заморозки на деформационные характеристики глинистых грунтов.

Материалы и методы исследования

В качестве материала использован глинистый грунт. Грунтовый материал нарушенного строения отбирался из тела строящейся насыпи. Свойства грунта исследованы традиционными лабораторными методами в соответствии с действующими нормативными документами. Были определены фракционный состав,

* Исследование выполнено при поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (соглашение № 109-03-2026-007/1).

физико-механические, классификационные и прочностные свойства материала. На рис. 1 приведены параметры грунта, необходимые для его классификации и исследования деформаций при приложении механических нагрузок. Классификация грунта выполнена согласно ГОСТ 25100-2011.

Значение числа пластичности (IP) составило 21,59 % (см. рис. 1), что позволило классифицировать материал как глину легкую, пылеватую.

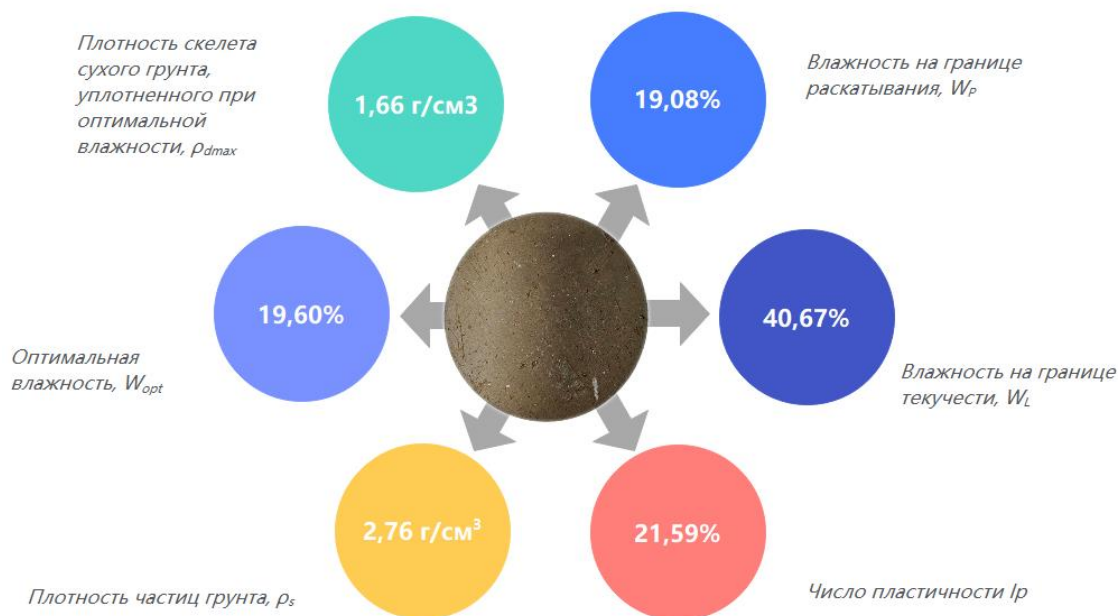


Рис. 1. Параметры грунта

Пробоподготовка выполнялась в приборе предварительного уплотнения. На первом этапе изготавливались образцы с различным коэффициентом уплотнения (от 0,93 до 1,06) при оптимальной влажности (19,6 %). После чего часть образцов дополнительно либо увлажнялась, либо высушивалась, при этом влажность образцов перед испытаниями составляла от 14 до 25 %. Изготовленные образцы подвергались различному количеству циклов заморозки/разморозки (1, 3, 6 циклов) в морозильной камере. Всего было изготовлено и испытано 36 образцов.

В работе для оценки деформаций образцов грунта (сжимаемости) использовался компрессионный метод с использованием установки компрессионного сжатия. Диапазон давлений, при котором проводились испытания, составлял от 0 до 0,6 МПа.

Обсуждение результатов

При сооружении земляного полотна проектными документами регламентируется влажность грунта и его коэффициент уплотнения. Коэффициент уплотнения устанавливается в зависимости от строящегося сооружения и может меняться в зависимости от расположения уплотняемого слоя. Обычно верхние слои земляного полотна имеют коэффициент уплотнения, близкий к единице ($K_{уп} = 0,98-1,00$). Влажность задается оптимальной для каждого типа грунта, а ее точное значение определяется лабораторными методами.

Рассмотрим полученные деформации образца грунта с $K_{уп}$, равным 1,00, при различной влажности и подвергнутых различному количеству циклов заморозки. Полученные данные были сгруппированы по влажности со значениями, близкими к 14, 19 и 24 %, рассмотрены образцы, которые не подвергались заморозке и замороженные 1, 3 и 6 раз. На рис. 2–4 приведены графики зависимости деформаций от нагрузки на образец при различной влажности и количестве циклов заморозки/разморозки.

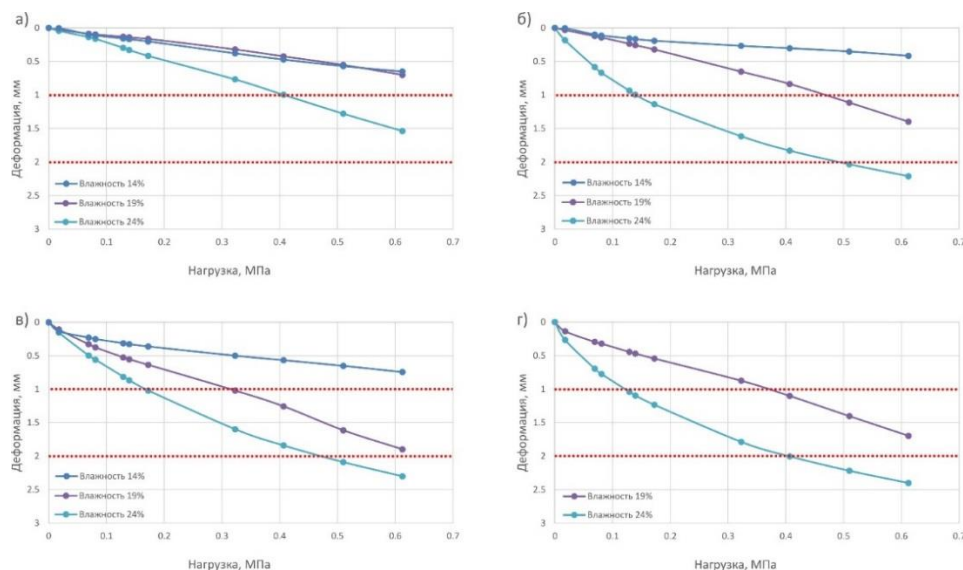


Рис. 2. Графики зависимости деформаций образцов от приложенной нагрузки в условиях компрессионного сжатия при различной влажности грунта с $K_{уп} = 0,96$:
 а – контрольный образец, б – после одного цикла заморозки/разморозки ($N_c = 1$), в – после трех циклов заморозки/разморозки ($N_c = 3$), г – после шести циклов заморозки/разморозки ($N_c = 6$)

На рис. 2 приведены данные для образца, имеющего самый низкий коэффициент уплотнения из рассмотренных в работе, его значение составляет 0,96, что в практике не должно допускаться, а грунт с таким коэффициентом уплотнения считается неуплотненным. Поведение грунта на контрольном образце демонстрирует рост деформаций с увеличением нагрузки, при этом грунты с влажностью 14 и 19 % ведут себя схоже, это связано с тем, что влажность грунта была близкой или ниже влажности на границе раскатывания, а грунт с влажностью 24 % при максимальной нагрузке деформируется почти в три раза сильнее 0,65–0,70 против 1,54 мм. При этом расхождение становится более заметным и нарастает после нагрузки 0,11 МПа.

Заморозка образцов оказывает влияние уже при первом цикле, увеличивая деформации для всех значений влажности. Так, грунт с влажностью 24 % деформируется при одном цикле в 1,44 раза больше, а при 6 циклах – в 1,56 раза. При этом наименьшее влияние количества циклов заморозки/разморозки сказывается на менее влажных грунтах, что можно объяснить меньшим количеством сформированных кристаллов льда в объеме образца.

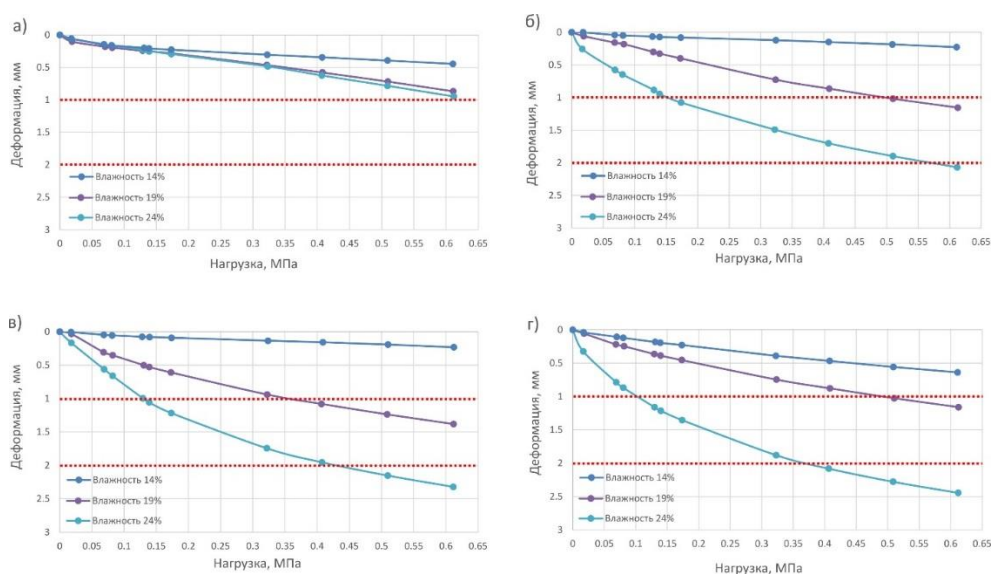


Рис. 3. Графики зависимости деформаций образцов от приложенной нагрузки в условиях компрессионного сжатия при различной влажности грунта с $K_{уп} = 1,0$:
 а – контрольный образец, б – после одного цикла заморозки/разморозки ($N_c = 1$), в – после трех циклов заморозки/разморозки ($N_c = 3$), г – после шести циклов заморозки/разморозки ($N_c = 6$)

Аналогичные зависимости можно наблюдать и в случае с образцом, имеющим максимальную плотность ($K_{уп} = 1,0$). На рис. 3 видно, что контрольный образец при высоких значениях влажности деформировался в несколько раз меньше, чем образцы, подверженные заморозке. Этот эффект растет с количеством циклов, причем наибольший прирост деформаций наблюдается также на первых циклах. С увеличением циклов прирост деформаций уменьшается.

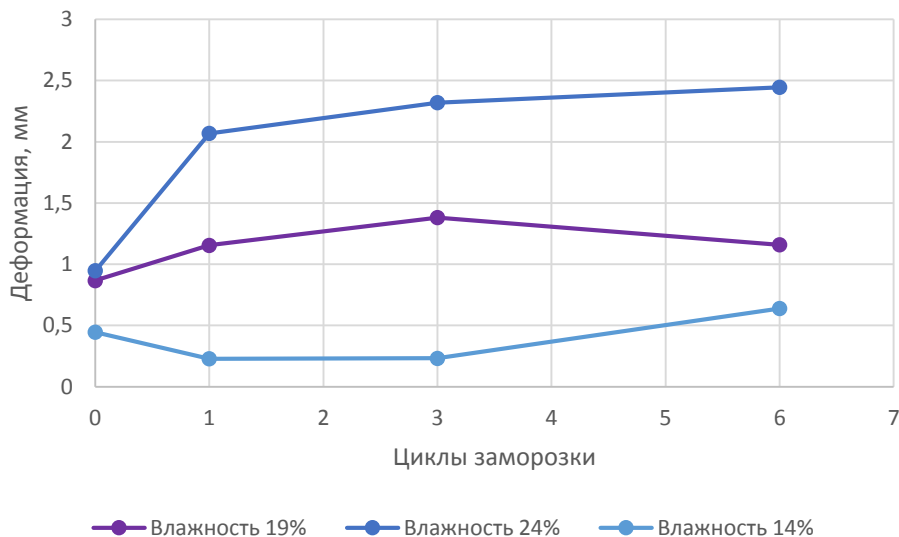


Рис. 4. Графики зависимости максимальных деформаций образцов от количества циклов заморозки в условиях компрессионного сжатия при различной влажности грунта с $K_{уп} = 1,00$

Дополнительно на рис. 4 приведены графики зависимости значений максимальных деформаций от количества циклов заморозки для грунтов с различной влажностью и $K_{уп} = 1,0$. Рис. 4 также демонстрирует увеличение деформаций как при увеличении влажности образцов, так и с увеличением количества циклов заморозки.

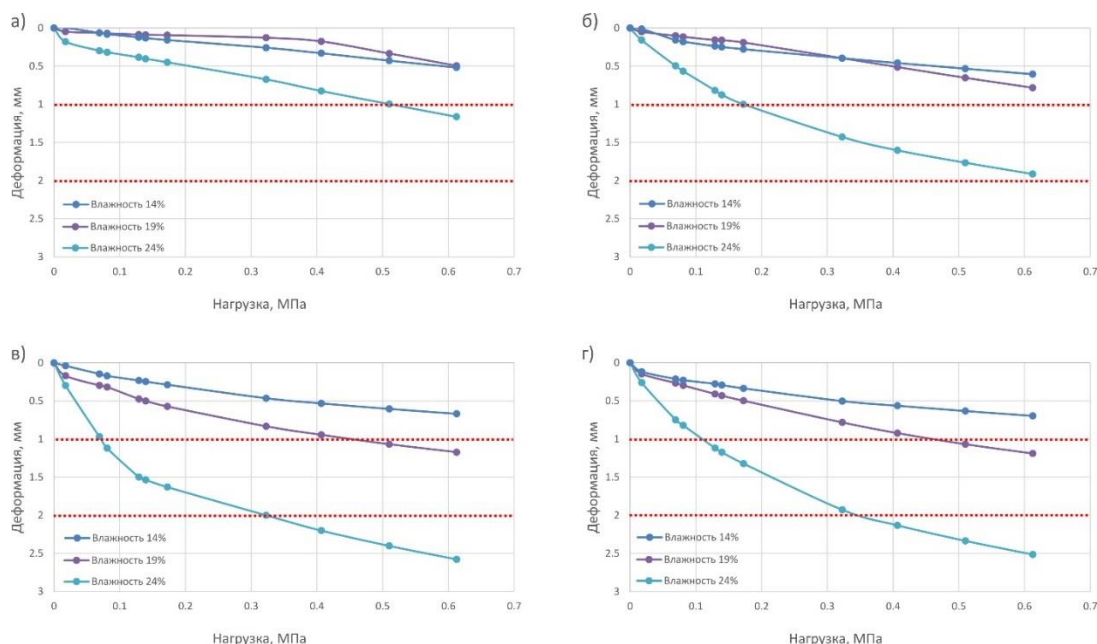


Рис. 5. Графики зависимости деформаций образцов от приложенной нагрузки в условиях компрессионного сжатия при различной влажности грунта с $K_{уп} = 1,03$:

а – контрольный образец, *б* – после одного цикла заморозки/разморозки ($N_c = 1$), *в* – после трех циклов заморозки/разморозки ($N_c = 3$), *г* – после шести циклов заморозки/разморозки ($N_c = 6$)

На рис. 5 приведены результаты испытания образцов, имеющих наибольшую плотность, когда при пробоподготовке грунт переуплотнялся и имел $K_{уп} = 1,03$. В общем поведение образцов грунта схоже с описанными выше, но можно отметить некоторые особенности. Например, грунт с влажностью 14 и 19 % деформируется меньше, а однократная заморозка на переуплотненный грунт оказывает меньшее влияние по сравнению с образцами с коэффициентами уплотнения, равными 0,96 и 1,00. Можно отметить, что кривые деформаций грунта с высокой влажностью после 6 циклов заморозки имеют практически одинаковое поведение и величину максимальной деформации (таблица).

Деформации при нагружении образца с влажностью 24 % после 6 циклов нагружения при различных коэффициентах уплотнения

№, п/п	Коэффициент уплотнения	Деформация, мм
1	0,96	2,40
2	1,00	2,45
3	1,03	2,51

Следует отметить, что при изготовлении образцов с заданными свойствами (влажность, коэффициент уплотнения) при контрольных замерах были выявлены отклонения от заданных параметров. Эти отклонения можно оценить для влажности $\Delta_w = 2 \%$, для коэффициента уплотнения $\Delta_{K_{уп}} = 1 \%$.

Если рассмотреть общую совокупность полученных данных, то можно построить зависимости деформаций отдельно для зависимости деформаций от влажности и коэффициента уплотнения. Выполнив линейную аппроксимацию, можно получить уравнения для определения деформаций в зависимости от значений рассматриваемых переменных. На рис. 6 и 7 точками отмечены полученные лабораторно значения максимальных деформаций в зависимости от влажности и коэффициента уплотнения, пунктирной наклонной линией указана линейная аппроксимация экспериментальных данных.

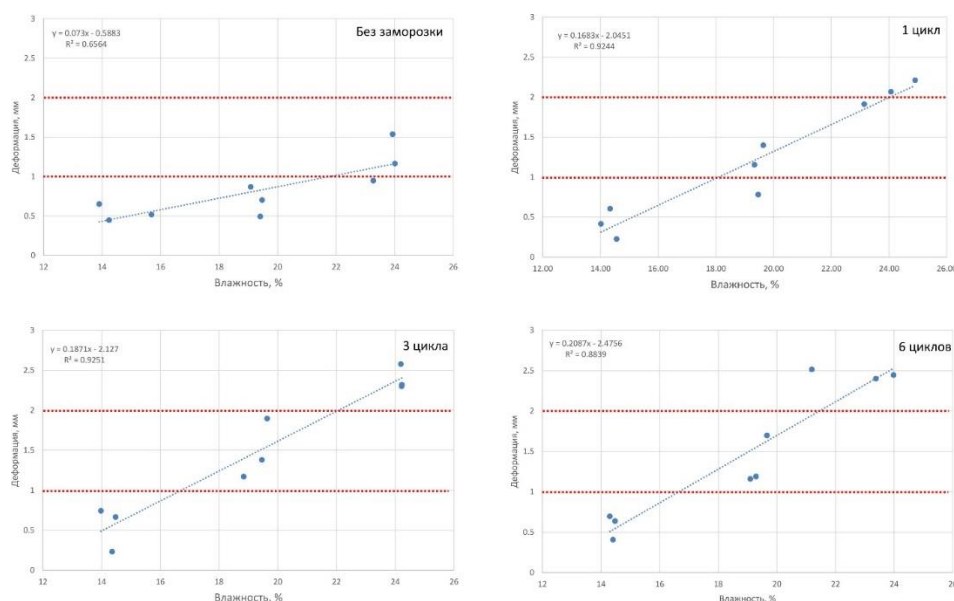


Рис. 6. График зависимости деформаций от влажности образца в диапазоне испытанных значений $K_{уп}$

На графиках зависимости деформаций от влажности образца, приведенного на рис. 6, виден рост деформаций с увеличением влажности. Более ярко этот эффект выражен в образцах, подверженных циклам заморозки. При этом линейная аппроксимация для контрольных образцов показывает меньшее значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,7$), в то время как для образцов, подверженных циклам заморозки, данные линейно аппроксимируются с коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,9$). Такой эффект можно связать с тем, что в процессе заморозки/разморозки изменяется структура грунта, делая его поведение под нагрузкой более предсказуемым.

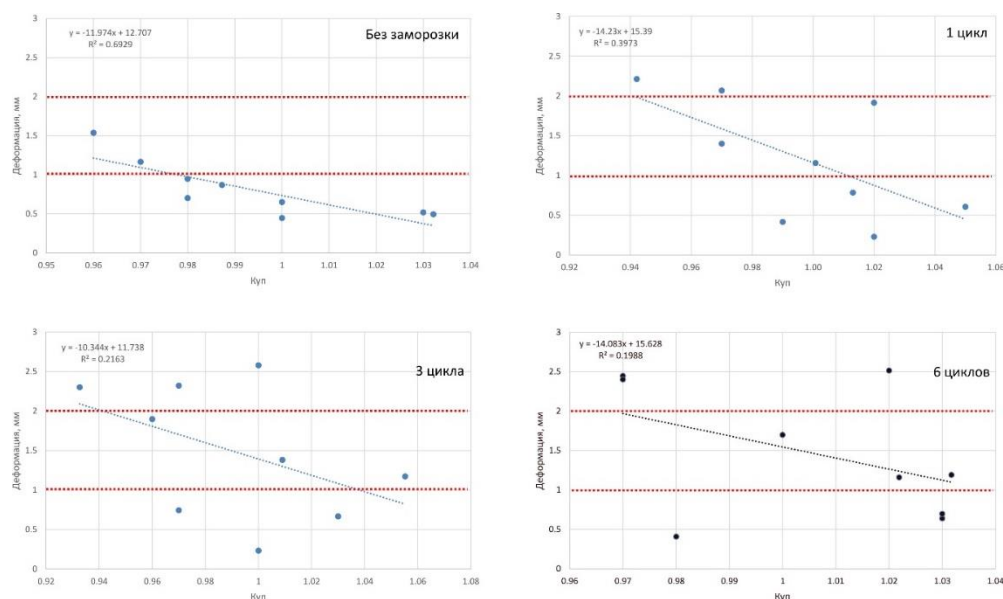


Рис. 7. График зависимости деформаций от $K_{уп}$ образца в диапазоне испытанных значений влажности

На графиках зависимости деформаций от коэффициента уплотнения образца, приведенного на рис. 7, наблюдается уменьшение деформаций с увеличением коэффициента уплотнения. Линейная аппроксимация на контрольном образце также дает значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,7$), однако после циклических воздействий температуры с каждым последующим циклом коэффициент детерминации уменьшается и после 6 циклов составляет $R^2 = 0,2$.

Выводы

По результату выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- Грунты с влажностью близкой или ниже влажности на границе раскатывания ведут себя схоже под действием нагрузки, а грунт с влажностью 24 % при максимальной нагрузке деформируется почти в три раза сильнее (0,65–0,70 против 1,54 мм).
- Влияние заморозки на значение деформаций сказывается при первом цикле увеличивая деформации для всех значений влажности.
- На увеличение деформаций оказывает влияние все рассмотренные факторы.
- Грунт с коэффициентом уплотнения 1,03 и влажностью 14 и 19 % при однократной заморозке меньше подвержен влиянию по сравнению с образцами с коэффициентами уплотнения, равными 0,96 и 1,00.
- Связь деформаций с влажностью при всех рассмотренных коэффициентах уплотнения возрастает с увеличением циклов заморозки при этом, связь деформаций с коэффициентом уплотнения во всем диапазоне влажности снижается.
- Учитывая влияния на деформации нескольких факторов, таких как влажность образца и его начальное уплотнение, а также количество циклов заморозки, целесообразно выполнить факторный анализ и оценить влияние этих факторов и их вклад в деформации образцов грунта.

Список литературы

- 1 Сулейманова, М. А. Факторы, вызывающие повреждения и дефекты в земляном полотне железных дорог / М. А. Сулейманова, Д. Х. Худойкулов, Ш. Р. Махмадов // Политехнический вестник. Серия : инженерные исследования. – 2017. – № 3 (39). – С. 53–62. – ISSN 2520-2227.
- 2 Кафитин, Л. И. Воздействие просадочности на железнодорожный путь и способы борьбы с этим явлением / Л. И. Кафитин, Н. В. Хамидуллина //

References

- 1 Suleimanova, M. A. Factors causing damage and defects in the subgrade of railways / M. A. Suleimanova, D. Kh. Khudoykulov, Sh. R. Makhmadov // Polytechnic Bulletin. Series : Engineering Studies. – 2017. – No. 3 (39). – P. 53–62. – ISSN 2520-2227.
- 2 Kafitin, L. I. The impact of subsidence on railway tracks and methods for combating this phenomenon / L. I. Kafitin, N. V. Khamidullina //

Сборник научных трудов V Всероссийской национальной научно-практической конференции «Инновационные технологии в строительстве и управление техническим состоянием инфраструктуры». – Ростов-на-Дону, 2023. – С. 80–84. – ISBN 978-5-907295-80-3.

3 **Болдырев, Г. Г.** Влияние циклического замораживания-оттаивания на прочность и деформируемость мерзлых грунтов: состояние вопроса / Г. Г. Болдырев, И. Х. Идрисов // Инженерная геология. – 2017. – № 3. – С. 6–17. – ISSN 1993-5056.

4 **Кузьмин, Г. П.** Зависимость между характеристиками физических свойств мерзлых и талых грунтов / Г. П. Кузьмин, В. Н. Панин ; Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова // Наука и образование. – 2008. – № 1 (49). – С. 38–40. – ISSN 2073-8129.

5 **Ратькова, Е. И.** Воздействие циклов «замораживание – оттаивание» на деформационные свойства лесных почво-грунтов Карелии / Е. И. Ратькова, В. С. Сюнев, В. К. Катаров // Resources and Technology. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 73–89. – ISSN 2307-0048.

6 **Ковалева, Н. В.** Исследование влияния циклов «замораживание – оттаивание» на характеристики лесных почво-грунтов, используемых при строительстве лесных дорог / Н. В. Ковалева, В. К. Катаров, Е. И. Ратькова // Актуальные направления научных исследований XXI века : теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 3–3(8–3). – С. 176–180. – DOI 10.12737/4221.

// Collection of scientific papers of the V All-Russian national scientific and practical conference “Innovative technologies in construction and management of the technical condition of infrastructure”. – Rostov-on-Don, 2023. – P. 80–84. – ISBN 978-5-907295-80-3.

3 **Boldyrev, G. G.** The influence of cyclic freezing-thawing on the strength and deformability of frozen soils : state of the art / G. G. Boldyrev, I. Kh. Idrisov // Engineering Geology. – 2017. – No. 3. – P. 6–17. – ISSN 1993-5056.

4 **Kuzmin, G. P.** Relationship between the characteristics of the physical properties of frozen and thawed soils / G. P. Kuzmin, V. N. Panin ; Melnikov Permafrost Institute // Science and Education. – 2008. – No. 1 (49). – P. 38–40. – ISSN 2073-8129.

5 **Ratkova, E. I.** Impact of freeze-thaw cycles on deformation properties of forest soils of Karelia / E. I. Ratkova, V. S. Sunev, V. K. Katarov // Resources and Technology. – 2013. – Vol. 10, No. 1. – P. 73–89. – ISSN 2307-0048.

6 **Kovaleva, N. V.** Study of the influence of freeze-thaw cycles on the characteristics of forest soils used in the construction of forest roads / N. V. Kovaleva, V. K. Katarov, E. I. Ratkova // Current areas of scientific research in the 21st century : theory and practice. – 2014. – Vol. 2, No. 3–3(8–3). – P. 176–180. – DOI 10.12737/4221.

V. L. Shapovalov, M. V. Okost, A. V. Morozov, A. A. Vasilchenko, A. V. Mozgovoy

CHANGES IN SOIL DEFORMATION PROPERTIES DURING CYCLIC FREEZING

Abstract. This study quantitatively evaluates the combined effects of moisture content, compaction coefficient, and the number of freeze-thaw cycles on the deformation properties of clayey soils. The study was conducted under laboratory conditions. Soil samples with varying moisture contents ranging from 14% to 25% and compaction coefficients from 0.93 to 1.06 were prepared and subjected to varying numbers of freeze-thaw cycles (1–6 cycles). Control samples not subjected to freeze-thaw cycles were also tested. All samples were tested in a compression tester with loads ranging from 0 to 0.6 MPa. Based on the processing and analysis of test reports, dependences of sample deformations on load were obtained for different combinations of initial soil sample properties. It was noted that all the factors considered influence the increase in deformations, and the relationship between deformations and moisture content for all compaction coefficients considered increases with increasing freezing cycles, while the relationship between deformations and compaction coefficients decreases across the entire moisture content range.

Keywords: clayey soil, freezing, subgrade, deformations, moisture content, compression testing.

For citation: Changes in soil deformation properties during cyclic freezing / V. L. Shapovalov, M. V. Okost, A. V. Morozov [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 73–80. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_73.

Сведения об авторах**Шаповалов Владимир Леонидович**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: cpd@rgups.ru

Окост Максим Викторович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Изыскания, проектирование
и строительство железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: okostmv@rgups.ru

Морозов Андрей Владимирович

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

Васильченко Андрей Александрович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
аспирант,
e-mail: zmandr@mail.ru

Мозговой Алексей Валерьевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
Военный учебный центр,
заместитель начальника кафедры,
e-mail: mozgovoy77@yandex.ru

Information about the authors**Shapovalov Vladimir Leonidovich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Track and Track Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

Okost Maksim Victorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Survey, Design and Construction
of Railroads”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: okostmv@rgups.ru

Morozov Andrey Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Physics”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

Vasilchenko Andrey Aleksandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Track and Track Facilities”,
Postgraduate Student,
e-mail: zmandr@mail.ru

Mozgovoy Alexey Valerievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Military Training Center,
Deputy Head of the Chair,
e-mail: mozgovoy77@yandex.ru

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

УДК 629.4.077–592 : 629.463

DOI 10.46973/0201–727X_2026_2_81

*А. Н. Балалаев, А. В. Жебанов*ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ПОЛУВАГОНА
С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ

Аннотация. Одной из целей цифровизации железнодорожного транспорта является создание цифровых двойников вагонов, позволяющих управлять их жизненным циклом. Начальными этапами создания цифрового двойника вагона являются, во-первых, разработка цифровых моделей всех модификаций основных узлов вагона конкретной модели и, во-вторых, расширение функций этих моделей для обеспечения возможности прогнозирования работоспособности узлов вагона в конкретных условиях эксплуатации с заданными параметрами и возможными дефектами, что делает эти модели цифровыми тенями конкретных узлов конкретного вагона. Кроме прогнозирования работоспособности узлов и, следовательно, всего вагона, их цифровая тень позволяет обоснованно устанавливать причины неисправностей, препятствующих эксплуатации, сходов подвижного состава, аварий и крушений, то есть использоваться в судебной экспертизе при спорах хозяйствующих субъектов об ответственности за возникновение неисправностей или расследовании происшествий. Начальным этапом разработки цифровой тени полувагона является создание параметрической цифровой модели кузова полувагона с грузом. Рассматривается вопрос об использовании результатов коммерческого осмотра полувагона с сыпучим грузом для моделирования положения суммарного центра масс кузова и груза. Предложен алгоритм определения максимальной нагрузки на пружину рессорного комплекта тележки полувагона. Найденное значение максимальной нагрузки на пружину используется для расчета напряженно-деформированного состояния пружины и определения коэффициента запаса по различным критериям.

Ключевые слова: цифровая модель полувагона, суммарный центр масс, пружинный комплект, модель сыпучего груза, модель пружины, запас прочности.

Для цитирования: Балалаев, А. Н. Параметрическая цифровая модель полувагона с произвольным положением центра тяжести / А. Н. Балалаев, А. В. Жебанов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 81–95. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_2_81.

Введение

По данным об отцепках грузовых вагонов в текущий отцепочный ремонт (ТОР) за 9 месяцев 2024 г., представленным в [1], количество изломов пружин составило 23,1 тысячи. Основной причиной изломов пружин, по данным [2], является несоответствие разности высот пружин в пружинном комплекте установленной руководящими документами. Так, в [3] к разности высот пружин предъявляются требования, согласно которым для тележки 18-100 высота пружин в одном пружинном комплекте не должна различаться более чем на 4 мм при выпуске из плановых (деповских и капитальных) видов ремонта. Согласно [4] при выпуске из текущего отцепочного ремонта высота пружин в одном пружинном комплекте не должна различаться более чем на 5 мм. Однако в настоящее время замена пружин возможна безотцепочным способом в парке отправления пункта технического обслуживания (ПТО), при этом на такую операцию не распространяется гарантия текущего отцепочного ремонта.

Сопутствующей причиной излома пружины с несоответствием разности высот пружин рессорного комплекта является неравномерность загрузки сыпучего груза, вызывающая смещение суммарного центра масс кузова полувагона с грузом. Такое смещение может быть выявлено при коммерческом осмотре вагонов с помощью вагонных весов [5], способных осуществлять поосевое взвешивание, что позволяет не допускать в эксплуатацию вагоны со смещением центра масс более установленных в [6] нормативных значений по причине возможной потери устойчивости вагона [7]. Однако вагонными весами, позволяющими вести поосевое взвешивание, оборудованы не все пункты коммерческого осмотра, а нахождение величины смещения центра масс в пределах допусков технических условий [6] не гарантирует отсутствие негативного влияния на нагруженность пружин рессорного подвешивания

вагона, то есть величина смещения центра масс в пределах допусков при несоответствии разности высот пружин в пружинном комплекте нормативным документам [3, 4] может привести к сверхнормативной нагруженности пружин. Нагруженность пружин в вертикальной и горизонтальной плоскости анализировалась в работе [8], где сравнивались различные критерии оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) пружин для задачи нахождения коэффициента запаса прочности.

В работе [9] обосновывается многокритериальный подход к определению устойчивости вагона, согласно которому для определения условий обезгруженности колеса при сходе с рельс необходимо учитывать не только техническое состояние множества узлов вагона, но и кососимметричные силы, вызванные смещением центра масс вагона и вызывающие различие зазоров в скользящих. Данный подход следует распространить и на проблему сверхнормативной нагруженности пружин, решить которую можно с помощью исследования цифровой тени рессорного комплекта тележки грузового вагона, основанной на цифровой модели пружинных комплектов с заданными высотами пружин и возможными характерными дефектами, например отколами концевой витка, а также цифровой модели кузова полувагона с грузом, моделирующей заданное положение суммарного центра масс кузова и груза.

В работах [10, 11] описан интегрированный пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях (ППСС), разработанный специалистами Ростовского филиала АО «НИИАС». Одной из функций данного поста является фотографирование открытого подвижного состава (вид сверху) при коммерческом осмотре, построение по фотографии 3D-модели вагона с грузом и определение перегруженной из-за смещения центра масс оси. Функции данного поста могут служить основой построения цифровых теней и двойников как отдельных узлов вагонов (колесных пар, боковых рам, надрессорных балок, пружинных комплектов), так и самих вагонов.

В работе [12] представлена методология построения цифровых теней и цифровых двойников объектов железнодорожного транспорта, показаны различия в этих понятиях. Так, если цифровая модель постоянно совершенствуется в соответствии с данными эксплуатации реального объекта, то это – цифровая тень, она способна предсказывать поведение реального объекта только при условиях эксплуатации, имевших место в прошлом. В отличие от цифровой тени цифровой двойник не только получает обратную связь от реального объекта, но и управляет этим реальным объектом.

Как отмечено в [13], цифровая тень – это лишь промежуточное звено от цифровой модели к цифровому двойнику реального объекта. Поэтому необходимыми условиями для создания цифрового двойника вагона являются, во-первых, разработка цифровых моделей всех модификаций основных узлов вагона и, во-вторых, расширение функций этих моделей для обеспечения возможности прогнозирования работоспособности узлов вагона в конкретных условиях эксплуатации с заданными параметрами и возможными дефектами, что делает эти модели цифровыми тенями конкретных узлов конкретного вагона. Цифровые тени узлов вагона имеют свою прикладную ценность, они позволяют прогнозировать работоспособность узлов и, следовательно, всего вагона в заданных условиях, обоснованно устанавливать причины неисправностей, препятствующих эксплуатации, сходов подвижного состава, аварий и крушений, могут использоваться в судебной экспертизе при спорах хозяйствующих субъектов об ответственности за возникновение неисправностей, а также при расследовании сходов, аварий, крушений.

Начальным этапом разработки цифровой тени полувагона является создание параметрической цифровой модели кузова полувагона с сыпучим грузом, составная часть которой – параметрическая модель сыпучего груза, позволяющая задавать высоту конусов груза и положение центров их оснований. Настройка цифровой модели груза должна осуществляться по задаваемым параметрам, которые корректируются из условия наилучшего согласования положений конусов модели сыпучего груза и фотографий кузова полувагона с грузом, полученных в эксплуатации.

В работе ставится цель – разработать параметрическую цифровую модель полувагона с произвольным положением суммарного центра тяжести, позволяющую моделировать положение груза по фотографии кузова с грузом, полученной в процессе эксплуатации, выявлять наиболее нагруженную пружину рессорного подвешивания полувагона в зависимости от заданных высот пружин и положения суммарного центра масс кузова и груза, определять НДС пружины и ее коэффициент запаса прочности по различным критериям.

Основная часть

Для определения нагрузок на рессорные комплекты от надрессорных балок конкретного вагона в условиях конкретной перевозки необходимо обратиться к данным автоматизированной системы коммерческого осмотра поездов и вагонов (АСКОПВ) или интегрированного поста автоматизированного

приема и диагностики состава на сортировочной станции (ППСС) с целью определения нагрузок с каждого колеса на весы при коммерческом осмотре [7, 10, 11]. Схема нагрузок с каждого колеса и возможное местоположение точки центра масс представлены на рис. 1.

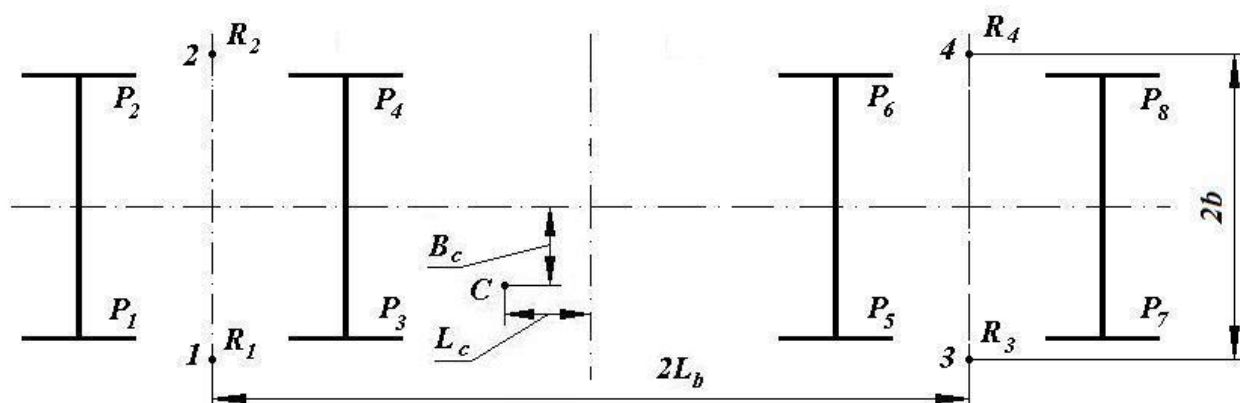


Рис. 1. Схема исходных данных, получаемых с аппаратуры весов АСКОПВ или ППСС, и возможное местоположение центра масс кузова вагона с грузом:

$P_1 \dots P_8$ – нагрузки от колес; $R_1 \dots R_4$ – нагрузки от наддресорных балок на колеса одной стороны каждой тележки; $1 \dots 4$ – геометрические центры рессорных комплектов с каждой стороны каждой тележки; C – местоположение центра масс; L_c – расстояние от центра масс до вертикальной плоскости, проходящей через среднюю поперечную ось вагона; B_c – расстояние от центра масс до вертикальной плоскости, проходящей через среднюю продольную ось вагона; $2L_b$ – длина базы вагона; $2b$ – поперечное расстояние между центрами рессорных комплектов

По результатам поколесного взвешивания вагона при коммерческом осмотре, полученным из АСКОПВ или ППСС, находятся нагрузки с наддресорных балок на рессорные комплекты:

$$\begin{aligned} R_1 &= (P_1 + P_3 - 0,5 \cdot M_t) \cdot g, \\ R_2 &= (P_2 + P_4 - 0,5 \cdot M_t) \cdot g, \\ R_3 &= (P_5 + P_7 - 0,5 \cdot M_t) \cdot g, \\ R_4 &= (P_6 + P_8 - 0,5 \cdot M_t) \cdot g, \end{aligned} \quad (1)$$

где $P_1 \dots P_8$ – весовая нагрузка с одного вагонного колеса с индексом $i = 1 \dots 8$ в соответствии с обозначениями рис. 1, кг; M_t – масса двухосной тележки, кг; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Однако если нет возможности произвести поколесное взвешивание вагона, но имеются фотографии кузова с грузом, то можно составить 3D-модель груза по фотографиям с двух ракурсов, на которых видны границы сыпучего груза на боковых стенках. На рис. 2 показан пример одного из необходимых ракурсов кузова полувагона. На рис. 2, б показана эта же фотография с наложенной на нее схемой измерений.

Другой необходимый ракурс фотографии полувагона с грузом должен быть таким, чтобы была видна граница груза на правой боковой стенке кузова.

Для моделирования положения груза в модели кузова полувагона несколькими конусами необходимо на фотографии (рис. 2, а) измерить расстояния от верхней обвязки кузова до границы сыпучего груза в нескольких местах с постоянным шагом по длине кузова.

Следует отметить, что процесс измерения фотографий и расчета реальных расстояний от границы груза до верха кузова может быть автоматизирован с помощью специализированных программ фотометрии, таких, например, как Iphoto Measure, ImageMeter и др. Однако можно использовать приближенный метод обработки фотографий полувагона, основанный на том, что реальный кузов полувагона представляет собой параллелепипед с известными для заданной модели вагона сторонами (высота, ширина и длина кузова). В этом случае измерения на фотографии переводятся в реальные размеры с учетом масштаба (отношение размера известного эталонного объекта к размеру аналогичного

объекта на фотографии) и перспективы, которая учитывается по соотношению измеренных на фотографии двух одинаковых эталонных объектов с известными размерами на разных планах (заднем, переднем).

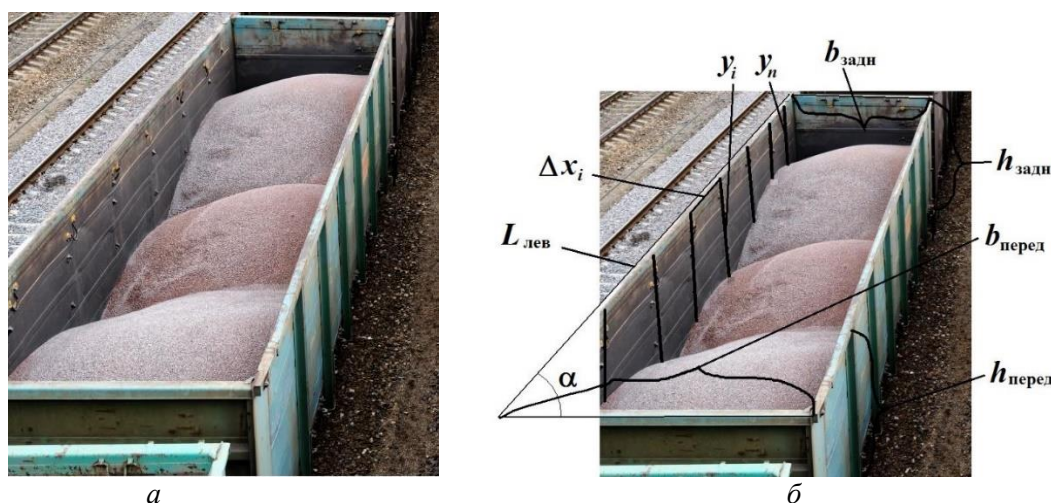


Рис. 2. Фотографии полувагона с сыпучим грузом:

a – вид справа с видимостью границы груза на левой боковой стенке; *б* – этот же вид с обозначениями схемы измерений фотографии

Из-за наличия на фотографии перспективы места измерения на верхней обвязке кузова будут находиться друг от друга на разном расстоянии Δx_i , определить которое можно приближенно из решения системы уравнений:

$$\Delta x_i = \frac{L_{\text{лев}} \cdot \sin(\alpha)}{n} \cdot \frac{b_{\text{перед}}}{b_{\text{задн}}} \cdot c \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{b_{\text{задн}}}{b_{\text{перед}}} \right) \cdot \frac{i-1}{n-1} \right],$$

$$c = \frac{L_{\text{лев}}}{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}, \quad (2)$$

где $L_{\text{лев}}$ – измеренная на фотографии длина левой боковой стенки кузова в районе верхней обвязки, мм; α – измеренный на фотографии угол между левой боковой стенкой и передней торцевой стенкой, град; n – число разбиений длины $L_{\text{лев}}$ для определения мест измерений расстояния от верхней обвязки кузова до границы сыпучего груза; $b_{\text{перед}}$ – измеренная на фотографии ширина передней к зрителю торцевой стенки кузова в районе верхней обвязки, мм; $b_{\text{задн}}$ – измеренная на фотографии ширина задней к зрителю торцевой стенки кузова в районе верхней обвязки, мм; c – поправочный коэффициент; i – порядковый номер места измерения, начиная с передней к зрителю части левой боковой стенки.

Определив таким образом места измерений с учетом перспективы фотографии, далее необходимо измерить на фотографии рис. 2, *a* расстояния от верхней обвязки кузова до границы сыпучего груза на линиях, параллельных линии сопряжения задней торцевой и левой боковой стенок кузова, как показано на рис. 2, *б* – см., например, линии с размерами y_i и y_n . Перевести эти измеренные на фотографии величины в реальные размеры можно приближенно с учетом масштаба и перспективы фотографии по формуле:

$$y_{\text{реал}} = y_i \cdot \frac{H}{h_{\text{перед}}} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{h_{\text{перед}}}{h_{\text{задн}}} \right) \cdot \frac{i-1}{n-1} \right], \quad (3)$$

где y_i – измеренные на фотографии расстояния от верхней обвязки кузова до границы сыпучего груза, мм; H – известная высота кузова (опорный размер эталонного объекта), мм; $h_{\text{перед}}$ – измеренная на фотографии высота передней к зрителю торцевой стенки кузова в районе доступном для измерений, мм; $h_{\text{задн}}$ – измеренная на фотографии высота задней к зрителю торцевой стенки кузова, мм.

Такие же измерения и вычисления необходимо провести для фотографии полувагона с грузом с другого ракурса, при котором видна граница сыпучего груза на правой боковой стенке.

Далее проводится моделирование положения груза в модели кузова полувагона несколькими конусами так, чтобы обеспечить такие же расстояния от верха модели кузова до модели груза. На рис. 3 показана модель полувагона с грузом и датчиками уровня, показывающими расстояние от верха модели кузова до модели груза, образованной тремя конусами.

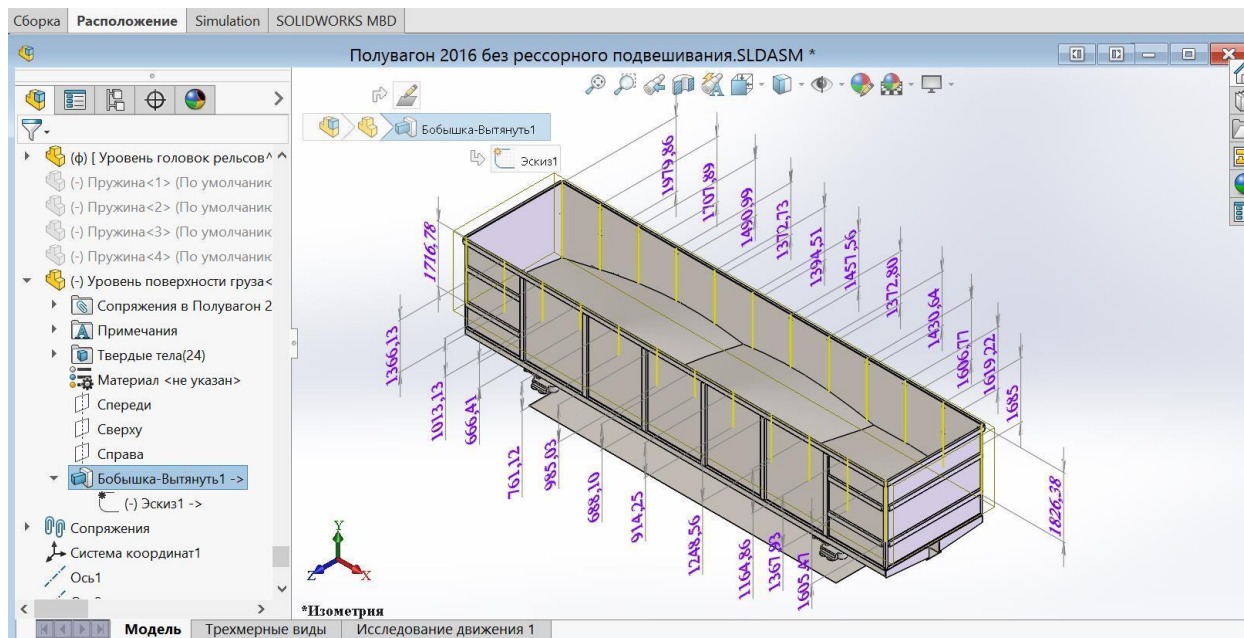


Рис. 3. Модель полувагона с насыпным грузом и датчиками уровня груза

Датчики уровня груза, изображенные на рис. 3, снабжены размерами для справок, показывающими расстояния от верха кузова до поверхности груза.

Обеспечив совпадение этих размеров с соответствующими величинами $h_{\text{реали}}$, можно определить центр масс модели кузова с грузом относительно системы координат с центром, находящимся на пересечении трех ортогональных плоскостей: плоскости головок рельс, плоскости, проходящей через продольную ось полувагона, и плоскости, проходящей через поперечную ось полувагона.

На рис. 4 показана цифровая модель полувагона с грузом, таблица с глобальными переменными, определяющими размеры и смещения оснований трех конусов модели груза, и таблица с массовыми характеристиками полувагона с грузом, где указаны координаты центра масс относительно системы координат «Система координат 2», центр которой размещен в геометрическом центре проекции днища полувагона на плоскость головок рельс.

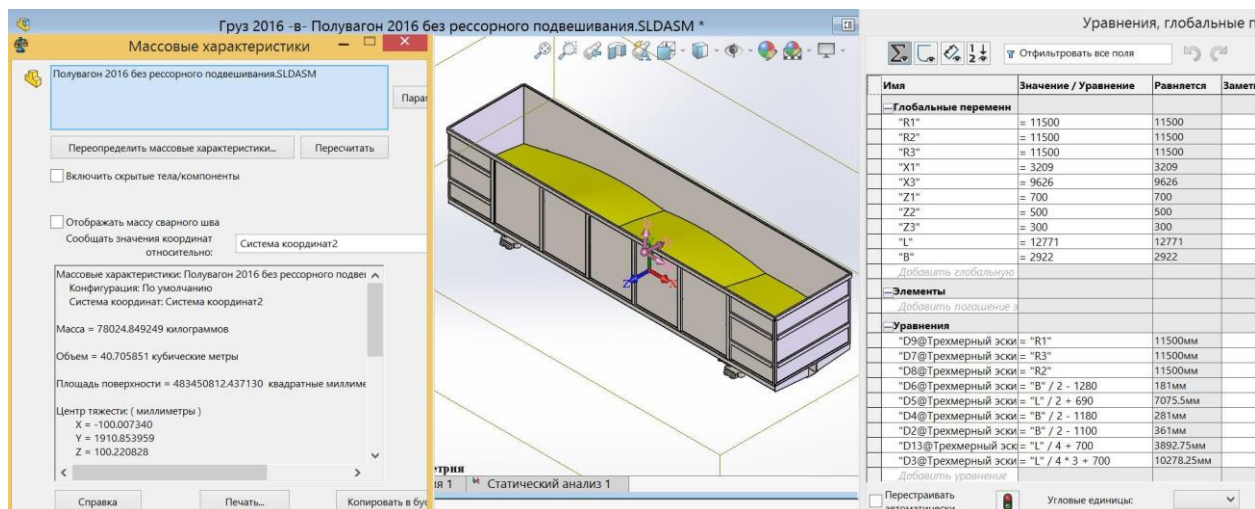


Рис. 4. Массовые характеристики модели кузова полувагона с грузом, с таблицей параметров для расчетов геометрии трех конусов

Как видно на рис. 4, суммарный центр масс кузова с грузом смещен относительно и продольной, и поперечной осей полувагона примерно на 100 мм, а масса кузова с грузом составляет 78 025 кг.

По смещению суммарного центра масс кузова с грузом относительно геометрического центра модели кузова можно определить нагрузки с надрессорных балок на рессорные комплекты $R_1 \dots R_4$.

Если представить в плане местоположение точки центра масс кузова с грузом в соответствии с рис. 1, то можно составить уравнения сохранения моментов относительно каждой комбинации из двух соседних точек центров четырех рессорных комплектов, то есть получить четыре уравнения, связывающие нагрузки от надрессорных балок $R_1 \dots R_4$ с величинами L_c и B_c , представляющими собой смещения суммарного центра масс кузова с грузом соответственно от поперечной и продольной осей полувагона. Например, для точек 1 и 2 уравнение сохранения моментов в проекции на плоскость, проходящую через эти точки, имеет вид:

$$R_1 \cdot (b - B_c) = R_2 \cdot (b + B_c), \quad (4)$$

аналогично уравнению (4) можно составить для точек 1 и 3 уравнение сохранения моментов в проекции на плоскость, проходящую через эти точки:

$$R_1 \cdot (L_b - L_c) = R_3 \cdot (L_b + L_c), \quad (5)$$

где b – половина поперечного расстояния между центрами рессорных комплектов, м; L_b – половина базы полувагона (половина расстояния между осями пятников), м.

После составления уравнений сохранения момента для двух других пар точек аналогично уравнениям (4) и (5) и преобразований этих уравнений получают выражения относительно нагрузок $R_1 \dots R_4$ [Н]:

$$\begin{aligned} R_1 &= G_k \cdot g \cdot \left(0,5 + \frac{L_c}{2L_b} \right) \cdot \left(0,5 + \frac{B_c}{2b} \right), \\ R_2 &= G_k \cdot g \cdot \left(0,5 + \frac{L_c}{2L_b} \right) \cdot \left(0,5 - \frac{B_c}{2b} \right), \\ R_3 &= G_k \cdot g \cdot \left(0,5 - \frac{L_c}{2L_b} \right) \cdot \left(0,5 + \frac{B_c}{2b} \right), \\ R_4 &= G_k \cdot g \cdot \left(0,5 - \frac{L_c}{2L_b} \right) \cdot \left(0,5 - \frac{B_c}{2b} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где G_k – масса кузова полувагона с грузом, кг (в дальнейших расчетах принималась равной 78 025 кг).

Нагрузки на рессорные комплекты, определяемые по формулам (6), характерны для вагона в статическом состоянии, этот режим нагружения можно распространить на вагон, движущийся с постоянной скоростью на прямолинейном горизонтальном участке пути. Однако при движении в кривой на вагон кроме силы тяжести действуют боковые силы: сила инерции от непогашенного центробежного ускорения и боковая сила, действующая на кузов вагона через автосцепные устройства и возникающая от продольной силы. Кроме того, центр масс кузова с грузом может быть смещен в поперечном направлении из-за возвышения наружного рельса в кривом участке, а на боковую стенку кузова вагона может действовать давление ветра. Вышеперечисленные боковые силы можно рассчитать следующим образом.

Сила инерции от непогашенного ускорения при прохождении вагоном кривого участка пути складывается с учетом знака из центробежной силы и силы, вызванной наклоном кузова вагона за счет возвышения наружного рельса:

$$F_p = G_k \cdot \frac{V_R^2}{R} - G_k \cdot g \cdot \frac{H_p}{2S}, \quad (7)$$

где V_R – скорость движения вагона, м/с; R – радиус кривого участка, м; H_p – величина возвышения наружного рельса, м; $2S$ – расстояние между кругами катания колес в колесной паре, м: принимают равным 1,580 м для прямой или кривой радиусом 650 м, равным 1,592 м для кривой радиусом 300 м и равным 1,595 м для кривой радиусом 250 м.

Боковая сила, действующая на кузов вагона через автосцепные устройства, находится в соответствии с рекомендациями [14] по формуле

$$P_N = N_p \cdot \frac{2L_c}{2 \cdot R}, \quad (8)$$

где N_p – продольная сила (для груженого вагона в расчете потери устойчивости наружу кривой по рекомендациям [14] принимается $N_p = 1\,000\,000$ Н, в расчете потери устойчивости внутрь кривой – $N_p = 1\,400\,000$ Н); $2L_c$ – длина вагона по осям автосцепок, м.

В соответствии с рекомендациями [14] давление ветра при расчете устойчивости вагона принимается равным $q = 360$ Па.

Учесть боковые силы в расчете нагрузок на рессорные комплекты можно с помощью исследования модели необрессоренной части кузова полувагона с грузом, показанной на рис. 3 и 4, в программе CAE, например, T-Flex с модулем «Анализ» или SolidWorks Simulation. Данные программы позволяют рассчитывать для 3D-модели кузова полувагона с грузом по методу конечных элементов (МКЭ) реакции опорных поверхностей надрессорных балок. Преимущества такого определения нагрузок на рессорные комплекты по сравнению с базовым расчетом по формулам (6) заключаются в учете воздействия боковых сил на кузов полувагона и учете всех параметров модели груза, в частности высоты его центра масс. На рис. 5 представлены результаты расчета силы реакции на левой опорной поверхности надрессорной балки первой тележки полувагона, выполненные в SolidWorks Simulation.

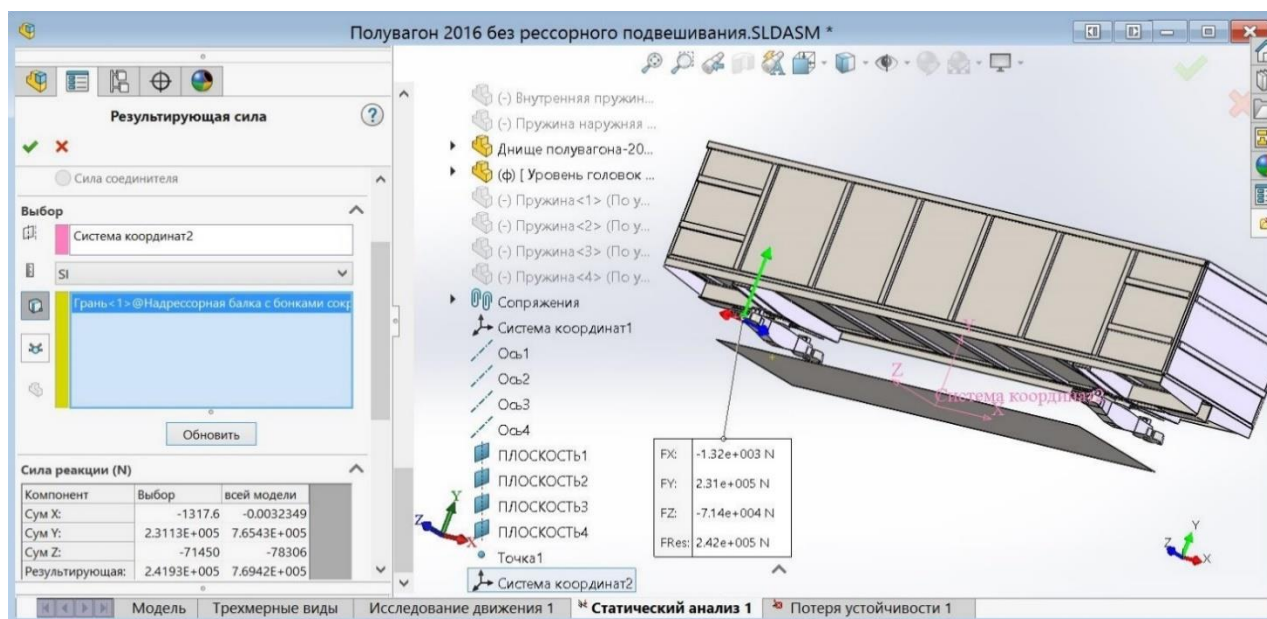


Рис. 5. Результаты расчета силы реакции на опорной поверхности надрессорной балки

Как видно из таблицы результатов на рис. 5, величина силы реакции по вертикальной координате Y равна 231 130 Н. Силы реакции в подобных расчетах определяются на поверхностях, которые в исследованиях на статическую прочность были зафиксированы как неподвижные. Этими поверхностями были четыре опорные поверхности надрессорных балок.

Для валидации расчетной модели были определены силы реакции на четырех опорных поверхностях надрессорных балок полувагона с грузом без учета боковых сил и результаты расчета по формулам (4), также не учитывающим боковые силы. В табл. 1 приведены результаты расчета нагрузок на рессорные комплекты, выполненные в SolidWorks Simulation и не учитывающие боковые силы, результаты расчета этих нагрузок по формулам (4) и результаты расчета этих нагрузок, выполненные в SolidWorks Simulation, с учетом боковых сил, которые составляли: $F_p = 54618$ Н, $P_N = 10708$ Н, $q = 360$ Па.

Таблица 1

Результаты расчета нагрузок на рессорные комплекты с учетом и без учета действия на полувагон с грузом боковых сил

Метод расчета нагрузок на рессорные комплекты	Нагрузки на рессорные комплекты от кузова полувагона с грузом			
	R_1 , Н	R_2 , Н	R_3 , Н	R_4 , Н
1-й вариант: расчет по формулам (6) без смещения суммарного центра масс	191 356	191 356	191 356	191356
2-й вариант: расчет по формулам (6) со смещением суммарного центра масс $L_c = 100$ мм, $B_c = 100$ мм	214 948	176 496	205 359	168 622
3-й вариант: расчет в SolidWorks Simulation со смещением суммарного центра масс $L_c = 100$ мм, $B_c = 100$ мм без учета боковых сил	212 200	178 580	203 670	170 980
4-й вариант: расчет в SolidWorks Simulation со смещением суммарного центра масс $L_c = 100$ мм, $B_c = 100$ мм с учетом боковых сил в кривом участке	231 130	159 440	222 630	152 220

Относительное среднеквадратическое отклонение величин нагрузок $R_1 \dots R_4$, подсчитанных в третьем варианте, от этих величин, подсчитанных во втором варианте, составило 2,4 %, что можно объяснить приближенностью МКЭ. При использовании МКЭ обычно для повышения точности уменьшают размер расчетной сетки до тех пор, пока относительная разность вычисляемого параметра в двух расчетах с разными размерами сетки не становится меньше 5 %, причем дальнейшее уменьшение размера сетки приводит к значительному увеличению продолжительности вычислений и затратам оперативной памяти компьютера.

Как видно из сравнения результатов расчета во втором и третьем вариантах, представленных в табл. 1, учет боковых сил приводит к увеличению разности между максимальной R_1 и минимальной R_4 нагрузок. Так, отношение R_1/R_4 в четвертом варианте расчета (с учетом боковых сил) равно 1,518, а эта же величина в третьем варианте расчета (без учета боковых сил) равна 1,241.

Высоту пружин рессорного комплекта, состоящего из n_0 двухрядных пружин (без учета подклиновых пружин), можно определить из следующего выражения:

$$H_{\Sigma i} = \frac{\left(\sum_{j=1}^{n1} Hn_{i,j} \cdot Cn_{i,j} + \sum_{j=1}^{n2} Hv_{i,j} \cdot Cv_{i,j} \right) - R_i}{\sum_{j=1}^{n1} Cn_{i,j} + \sum_{j=1}^{n2} Cv_{i,j}}, \quad (9)$$

где i – номер рессорного комплекта; j – номер двухрядной пружины в рессорном комплекте; $n1$ – число исправных наружных пружин; $n2$ – число исправных внутренних пружин; $Hn_{i,j}$ – высота j -й наружной пружины i -го рессорного комплекта, мм; $Cn_{i,j}$ – жесткость j -й наружной пружины i -го рессорного комплекта, Н/мм; $Hv_{i,j}$ – высота j -й внутренней пружины i -го рессорного комплекта, мм; $Cv_{i,j}$ – жесткость j -й внутренней пружины i -го рессорного комплекта, Н/мм. Если все пружины рессорного комплекта исправны, то $n1 = n2 = n_0$.

Уравнение (9) составлено в виде, позволяющем рассчитывать прогиб рессорного комплекта, состоящего из пружин разной высоты, учитывать возможное отсутствие или излом части пружин, а также замену пружины на пружину другого типа с другим диаметром прутка.

Согласно рекомендациям ГОСТ 13765-86 жесткость пружин $Cn_{i,j}$ или $Cv_{i,j}$ [Н/мм] определяется по формуле [15]:

$$C = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n}, \quad (10)$$

где G – модуль сдвига, МПа; d – диаметр прутка пружины, мм; D – средний диаметр пружины, мм;

n – число рабочих витков пружины.

Модуль сдвига можно рассчитать по значениям модуля упругости Юнга и коэффициента Пуассона по известной формуле:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}, \quad (11)$$

где E – модуль упругости Юнга, МПа; μ – коэффициент Пуассона.

В работе [16] в виде графиков представлены зависимости коэффициента Пуассона и модуля упругости Юнга от температуры, полученные путем обработки справочных значений. Использование этих данных позволяет уточнять величину жесткости пружин с помощью формул (10) и (11) для заданных погодных условий эксплуатации. Так, согласно [16] жесткость пружин понижалась на 4 % при повышении температуры от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Формулы (10) и (11) позволяют определять величину жесткости пружины с учетом ее реальных размеров, которые можно получить путем обмера лишь в процессе расследования причин схода грузового вагона с рельс. Это условие ограничивает использование цифровой модели полувагона с грузом для прогнозирования работоспособности полувагона, то есть в качестве цифровой тени, однако решает задачу проведения судебной экспертизы при спорах хозяйствующих субъектов об ответственности за возникновение неисправностей или расследовании сходов, аварий, крушений. При проведении такой экспертизы жесткость пружин можно определять из эксперимента как частное от деления нагрузки на прогиб. Также в ходе судебного расследования причин схода вагонов с рельс измеряется высота каждой пружины.

Определив из уравнения (9) общую высоту сжатого рессорного комплекта $H_{\Sigma i}$, можно найти нагрузки на каждую наружную (сила $F_{n_{i,j}}$) и внутреннюю (сила $F_{v_{i,j}}$) пружину по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} F_{n_{i,j}} &= (H_{n_{i,j}} - H_{\Sigma i}) \cdot C_{n_{i,j}}, \\ F_{v_{i,j}} &= (H_{v_{i,j}} - H_{\Sigma i}) \cdot C_{v_{i,j}}. \end{aligned} \quad (12)$$

По величинам нагрузок на одиночные пружины, найденным по формулам (12), можно определить касательные напряжения из выражения, рекомендованного [15] для определения максимального касательного напряжения,

$$\tau_k = \frac{8 \cdot F \cdot D \cdot k}{\pi \cdot d^3}, \quad (13)$$

где F – сила, найденная по формулам (12), Н; k – коэффициент, учитывающий кривизну витков пружины. Величина коэффициента k находится по рекомендациям [15]:

$$k = \frac{4 \cdot i - 1}{4 \cdot i - 4} + \frac{0,615}{i}, \quad (14)$$

где $i = D/d$ – индекс пружины.

Для нахождения запаса прочности необходимо предельную величину касательного напряжения для заданного материала прутка пружины, которую можно найти из государственного стандарта, соответствующего классу пружины, разделить на найденную по формуле (13) величину касательного напряжения. Так по ГОСТ 13765-86 максимальная величина касательного напряжения для пружин грузовых тележек назначается по табл. 2 ГОСТ 13764-86 [21], в которой для пружин II класса 4-го разряда $\tau_{k \max} = 800$ МПа [17]. Коэффициент запаса прочности при этом находится по формуле:

$$k_{\tau} = \frac{\tau_{k \max}}{\tau_k}. \quad (15)$$

Если $k_{\tau} > 1$, то при статическом нагружении не произойдет разрушения пружины.

Запас прочности при статическом исследовании в SolidWorks Simulation можно определить с помощью виртуального испытательного стенда пружин, описанного в [16–18]. Нагрузив модель пружины силой $F_{n_{i,j}}$ или $F_{v_{i,j}}$ при использовании их максимальных значений, можно в SolidWorks Simulation найти коэффициент запаса прочности по критерию максимального напряжения при сдвиге в контексте модели Треска:

$$k_{Tresca} = \frac{0,5 \cdot [\sigma_{\tau}]}{\tau_{\max}}, \quad (16)$$

где $[\sigma_{\tau}]$ – предел текучести материала пружины; $\tau_{\max}$ – максимальное напряжение при сдвиге, которое находится выбором наибольшего значения среди сдвиговых напряжений $\sigma_{12} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$; $\sigma_{23} = (\sigma_2 - \sigma_3)/2$; $\sigma_{13} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, определяемых по главным напряжениям $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, ранжированным в порядке уменьшения.

Если $k_{Tresca} > 1$, то при статическом нагружении не произойдет разрушения пружины.

В SolidWorks Simulation коэффициент запаса прочности можно также найти по критерию Губера – Мизеса, который обосновывался в [8] как более предпочтительный

$$k_{Mises} = \frac{0,57735 \cdot [\sigma_{\tau}]}{\tau}, \quad (17)$$

где τ – максимальное касательное напряжение по Мизесу, определяемое из выражения:

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (18)$$

Если $k_{Mises} > 1$, то при статическом нагружении не произойдет разрушения пружины.

В табл. 2 сведены результаты расчетов максимальных касательных напряжений и коэффициентов запаса прочности для наружной и внутренней пружин комплекта, на который приходится максимальная нагрузка. Значения нагрузки брались из табл. 1.

Таблица 2

Результаты расчета касательных напряжений и коэффициентов запаса прочности с учетом и без учета действия на полувагон с грузом боковых сил

Метод расчета нагрузок, касательных напряжений и коэффициентов запаса одиночных пружин	Максимальное касательное напряжение в пружине, МПа		Коэффициент запаса прочности пружины	
	наружная	внутренняя	наружная	внутренняя
1-й вариант: расчет максимальной нагрузки по формуле (6) без смещения суммарного центра масс, расчет касательного напряжения по формуле (13), расчет коэффициента запаса прочности по формуле (15)	525,3	544,2	1,523	1,470
2-й вариант: расчет максимальной нагрузки по формуле (6) со смещением суммарного центра масс $L_c = 100$ мм, $B_c = 100$ мм, расчет касательного напряжения по формуле (13), расчет коэффициента запаса прочности по формуле (15)	580,6	601,5	1,378	1,330
3-й вариант: расчет в SolidWorks Simulation со смещением суммарного центра масс $L_c = 100$ мм, $B_c = 100$ мм без учета боковых сил, расчет коэффициента запаса прочности по критерию Треска – формула (16)	607	619,0	1,091	1,070

Окончание табл. 2

Метод расчета нагрузок, касательных напряжений и коэффициентов запаса одиночных пружин	Максимальное касательное напряжение в пружине, МПа		Коэффициент запаса прочности пружины	
	наружная	внутренняя	наружная	внутренняя
4-й вариант: расчет в SolidWorks Simulation со смещением суммарного центра масс $L_c = 100$ мм, $B_c = 100$ мм без учета боковых сил, расчет коэффициента запаса прочности по критерию Губера – Мизеса – формулы (17), (18)	607,4	620,1	1,260	1,234
5-й вариант: расчет в SolidWorks Simulation со смещением суммарного центра масс $L_c = 100$ мм, $B_c = 100$ мм с учетом боковых сил, расчет коэффициента запаса прочности по критерию Треска – формула (16)	660,5	674,0	1,003	0,983
6-й вариант: расчет в SolidWorks Simulation со смещением суммарного центра масс $L_c = 100$ мм, $B_c = 100$ мм с учетом боковых сил, расчет коэффициента запаса прочности по критерию Губера – Мизеса – формулы (17), (18)	661,1	674,9	1,157	1,134

Как видно из табл. 2, максимальные касательные напряжения в вариантах расчета 2 и 3 отличаются на 2,9...4,5 %. Также в этих вариантах заметно расхождение коэффициентов запаса прочности примерно на 24...26 %, что объясняется различием в выборе максимально допустимого значения касательного напряжения. Так, в SolidWorks Simulation в соответствии с формулой (16) в качестве максимально допустимого касательного напряжения используется половина предела текучести материала пружины при сжатии. При значении $[\sigma_\tau] = 1325$ МПа, принятом в SolidWorks Simulation для материала пружин 60C2XA, максимально допустимое значение касательного напряжения составляло 662,5 МПа, что на 21 % меньше значения $\tau_{k \max} = 800$ МПа, принятого по ГОСТ 13764-86 [18–22].

Сравнение результатов в вариантах расчета 3 и 4 в табл. 2 показывает незначительные (менее 0,2 %) расхождения в значениях максимальных касательных напряжений. Сравнение результатов в вариантах расчета 2 и 4 показывает расхождения значений коэффициентов запаса прочности на 7,8...9,4 %, что значительно меньше расхождений в вариантах 2 и 3.

Сравнение между собой результатов в вариантах расчета 3 и 5, а также 4 и 6 в табл. 2 показывает заметное (на 6...7 %) снижение коэффициента запаса прочности за счет учета боковых сил. Использование в SolidWorks Simulation критерия Треска (16) при исследовании внутренней пружины с максимальными нагрузками, найденными с учетом смещения суммарного центра масс кузова и груза и с учетом боковых сил, приводит к выводу о возможном разрушении пружины. По остальным критериям разрушение пружин не прогнозируется.

В данной работе не ставилась цель создания цифровой тени полувагона, однако на основе проведенного исследования можно предполагать возможность эволюции параметрической цифровой модели полувагона с произвольным центром тяжести до цифровой тени и цифрового двойника. Так, при использовании данных эксплуатации полувагона, таких как фотографии полувагона в двух ракурсах, погодные условия, прохождение кривого участка с известным возвышением наружного рельса, реальные размеры пружин (средний диаметр, диаметр прутка, высота), возможно получение прогноза разрушения наиболее нагруженной пружины и выдача предупреждения о необходимости запрета эксплуатации такого вагона. Функционирование цифровой тени и цифрового двойника конкретного полувагона возможно на облачной цифровой платформе управления жизненным циклом подвижного состава при использовании искусственного интеллекта, собирающего данные о сочетании возможных неблагоприятных факторов эксплуатации полувагона (данные по колесному взвешиванию, фотографии кузова с грузом, прогноз силы и направления ветра, данные кривого участка пути предполагаемого маршрута)

и использующего данные электронного паспорта полувагона, где актуализированы параметры всех пружин (средний диаметр, диаметр прутка, высота). К сожалению, в настоящее время электронный паспорт вагона не содержит размеров пружин на момент формирования тележки и не предусматривает изменения этих данных при замене пружин в эксплуатации.

Выводы

Разработана параметрическая цифровая модель полувагона с произвольным положением суммарного центра тяжести, позволяющая моделировать положение груза по фотографии кузова с грузом, полученной в процессе эксплуатации, выявлять наиболее нагруженную пружину рессорного подвешивания полувагона в зависимости от заданных высот пружин и положения суммарного центра масс кузова и груза, определять НДС пружины и коэффициент ее запаса прочности по различным критериям.

Как показали тестовые расчеты наиболее нагруженных пружин при максимально допустимых смещениях суммарного центра масс сыпучего груза в полувагоне по 100 мм при прохождении кривого участка радиусом 650 м с непогашенным ускорением $0,7 \text{ м/с}^2$ и возвышением наружного рельса на 50 мм прогнозируется разрушение внутренней пружины по критерию Треска. По критерию Губера – Мизеса и по расчету, проведенному согласно методике, рекомендуемой ГОСТ 13765-86, разрушение пружин не прогнозируется.

Таким образом, разработанная параметрическая цифровая модель полувагона с сыпучим грузом может служить основой для построения цифровой тени при использовании данных эксплуатации полувагона (фотографии полувагона в двух ракурсах, погодные условия, прохождение кривого участка с известным возвышением наружного рельса), что позволит предсказывать возможное разрушение пружины при стечении неблагоприятных факторов: смещении суммарного центра масс кузова и груза, прохождении кривого участка с непогашенным ускорением, различиях высот пружин в комплекте и т. д.

Список литературы

- 1 Агафонов, М. С. Отцепки грузовых вагонов в неплановый ремонт за 9 месяцев 2024 г. / М. С. Агафонов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2024. – № 4 (80). – С. 8–9. – ISSN 1817-6089.
- 2 Бороненко, Ю. П. Причины излома пружин тележек типа 18-100 в эксплуатации / Ю. П. Бороненко, С. В. Меркушев // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2021. – № 4 (95). – С. 41–43. – ISSN 1994-831X.
- 3 РД 32 ЦВ 052-2009. Общее руководство по ремонту. Ремонт тележек грузовых вагонов тип 2 по ГОСТ 9246 с боковыми скользунами зазорного типа : утвержден Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества 13–14 мая 2010 г. № 52 (ред. от 11.06.2025). – Москва, 2010. – 80 с.
- 4 РД 32 ЦВ-056-97. Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм. Руководство по текущему отцепочному ремонту : утвержден МПС РФ 2 сентября 1997 г. (ред. от 19.10.2018). – Москва : МПС РФ, 1997. – 32 с.
- 5 Прогрессивные системы взвешивания вагонов // Железные дороги мира. – 2015. – № 5. – С. 55–59. – ISSN 0321-1495.
- 6 Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах : утверждены МПС России 27 мая 2003 г. № ЦМ-943. – Москва : Юртранс, 2003. – 544 с.

References

- 1 Agafonov, M. Uncoupling of freight cars for unscheduled repairs over 9 months of 2024 / M. S. Agafonov // Vagony i vagonnoe hozyajstvo. – 2024. – No. 4 (80). – P. 8–9. – ISSN 1817-6089.
- 2 Boronenko, Yu. P. Causes of fracture of springs of type 18-100 bogies in operation / Yu. P. Boronenko, S. V. Merkushev // Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics. – 2021. – No. 4 (95). – P. 41–43. – ISSN 1994-831X.
- 3 RD 32 CV 052-2009. General repair guide. Repair of freight car bogies trolleys type 2 according to GOST 9246 with clearance type side slides : approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States on May 13–14, 2010 No. 52 (amended on 11.06.2025). – Moscow, 2010. – 80 p.
- 4 RD 32 CV-056-97. Freight cars of 1520 mm gauge railways. Guidelines for routine uncoupling repairs : approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation on September 2, 1997 (amended on 19.10.2018). – Moscow : Ministry of Railways of the Russian Federation, 1997. – 32 p.
- 5 Progressive Carriage Weighing Systems // Rail international. – 2015. – No. 5. – P. 55–59. – ISSN 0321-1495.
- 6 Technical conditions for the placement and fastening of goods in wagons and containers : approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation on May 27, 2003 No. CM-943. – Moscow : Yurtrans, 2003. – 544 p.

7 **Винокурова, Т. А.** Алгоритм автоматизированного контроля смещения общего центра тяжести груза в вагоне при перевозке железнодорожным транспортом / Т. А. Винокурова, А. Б. Галушкин, А. А. Рахмилевич // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2019. – Т. 78, № 5. – С. 266–273. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-5-273.

8 **Попович, С. И.** Определение горизонтальной жесткости и оценка напряженного состояния при проектировании пружин тележек грузовых вагонов / С. И. Попович, Д. В. Шевченко, А. М. Орлова // Проблемы и перспективы развития вагоностроения : сборник научных трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции, Брянск, 18–19 апреля 2019 года. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 2019. – С. 135–138. – ISBN 978-5-907270-40-4.

9 **Попова, Т. А.** Многокритериальный подход к определению устойчивости подвижного состава / Т. А. Попова, Г. И. Петров // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1 (70). – С. 117–125. – ISSN 1818-5509.

10 **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.

11 **Осипова, Т. П.** Модель технического обслуживания грузовых вагонов с сокращением влияния человеческого фактора / Т. П. Осипова, А. В. Жебанов // Наука и образование транспорту. – 2025. – № 1. – С. 62–64. – EDN FGAJKO.

12 **Жебанов, А. В.** Оптимизация осмотра грузовых вагонов на пунктах технического обслуживания при использовании возможностей искусственного интеллекта / А. В. Жебанов, Ю. А. Печенкина // Актуальные проблемы современного транспорта. – 2024. – № 4 (18). – С. 27–36. – eISSN 2949-091X.

13 **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 (58). – С. 9–13. – ISSN 1817-6089.

14 **Жебанов, А. В.** Передовая технология технического обслуживания подвижного состава в различных условиях / А. В. Жебанов, А. Р. Вильданов // Передовые технологии и инновации в образовании и науке для улучшения качества жизни и стимулирования устойчивого экономического роста :

7 **Vinokurova, T. A.** Algorithm for automated control of the displacement of the general center of gravity of cargo in a carriage during railway transportation / T. A. Vinokurova, A. B. Galushkin, A. A. Rakhmievich // Russian Railway Science Journal. – 2019. – Vol. 78, No. 5. – P. 266–273. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-5-273.

8 **Popovich, S. I.** Determination of horizontal rigidity and stress state assessment in the design of freight car bogie springs / S. I. Popovich, D. V. Shevchenko, A. M. Orlova // Problems and prospects of car building development : collection of scientific papers of the VIII All-Russian scientific and technical conference, Bryansk, April 18–19, 2019. – Bryansk : Bryansk State Technical University, 2019. – P. 135–138. – ISBN 978-5-907270-40-4.

9 **Popova, T. A.** A multi-criteria approach to determining the stability of rolling stock / T. A. Popova, G. I. Petrov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 1 (70). – P. 117–125. – ISSN 1818-5509.

10 **Khatlamadzhiyan, A. E.** Application of modern digital technologies and technical means to improve the safety and efficiency of the rolling stock transportation process / A. E. Khatlamadzhiyan, I. A. Yaitkov, I. A. Stepin // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2020. – No. 1 (50). – P. 107–110. – ISSN 1818-5509.

11 **Osipova, T. P.** Model of technical maintenance of freight cars with reducing the influence of the human factor / T. P. Osipova, A. V. Zhebanov // Science and Education for Transport. – 2025. – No. 1. – P. 62–64. – EDN FGAJKO.

12 **Zhebanov, A. V.** Optimization of freight car inspection at maintenance facilities using artificial intelligence / A. V. Zhebanov, Yu. A. Pechenkina // Actual problems of modern transport. – 2024. – No. 4 (18). – P. 27–36. – eISSN 2949-091X.

13 **Khatlamadzhiyan, A. E.** Integrated post of automated reception and diagnostics of rolling stock at sorting stations / A. E. Khatlamadzhiyan, A. I. Lebedev // Wagons and carriage industry. – 2019. – No. 2 (58). – P. 9–13. – ISSN 1817-6089.

14 **Zhebanov, A. V.** Advanced technology for technical maintenance of rolling stock in various conditions / A. V. Zhebanov, A. R. Vildanov // Advanced technologies and innovations in education and science to improve the quality of life and stimulate sustainable economic growth : collection of articles from the VIII International scientific and

сборник статей VIII Международной научно-технической конференции 03–05 декабря 2025 года ; Белорусский государственный технологический университет. В 3 т. Т. 2. – Минск : Учреждение образования Белорусский государственный технологический университет, 2025. – С. 212–216. – ISBN 978-985-897-319-3.

15 **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.

16 **Печенкина, Ю. А.** Формирование базы данных с целью создания цифрового двойника грузового вагона при его эксплуатации / Ю. А. Печенкина, А. В. Жебанов // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования : материалы Международной научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2025 года. – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 519–521. – ISBN 978-5-89873-689-7.

17 **Петрова, А. В.** Цифровые двойники и цифровые тени в транспортно-логистической сфере / А. В. Петрова // Железнодорожный транспорт и технологии : сборник трудов международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 29–30 ноября 2022 года / Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС). Вып. 1 (249). – Екатеринбург : УРГУПС, 2023. – С. 206–208. – ISBN 978-5-94614-528-2.

18 **ГОСТ 33211–2014.** Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 54 с.

19 **ГОСТ 13765–86.** Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Обозначение параметров, методика определения размеров. – Москва : ИПК «Издательство стандартов», 1999. – 13 с.

20 **Балалаев, А. Н.** Цифровой стенд для виртуальных испытаний двухрядных пружин различной высоты с имитацией отрицательных температур окружающей среды / А. Н. Балалаев // Наука и образование транспорту. – 2025. – № 1. – С. 10–14. – EDN BHYVXZ.

21 **ГОСТ 13764–86.** Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Классификация. – Москва : Стандартинформ, 2007. – 6 с.

22 **Балалаев, А. Н.** Выявление на виртуальном испытательном стенде пружин рессорного подвешивания с недопустимыми в эксплуатации параметрами / А. Н. Балалаев, А. В. Жебанов // Транспорт Урала. – 2025. – № 2 (85). – С. 29–36. – DOI 10.20291/1815-9400-2025-2-29-36.

technical conference, December 3–5, 2025 ; Belarusian State Technological University. In 3 vols. Vol. 2. – Minsk : Educational Institution Belarusian State Technological University, 2025. – P. 212–216. – ISBN 978-985-897-319-3.

15 **Shevchenko, D. V.** Methodology for building 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.

16 **Pechenkina, Yu. A.** Formation of a database for the purpose of creating a digital twin of a freight car during its operation / Yu. A. Pechenkina, A. V. Zhebanov // Digital Systems and Models : theory and practice of design, development, and use : proceedings of the International scientific and practical conference, Kazan, April 10–11, 2025. – Kazan : Kazan State Power Engineering University, 2025. – P. 519–521. – ISBN 978-5-89873-689-7.

17 **Petrova, A. V.** Digital twins and digital shadows in the transport and logistics sphere / A. V. Petrova // Railway transport and technologies : collection of papers of the International scientific and practical conference, Yekaterinburg, November 29–30, 2022 / Ural State Transport University (USTU). Iss. 1 (249). – Yekaterinburg : USTU, 2023. – P. 206–208. – ISBN 978-5-94614-528-2.

18 **GOST 33211–2014.** Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities. – Moscow : Standartinform, 2016. – 54 p.

19 **GOST 13765–86.** Cylindrical compression and extension screw springs made of round-section steel. Designation of parameters and methods for determining dimensions. – Moscow : IPK Publishing House of Standards, 1999. – 13 p.

20 **Balalaev, A. N.** Digital stand for virtual testing of double-row springs of various heights with simulation of negative ambient temperatures / A. N. Balalaev // Science and Education for Transport. – 2025. – No. 1. – P. 10–14. – EDN BHYVXZ.

21 **GOST 13764–86.** Cylindrical compression and extension screw springs made of round-section steel. Classification. – Moscow : Standartinform, 2007. – 6 p.

22 **Balalaev, A. N.** Identification of spring suspension elements with unacceptable operating parameters on a virtual test stand / A. N. Balalaev, A. V. Zhebanov // Transport of the Urals. – 2025. – No. 2 (85). – P. 29–36. – DOI 10.20291/1815-9400-2025-2-29-36.

A. N. Balalaev, A. V. Zhebanov

**PARAMETRIC DIGITAL MODEL OF A GONDOLA CAR
WITH AN ARBITRARY POSITION OF THE CENTER OF GRAVITY**

Abstract. One of the goals of railway transport digitalization is to create digital twins of wagons, which allow for the management of their life cycle. The initial stages of creating a digital twin of a wagon include, firstly, the development of digital models of all modifications of the main components of a specific model of wagon, and, secondly, the expansion of the functions of these models to ensure the ability to predict the performance of wagon components under specific operating conditions with specified parameters and possible defects, which makes these models digital shadows of specific components of a specific wagon. In addition to predicting the performance of the units and, consequently, the entire car, their digital shadow allows for the reasonable identification of the causes of malfunctions that prevent the operation, derailments, accidents, and crashes, which can be used in forensic examinations in disputes between business entities regarding liability for the occurrence of malfunctions or the investigation of incidents. The initial stage of developing a digital shadow of a gondola is the creation of a parametric digital model of the body of a gondola with cargo. The issue of using the results of a commercial inspection of a gondola with loose cargo to model the position of the total center of mass of the body and cargo is being considered. An algorithm for determining the maximum load on the spring set coils of a gondola bogie has been proposed. The found value of the maximum load on the spring is used to calculate the stress-strain state of the spring and determine the safety factor according to various criteria.

Keywords: digital gondola car model, total center of mass, spring set, bulk cargo model, spring model, safety margin.

For citation: Balalaev, A. N. Parametric digital model of a gondola car with an arbitrary position of the center of gravity / A. N. Balalaev, A. V. Zhebanov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 81–95. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_2_81.

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

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

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

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

Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, В. Н. Иванов, К. Е. Пронин

**АРХИТЕКТУРА И АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ
ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ
ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ЦИКЛОГРАММАМ ***

Аннотация. Предложены архитектура и алгоритм функционирования автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции тягового электродвигателя (ТЭД) НБ-514Е электровозов ЗЭС5К по эксплуатационным циклограммам нагружения. Необходимость разработки такой системы связана с тем, что применяемый на практике периодический контроль сопротивления изоляции и локальный контроль отдельных параметров не позволяют учитывать термическую историю работы двигателя и своевременно оценивать накопленный тепловой износ изоляции. В качестве вычислительного ядра системы используется цифровой двойник теплового состояния, обеспечивающий расчет перегрева в контролируемых и труднодоступных зонах, формирование виртуальных температурных оценок, сравнение расчетных и нормативных значений, а также прогноз остаточного ресурса. В структуру системы включены подсистема сбора эксплуатационных данных, модуль формирования циклограмм, блок сравнения данных и модуль принятия решений. Отличительной особенностью предложенного подхода является использование фактической токовой нагрузки электровоза для периодического уточнения теплового состояния ТЭД и последующего перехода от диагностики перегрева к прогнозной оценке износа изоляции. Результатом работы являются формализованные структура и алгоритм системы, ориентированные на применение в задачах мониторинга, диагностики и поддержки эксплуатационных решений.

Ключевые слова: автоматизированный мониторинг, тяговый электродвигатель, остаточный ресурс изоляции, цифровой двойник теплового состояния, циклограмма нагружения, тепловое старение, конечно-элементное моделирование, принятие управляющих решений, система поддержки эксплуатации.

Для цитирования: Архитектура и алгоритм функционирования автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции тягового электродвигателя по эксплуатационным циклограммам / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, В. Н. Иванов, К. Е. Пронин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 96–104. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_96.

Введение

Надежность работы магистральных электровозов в значительной степени зависит от технического состояния ТЭД, прежде всего от состояния их изоляционных систем. Для ТЭД НБ-514Е электровозов серии ЗЭС5К на практике по-прежнему преобладают периодические осмотры, измерения сопротивления изоляции и локальный контроль отдельных параметров. Такой способ контроля позволяет выявлять уже сформировавшиеся отклонения, однако не дает возможности проследить термическую историю нагружения изоляции в межосмотровый период и, как следствие, затрудняет оценку фактического остаточного ресурса по данным реальной эксплуатации [1, 2].

Еще одним ограничением традиционных средств диагностики является то, что они в основном фиксируют превышение пороговых значений, но слабо используют накопленные эксплуатационные данные для анализа деградационных процессов. При таком подходе вне наблюдения остаются внутренние и труднодоступные зоны конструкции, в которых могут формироваться локальные перегревы, непосредственно влияющие на скорость старения изоляции и снижение ее электрической прочности [3, 4].

Развитие микропроцессорных систем управления и регистрации параметров работы электроподвижного состава создало основу для перехода от периодических диагностических процедур к непрерывному мониторингу состояния электрических машин по эксплуатационным данным. В этих условиях на первый план выходят методы, объединяющие измерительную информацию, расчетные модели

* Статья выполнена в рамках научно-исследовательской работы № 1025032600010-0-2.2.6;2.3.1.

и алгоритмы поддержки решений, позволяющие оценивать техническое состояние оборудования непосредственно в процессе эксплуатации [5, 6].

Современные методы мониторинга электрических машин ориентированы не только на выявление скрытых дефектов, но и на анализ тепловых режимов, напрямую связанных с деградацией изоляции. Важной тенденцией является переход от регистрации отдельных отклонений к оценке совокупного воздействия эксплуатационных факторов, определяющих развитие отказов и снижение ресурса машины [7, 8].

Эти тенденции согласуются с развитием цифровых двойников технических объектов, для которых характерно совместное использование сенсорных данных, расчетных моделей и вычислительных сервисов, поддерживающих эксплуатационные решения [9, 10]. Применительно к электрическим машинам наибольший интерес представляют цифровые двойники, позволяющие рассчитывать тепловое состояние, корректировать параметры модели по данным эксплуатации и использовать результаты расчета для задач прогнозного обслуживания и оценки остаточного ресурса [11, 12].

В этой связи актуальной становится разработка автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции ТЭД, в которой цифровой двойник теплового состояния используется как действующее вычислительное ядро, а не как статическая информационная схема. Это дает возможность перейти от фиксации отдельных фактов перегрева к оценке накопленного термического износа, вычислению температурных параметров в труднодоступных зонах и выработке решений по допустимым режимам эксплуатации.

Цель работы – разработка архитектуры и алгоритма функционирования автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции ТЭД НБ-514Е по эксплуатационным циклограммам нагружения.

Следует отметить, что предлагаемая архитектура и общий принцип алгоритмической организации системы не ограничиваются одним типом тягового электродвигателя и могут быть адаптированы к другим объектам тягового электропривода. В настоящей статье рассмотрение ограничено ТЭД НБ-514Е электровозов ЗЭС5К, поскольку именно для данного двигателя сформирован исходный массив эксплуатационных данных, разработан тепловой прототип и представляется возможной предметная постановка задачи оценки остаточного ресурса изоляции.

Постановка задачи мониторинга

В качестве объекта мониторинга рассматривается ТЭД НБ-514Е, функционирующий в условиях переменных тепловых нагрузок, определяемых режимами ведения поезда. Задача мониторинга состоит в построении автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции, работающей в режиме, близком к реальному времени, под которым в настоящей работе понимается обновление оценок теплового состояния и остаточного ресурса с малой вычислительной задержкой относительно поступающего потока эксплуатационных данных. При этом детализированный конечно-элементный расчет не выполняется на каждом временном шаге, а используется для периодического уточнения параметров теплового прототипа.

Вход системы образует поток эксплуатационных данных, формируемый бортовыми средствами регистрации электровоза. В дискретные моменты времени $k = 1, 2, \dots, N$ задается вектор измерений:

$$z_k = \{I_k, U_k, v_k, t_k, T_k^{\text{окр}}\}, \quad (1)$$

где I_k – ток ТЭД, А; U_k – напряжение, В; v_k – скорость движения, км/ч; t_k – метка времени; $T_k^{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

По последовательности векторов измерений (1) формируется ступенчатая циклограмма нагружения:

$$I(t) = \{(I_i, \Delta t_i)\}_{i=1}^M, \quad (2)$$

где I_i – уровень тока на i -м интервале; Δt_i – длительность интервала;

M – число интервалов в циклограмме.

Параметрическое состояние теплового прототипа двигателя описывается вектором:

$$p_k = \{T, \tau_{\infty}(I), \alpha_{\text{тп}}, R_{\text{ном}}, b_z\}, \quad (3)$$

где T – постоянная времени нагрева; $\tau_{\infty}(I)$ – установившийся перегрев при токе I ;

$\alpha_{\text{тп}}$ – коэффициент теплоотдачи; $R_{\text{ном}}$ – номинальный ресурс изоляции;

b_z – параметр модели старения.

Текущее термическое состояние изоляции задается вектором:

$$x_k = \{\tau_k, T_k^{\text{из}}, q_k\}, \quad (4)$$

где τ_k – поле перегревов в контролируемых зонах; $T_k^{\text{из}}$ – температура изоляции в лимитирующих точках; q_k – накопленный относительный износ ресурса.

На основе вектора измерений (1), сценария нагружения u_k и параметров модели p_{k-1} тепловой прототип формирует расчетное состояние:

$$x_k = F(u_k, p_{k-1}), \quad (5)$$

где F – оператор теплового расчета, включающий определение перегрева по циклограмме с учетом тепловой инерционности и вычисление накопленного износа в рамках принятой модели старения.

На следующем этапе формируется вектор виртуальных измерений температурных параметров:

$$y_k^v = H(x_k), \quad (6)$$

где H – оператор отображения расчетного состояния в пространство параметров, сопоставимых с нормативной оценкой по правилам тяговых расчетов (ПТР).

Параметры теплового прототипа корректируются по критерию наименьшего расхождения между нормативной и расчетной оценками температурного состояния. Для этого используется функционал рассогласования, заданный выражением (7):

$$J(p_k) = \|y_k^{\text{ПТР}} - y_k^{v, \text{ПТР}}\|_W^2 + \lambda \|p_k - p_{k-1}\|^2, \quad (7)$$

где $y_k^{\text{ПТР}}$ – нормативная оценка перегрева; $y_k^{v, \text{ПТР}}$ – виртуальная оценка в сопоставимых контрольных точках; W – матрица весовых коэффициентов; λ – параметр регуляризации, ограничивающий неустойчивость процедуры идентификации.

Степень отклонения текущего состояния от допустимого уровня дополнительно оценивается с помощью диагностического индекса, определяемого выражением:

$$D_k = \max_i \frac{|y_{i,k}^{\text{ПТР}} - y_{i,k}^{v, \text{ПТР}}|}{y_i^{\text{доп}}}, \quad (8)$$

где $y_i^{\text{доп}}$ – допустимое отклонение соответствующего контролируемого параметра.

По результатам расчетного цикла формируется интегральная оценка технического состояния объекта, представленная выражением:

$$S_k = C(D_k, x_k, y_k^v), \quad (9)$$

где S_k – класс состояния и режима эксплуатации объекта; в рамках принятой классификации ей сопоставляются состояния «штатный», «предупредительный», «опасный» и «аварийный».

Оценка остаточного ресурса определяется выражением (10), которое связывает текущее состояние модели с накопленной историей нагружения:

$$R_k^{\text{ост}} = \Psi(\{u_j\}_{j=1}^k, \{x_j\}_{j=1}^k, \{S_j\}_{j=1}^k), \quad (10)$$

где Ψ – оператор прогнозирования остаточного ресурса по текущему состоянию модели и истории нагружения.

Итоговое управляющее решение формируется на основе следующего правила:

$$Y_k = \begin{cases} 1, & R_k^{\text{ост}} \leq R_{\text{крит}} \text{ или } D_k > D_{\text{доп}}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (11)$$

где $Y_k = 1$ соответствует необходимости ограничения режима эксплуатации или проведения внеочередного обследования объекта.

Архитектура автоматизированной системы мониторинга

Предлагаемая система мониторинга имеет модульную структуру и включает периферийный, облачный и вычислительный контуры, совместно образующие единый киберфизический комплекс. Исходные данные о режимах работы ТЭД поступают от бортовых систем регистрации электровоза ЗЭС5К, включая диагностический комплекс и систему управления движением, в виде потока значений

тока, напряжения, скорости, температуры окружающей среды и временных меток. На уровне микроконтроллерного блока выполняются первичная фильтрация, синхронизация измерительных каналов, нормализация данных и формирование ступенчатых циклограмм нагружения. После этого обработанная информация по беспроводному каналу связи передается на облачный сервер, где осуществляется ее накопление, структурирование и подготовка для расчетных и визуализационных модулей.

Ключевым элементом системы является вычислительное ядро, реализующее цифровой двойник теплового состояния ТЭД [11, 12]. Оно включает три взаимосвязанных компонента.

Первым элементом является цифровой двойник теплового состояния ТЭД, который представляет собой расчетную модель, в которой воспроизведены конструктивная схема двигателя, теплофизические характеристики материалов и граничные условия теплообмена. По данным циклограмм нагружения модель рассчитывает температурное поле и перегрев изоляции, а ее параметры затем корректируются по результатам сопоставления расчетных и нормативных оценок. Под цифровым двойником теплового состояния ТЭД в настоящей работе понимается совокупность двух взаимосвязанных моделей: детализированной конечно-элементной модели, используемой для предварительного расчета температурного поля и идентификации параметров, и редуцированного теплового прототипа, предназначенного для оперативного обновления температурных оценок по эксплуатационным циклограммам. Конечно-элементная модель реализуется в специализированной CAE-среде теплового анализа, при этом расчетная сетка формируется с локальным сгущением в термически напряженных зонах – в области пазовой изоляции, лобовых частей обмоток и прилегающих участков активных частей. Детализированный расчет используется не в непрерывном режиме, а как периодическая процедура уточнения параметров прототипа. Оперативный контур мониторинга работает на основе редуцированной модели, что позволяет обновлять оценки теплового состояния и остаточного ресурса в темпе поступления эксплуатационных данных.

Виртуальная система оценки температур представляет собой модельный слой, предназначенный для вычисления температурных параметров в выбранных точках конструкции, в том числе в зонах, где установка физических датчиков затруднена или невозможна, например, в пазовой изоляции якоря, лобовых частях обмоток и внутренних слоях изоляционных пакетов. Это позволяет расширить наблюдаемое пространство объекта без пропорционального наращивания числа измерительных каналов.

Модуль визуализации и поддержки принятия решений предназначен для представления результатов мониторинга в форме, пригодной для инженерной интерпретации. В нем отображаются температурные поля, временные тренды перегрева, распределения температуры по активным частям двигателя и интерфейсные представления, используемые оператором при анализе состояния объекта.

Блок сравнения данных (БСД) выполняет сопоставление виртуальных измерений, полученных от цифрового двойника, с нормативной оценкой перегрева по ПТР. Если выявленные отклонения превышают установленные пороги, система формирует диагностическое сообщение, указывающее на возможное изменение теплового состояния изоляции, нарушение условий охлаждения либо необходимость корректировки параметров модели.

Модуль принятия решений (МПР) объединяет информацию о текущем термическом состоянии, накопленном износе и прогнозе остаточного ресурса. На этой основе формируются выводы о классе технического состояния объекта, рекомендации по ограничению режима эксплуатации, а также решения о необходимости внеочередного технического обслуживания или перевода двигателя в особый режим наблюдения.

Предлагаемый принцип построения соответствует современному направлению развития гибридных систем мониторинга технических объектов, в которых первичная фильтрация и часть вычислений выполняются на периферии, тогда как функции накопления данных, расширенной аналитики и управления моделями переносятся в облачный контур [9, 10].

Для практической реализации предложенной архитектуры необходимо формализовать последовательность вычислительных процедур, связывающих поток эксплуатационных данных с диагностическими и управляющими выходами системы. Если структурная схема отражает состав модулей и связи между ними, то алгоритм определяет порядок преобразования измерений, справочной информации и модельных параметров в оценки теплового состояния, износа и остаточного ресурса изоляции (рис. 1).

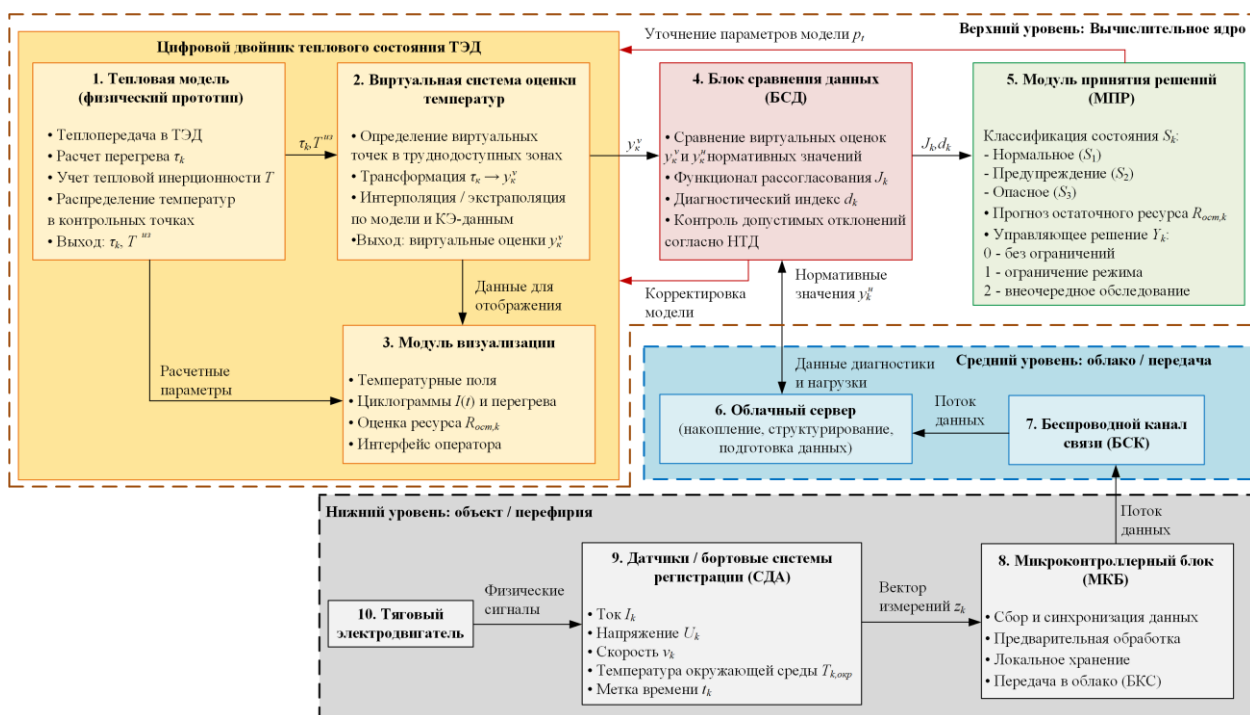


Рис. 1. Архитектура автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции ТЭД на основе цифрового двойника теплового состояния

Алгоритм функционирования автоматизированной системы

Работа системы организована как последовательность повторяющихся вычислительных шагов, на каждом из которых по текущим эксплуатационным данным уточняются оценки теплового состояния, диагностического индекса и остаточного ресурса изоляции. Упрощенная схема алгоритма приведена на рис. 2.

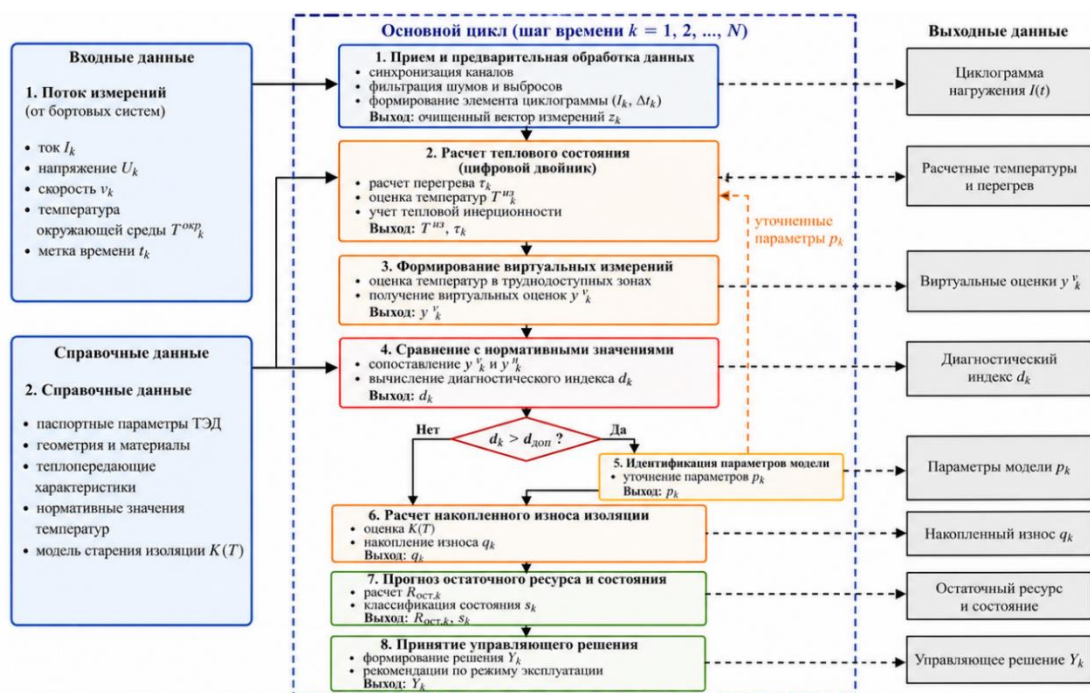


Рис. 2. Алгоритм функционирования автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции ТЭД по эксплуатационным циклограммам

На каждом шаге времени k выполняется последовательность взаимосвязанных процедур, в результате которых исходные эксплуатационные данные преобразуются в диагностические показатели, оценку остаточного ресурса и управляющее решение.

На первом этапе выполняются прием и предварительная обработка эксплуатационных данных z_k , включающие фильтрацию шумов, устранение выбросов и синхронизацию каналов измерений. По результатам обработки формируется текущий элемент циклограммы нагружения $(I_k, \Delta t_k)$, который включается в общую структуру сценария эксплуатации.

На втором этапе по обновленной циклограмме рассчитывается тепловое состояние двигателя с использованием оператора F . При этом учитывается тепловая инерционность системы, благодаря чему переход от мгновенных значений тока к оценке перегрева τ_k и температур $T_k^{\text{из}}$ в лимитирующих зонах выполняется без допущения об их мгновенном изменении. Расчет проводится в рамках цифровой двойника теплового состояния, параметры которого соответствуют текущей идентифицированной модели.

На третьем этапе из результатов теплового расчета формируется вектор виртуальных измерений y_k^v . В него включаются температурные оценки для контрольных точек, по которым можно сопоставить расчетное состояние двигателя с нормативной картиной нагрева. Такой подход позволяет использовать модель не только для расчета перегрева, но и для восстановления параметров в зонах, где прямое измерение затруднено.

На четвертом этапе расчетные значения сопоставляются с нормативными данными с помощью блока сравнения. По выражению (12) определяется функционал рассогласования

$$J_k = \sum_{i=1}^m w_i (y_{k,i}^v - y_{k,i}^h)^2, \quad (12)$$

после чего вычисляется диагностический индекс d_k , отражающий величину отклонения текущего состояния от допустимого режима работы. Если значение индекса выходит за установленный предел, система переходит к процедуре уточнения параметров модели.

На пятом этапе выполняется идентификация параметров теплового прототипа p_k . Ее назначение состоит в согласовании расчетной схемы с фактическими условиями эксплуатации, зафиксированными в текущем наборе измерений. Тем самым обеспечивается корректировка модели по реальным данным, а сам цифровой двойник сохраняет работоспособность при изменении режимов нагружения и условий теплоотвода.

На шестом этапе рассчитывается накопленный износ изоляции

$$q_k = q_{k-1} + K(T_k) \cdot \Delta t_k, \quad (13)$$

где q_k – накопленный относительный износ ресурса.

По текущей температуре определяется коэффициент ускорения старения $K(T)$, после чего по выражению (13) выполняется интегрирование износа по времени.

На седьмом этапе с использованием оператора Ψ , учитывающего текущую динамику нагружения и параметры модели, выполняется прогноз остаточного ресурса изоляции

$$R_k^{\text{ост}} = \Psi(T_k^{\text{из}}, q_k, p_k). \quad (14)$$

В результате по выражению (14) формируется оценка остаточного ресурса, после чего определяется класс технического состояния объекта S_k .

На заключительном этапе формируется управляющее решение Y_k , определяющее необходимость корректировки режима эксплуатации. В зависимости от значения диагностического индекса и остаточного ресурса система может рекомендовать ограничение токовой нагрузки, изменение режима ведения поезда либо проведение внеочередного технического обследования.

Таким образом, алгоритм функционирования системы реализует замкнутый цикл «измерение – моделирование – идентификация – прогноз – управление», в рамках которого цифровой двойник выступает не вспомогательной расчетной надстройкой, а центральным элементом автоматизированного мониторинга и поддержки эксплуатационных решений.

Выводы

Разработаны архитектура и алгоритм функционирования автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции ТЭД НБ-514Е электровазозов ЗЭС5К по эксплуатационным циклограммам нагружения.

Научная новизна состоит в том, что цифровой двойник теплового состояния ТЭД рассматривается не как автономная расчетная модель, а как адаптивное вычислительное ядро автоматизированной системы мониторинга, объединяющее расчет перегрева, формирование виртуальных температурных оценок, диагностику и прогноз остаточного ресурса изоляции.

Предложенный подход позволяет перейти от контроля отдельных параметров к непрерывной оценке теплового состояния изоляционной системы по данным реальной эксплуатации. В отличие от традиционных схем диагностики он опирается на эксплуатационные циклограммы, учет тепловой инерционности и расчет параметров в зонах, недоступных для прямого измерения.

Практическая значимость результатов связана с возможностью интеграции предложенной системы в существующие контуры регистрации и обработки данных электровозов, что создает основу для более раннего выявления неблагоприятных тепловых режимов, обоснованного ограничения нагрузки и перехода к прогнозному сопровождению технического состояния ТЭД.

Дальнейшее развитие работы целесообразно связывать с уточнением параметров модели по эксплуатационным данным, расширением состава учитываемых факторов деградации и разработкой бортовых средств реализации вычислительного контура в режиме, близком к реальному времени.

Список литературы

- 1 Система мониторинга состояния изоляции / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 3. – С. 50–52. – EDN EGIKNL.
- 2 **Иванов, П. Ю.** Состояние вопроса надёжности и долговечности изоляции асинхронных вспомогательных машин / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. М. Худонов // Известия Транссиба. – 2015. – № 2(22). – С. 2–6. – EDN UDYIBX.
- 3 **Иванов, П. Ю.** Современные направления развития систем мониторинга состояния изоляции асинхронных электродвигателей / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. М. Худонов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – Т. 20, № 12 (119). – С. 146–154. – DOI 10.21285/1814-3520-2016-12-146-154.
- 4 **Иванов, П. Ю.** Локальный перегрев изоляции асинхронных вспомогательных машин электровозов в переходных режимах работы / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. М. Худонов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – Т. 20, № 11 (118). – С. 194–200. – DOI 10.21285/1814-3520-2016-11-194-200.
- 5 **Аболмасов, А. А.** Совершенствование методов диагностирования электрических машин локомотивов по данным микропроцессорных систем управления / А. А. Аболмасов, Д. О. Лисин, В. А. Мельников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 3 (63). – С. 69–75. – DOI 10.26731/1813-9108.2019.3(63).69-75.
- 6 **Андрончев, И. К.** Совершенствование трактовки диагностической информации при оценке технического состояния тяговых двигателей электроподвижного состава / И. К. Андрончев, И. П. Гордеев, А. С. Тычков, П. В. Шепелин // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 3 (81). – С. 7–13.
- 7 **Завидей, В. И.** Современные методы мониторинга и технического диагностирования электрических машин / В. И. Завидей, И. В. Путилова, В. А. Старшинов // Экспозиция Нефть Газ.

References

- 1 Insulation condition monitoring system / E. Yu. Dulsky, P. Yu. Ivanov, A. A. Khamnaeva [et al.] // Railway transport. – 2021. – No. 3. – P. 50–52. – EDN EGIKNL.
- 2 **Ivanov, P. Yu.** State of the art of reliability and durability of insulation of asynchronous auxiliary machines / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dulsky, A. M. Khudonogov // Journal of Transsib Railway Studies. – 2015. – No. 2 (22). – P. 2–6. – EDN UDYIBX.
- 3 **Ivanov, P. Yu.** Modern directions of development of systems for monitoring the insulation condition of asynchronous electric motors / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dulsky, A. M. Khudonogov // Bulletin of Irkutsk State Technical University. – 2016. – Vol. 20, No. 12 (119). – P. 146–154. – DOI 10.21285/1814-3520-2016-12-146-154.
- 4 **Ivanov, P. Yu.** Local overheating of insulation of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives in transient operating modes / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dulsky, A. M. Khudonogov // Bulletin of Irkutsk State Technical University. – 2016. – Vol. 20, No. 11 (118). – P. 194–200. – DOI 10.21285/1814-3520-2016-11-194-200.
- 5 **Abolmasov, A. A.** Improving the methods for diagnosing locomotive electric machines based on data from microprocessor control systems / A. A. Abolmasov, D. O. Lisin, V. A. Melnikov // Modern technologies. Systems analysis. Modeling. – 2019. – No. 3 (63). – P. 69–75. – DOI 10.26731/1813-9108.2019.3 (63). 69-75.
- 6 **Andronchev, I. K.** Improving the interpretation of diagnostic information when assessing the technical condition of traction motors of electric rolling stock / I. K. Andronchev, I. P. Gordeev, A. S. Tychkov, P. V. Shepelin // Vestnik transporta Povolzhya. – 2020. – No. 3 (81). – P. 7–13.
- 7 **Zavidey, V. I.** Modern methods of monitoring and technical diagnostics of electrical machines / V. I. Zavidey, I. V. Putilova, V. A. Starshinov //

– 2023. – № 4. – С. 38–44. – DOI 10.24412/2076-6785-2023-4-38-44.

8 **Харламов, В. В.** Тестирование межвитковой изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя по методу волнового отклика / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, И. В. Шестаков // Известия Транссиба. – 2015. – № 2 (22). – С. 39–45.

9 Digital Twin in Industry : State-of-the-Art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A. Y. C. Nee // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15, No. 4. – P. 2405–2415. – DOI 10.1109/TII.2018.2873186.

10 Digital Twin : Enabling Technologies, Challenges and Open Research / A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 108952–108971. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2998358.

11 **Falekas, G.** Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance : State-of-the-Art and Future Prospects / G. Falekas, A. Karlis // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 18. – P. 5933. – DOI 10.3390/en14185933.

12 Condition Monitoring of Industrial Electric Machines : State of the Art and Future Challenges / S. B. Lee, G. C. Stone, J. Antonino-Daviu [et al.] // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2020. – Vol. 14, No. 4. – P. 158–167. – DOI 10.1109/MIE.2020.3016138.

Oil Gas Expo. – 2023. – No. 4. – P. 38–44. – DOI 10.24412/2076-6785-2023-4-38-44.

8 **Kharlamov, V. V.** Testing of interturn insulation of the armature winding of a traction electric motor using the wave response method / V. V. Kharlamov, P. K. Shkodun, I. V. Shestakov // Journal of Transsib Railway Studies. – 2015. – No. 2 (22). – P. 39–45.

9 Digital Twin in Industry : State-of-the-Art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A. Y. C. Nee // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15, No. 4. – P. 2405–2415. – DOI 10.1109/TII.2018.2873186.

10 Digital Twin : Enabling Technologies, Challenges and Open Research / A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 108952–108971. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2998358.

11 **Falekas, G.** Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance : State-of-the-Art and Future Prospects / G. Falekas, A. Karlis // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 18. – P. 5933. – DOI 10.3390/en14185933.

12 Condition Monitoring of Industrial Electric Machines : State of the Art and Future Challenges / S. B. Lee, G. C. Stone, J. Antonino-Daviu [et al.] // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2020. – Vol. 14, No. 4. – P. 158–167. – DOI 10.1109/MIE.2020.3016138.

E. Yu. Dulsky, P. Yu. Ivanov, V. N. Ivanov, K. E. Pronin

ARCHITECTURE AND FUNCTIONING ALGORITHM OF THE AUTOMATED SYSTEM FOR ASSESSING THE RESIDUAL RESOURCE OF TRACTION MOTOR INSULATION BASED ON OPERATIONAL CYCLOGRAMS

Abstract. This article proposes the architecture and operating algorithm of an automated system for assessing the residual life of NB-514E traction electric motor (TEM) insulation on 3ES5K electric locomotives using operational load cyclograms. The need for such a system arises from the fact that the periodic insulation resistance monitoring and local monitoring of individual parameters used in practice do not allow for the consideration of the motor's thermal history and the timely assessment of accumulated thermal deterioration of the insulation. The system's computing core utilizes a digital twin of the thermal state, enabling the calculation of overheating in controlled and hard-to-reach areas, the generation of virtual temperature estimates, the comparison of calculated and standard values, and the prediction of the remaining life. The system structure includes an operational data collection subsystem, a cyclogram generation module, a data comparison unit, and a decision-making module. A distinctive feature of the proposed approach is the use of the locomotive's actual current load to periodically update the TEM's thermal state and the subsequent transition from overheating diagnostics to a predictive assessment of insulation deterioration. The result of the work is a formalized structure and algorithm of the system, oriented towards application in tasks of monitoring, diagnostics and support of operational decisions.

Keywords: automated monitoring, traction electric motor, residual insulation life, digital twin of thermal state, load cyclogram, thermal aging, finite element modeling, control decision-making, operational support system.

For citation: Architecture and functioning algorithm of the automated system for assessing the residual life of traction motor insulation based on operational cyclograms / E. Yu. Dulsky,

P. Yu. Ivanov, V. N. Ivanov, K. E. Pronin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 96–104. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_2_96.

Сведения об авторах

Дульский Евгений Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), кафедра «Электроэнергетика», доктор технических наук, доцент,
e-mail: Dulskiy_eu@irgups.ru

Иванов Павел Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), кафедра «Транспортное машиностроение», доктор технических наук, доцент,
e-mail: Ivanov_PYU@irgups.ru

Иванов Владимир Николаевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), кафедра «Транспортное машиностроение», кандидат технических наук, доцент,
e-mail: Ivanov_vn@irgups.ru

Пронин Константин Евгеньевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), кафедра «Транспортное машиностроение», аспирант,
e-mail: pronin_ke@irgups.ru

Information about the authors

Dulsky Evgeny Yuryevich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Chair “Electrical Power Engineering”, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: Dulskiy_eu@irgups.ru

Ivanov Pavel Yuryevich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Chair “Transport Engineering”, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: Ivanov_PYU@irgups.ru

Ivanov Vladimir Nikolaevich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Chair “Transport Engineering”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: Ivanov_vn@irgups.ru

Pronin Konstantin Evgenievich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Chair “Transport Engineering”, Postgraduate Student,
e-mail: pronin_ke@irgups.ru

В. Г. Каргин, С. В. Беспалько, А. В. Третьяков, А. С. Шинкарук, А. А. Рогов

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ ВАГОНОВ

Аннотация. Система технического обслуживания и ремонта (СТОИР) вагона включает в себя плановые ремонты (ремонты крупного объема) и текущие ремонты и техническое обслуживание в промежутках между плановыми ремонтами (далее – межремонтные периоды, МРП). В данной работе рассматривается СТОИР рефрижераторных вагонов с точки зрения путей ее совершенствования. На основе анализа существующей системы ремонта производится варьирование сроками проведения плановых ремонтов. При этом решается оптимизационная задача, в которой на основе принятого критерия определяется наилучшее сочетание указанных сроков. В результате становится возможным как повысить экономическую эффективность эксплуатации вагонов, так и увеличить срок службы. Введен новый термин «прибыль единицы пробега» (далее – ПЕП), который обозначает отношение общей прибыли от эксплуатации вагона к общему сроку его службы. Данный показатель, позволяющий оценивать экономический эффект от эксплуатации вагона, примем в качестве критерия оптимизации системы технического обслуживания и ремонта рефрижераторных вагонов.

Ключевые слова: рефрижераторный вагон, ремонт, техническое обслуживание, прибыль, срок службы, эксплуатация.

Для цитирования: Оптимизация системы технического обслуживания и ремонта рефрижераторных вагонов / В. Г. Каргин, С. В. Беспалько, А. В. Третьяков [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 105–112. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_105.

Введение

Система технического обслуживания и ремонта (СТОИР) у рефрижераторных вагонов включает традиционные виды [1], а именно: капитальный ремонт (КР), деповской ремонт (ДР), техническое обслуживание (ТО) и текущий ремонт (ТР) в межремонтный период.

В статье [2] предлагается математический подход к решению задач оптимизации СТОИР с применением в качестве критерия себестоимости единицы пробега (СЕП). При этом минимум целевой функции определяется по условию экстремума функции нескольких переменных (межремонтных периодов). Это позволило разработать научно обоснованный инструментарий для количественной оценки целевого состояния единицы, модели, типа грузового подвижного состава и вагонной отрасли в целом для его перехода к интеллектуальному управлению железнодорожным транспортом. В статье [3] в качестве критерия оптимизации также принята СЕП и разработаны алгоритмы оптимизации на основе методов рекурсивного перебора, покоординатного и градиентного спуска. Результаты исследования предлагается использовать в работе вагонного комплекса, а также при проектировании подвижного состава по системе «вагон – эксплуатационная среда». В научной статье [4] авторы предлагают в качестве критерия оптимизации использовать максимум рентабельности продаж (ROS). Это смещает фокус с чисто технической оптимизации на экономическую эффективность, в рамках чего решается задача перехода от нормативной (календарно-пробежной) системы ТОиР пассажирских вагонов к экономически оптимизированной. Разработанный программный инструментарий позволяет гибко настраивать параметры ремонтных циклов под конкретные условия эксплуатации.

Проанализированные научные работы и результаты научных исследований позволяют сделать вывод, что исследования в области поиска оптимизационных решений в рамках технического обслуживания и ремонта пассажирского и грузового подвижного состава имеют достаточно обширную проработку. При этом необходимо отметить, что существующая СТОИР применительно к автономному рефрижераторному вагону (АРВ) имеет определенные недостатки и нуждается в совершенствовании. Это связано с тем, что сроки проведения плановых ремонтов, а также и срок службы вагона, заданы без необходимого обоснования. Кроме того, существующая система недостаточно «синхронизирована» со сроками службы отдельных элементов вагона. Следовательно, задача по оптимизации системы технического обслуживания и ремонта АРВ является актуальной.

Материалы и методы

Для оптимизации СТОИР рефрижераторных вагонов примем в качестве критерия прибыль единицы пробега. Для его выражения целевая функция оптимизации выражается следующим образом:

$$f(\vec{l}) = \frac{V(\vec{l}) - Z(\vec{l})}{\sum_{i=1}^m l_i} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $\vec{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_m \end{bmatrix}$ – вектор межремонтных периодов; m – количество межремонтных периодов; $V(\vec{l})$ – общая

сумма выручки от эксплуатации вагона как функция $\vec{l}$; $Z(\vec{l})$ – общая сумма затрат от эксплуатации как функция $\vec{l}$.

В качестве неизвестных выступают межремонтные периоды, равные промежуткам между постройкой, депо-скими, капитальными ремонтами и списанием вагона. Оптимальное сочетание длительностей МРП должно обеспечить максимальное значение критерия (1).

Выбор прибыли единицы пробега в качестве критерия при оптимизации СТОИР имеет определенные преимущества перед традиционным критерием стоимости единицы пробега. ПЕП позволяет учесть такую важную для экономической оценки величину, как выручка от эксплуатации. Отношение прибыли к длительности срока службы имеет и дополнительное достоинство, так как дает возможность более точно оценить экономическую эффективность принятой системы. Следует учитывать, что при превышении затрат над выручкой в числителе выражения (1) получится отрицательное значение, означающее убыток. При этом предлагаемая методика сохраняет работоспособность.

Выразим величины выручки и затрат, входящие в целевую функцию (1). При определении выручки будем считать ее изменяющейся ступенчато в соответствии с каждым МРП:

$$V(\vec{l}) = \sum_{i=1}^m (v_i l_i), \quad (2)$$

где v_i – удельная выручка, отношение выручки за время МРП к соответствующей длительности времени (пробегу); l_i – длительность МРП, варьирующаяся в пределах $[l_{\min}; l_{\max}]$; i – номер межремонтного периода; m – общее количество МРП.

Выразим также затраты на эксплуатацию. К затратам относятся:

- 1) неизменные затраты, приходящиеся на стадии определения исходных требований к вагону, разработки, производства и утилизации; при этом доходы от утилизации входят с противоположным знаком;
- 2) затраты на плановые виды ремонта (ДР, КР);
- 3) затраты на техническое обслуживание, текущие, неплановые ремонты (далее – ТО и ТР) и на инфраструктуру в пределах каждого межремонтного периода; данный вид затрат начисляется в сумме, квадратично зависящей от длительности МРП [5, 6, 2].

Тогда общую величину затрат можно выразить как сумму:

$$Z(\vec{l}) = Z_1 + Z_2 + Z_3(\vec{l}), \quad (3)$$

где $Z_1 = S + Q_1 - Q_2$ – неизменные затраты; $Z_2 = \sum_{j=1}^n R_{\text{КР}j} + \sum_{k=1}^{m-n-1} R_{\text{ДР}k}$ – затраты на КР и ДР; $Z_3 = \sum_{i=1}^m (a_i l_i + b_i l_i^2)$ – затраты на ТО и ТР и инфраструктуру; n – количество КР в системе технического обслуживания и ремонта; S – стоимость постройки вагона; Q_1 – затраты на утилизацию вагона; Q_2 – доходы от списания вагона; $R_{\text{КР}j}$ – затраты на j -й капитальный ремонт; $R_{\text{ДР}k}$ – затраты на k -й депо-вской ремонт; a_i, b_i – коэффициенты роста затрат на ТО и ТР в пределах на i -го МРП.

С учетом выражений (2) и (3) целевая функция (1) имеет вид:

$$f(\vec{l}) = \frac{\sum_{i=1}^m (v_i l_i) - Z_1 - Z_2 - \sum_{i=1}^m (a_i l_i + b_i l_i^2)}{\sum_{i=1}^m l_i} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Целевая функция (4) представляет собой функцию нескольких переменных, необходимое условие экстремума которой записывается через частные производные следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(\vec{l})}{\partial l_1} = 0; \\ \frac{\partial f(\vec{l})}{\partial l_2} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial f(\vec{l})}{\partial l_m} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Найдем частную производную по переменной l_k :

$$\frac{\partial f(\vec{l})}{\partial l_k} = \frac{v_k - a_k - 2b_k l_k}{\sum_{i=1}^m l_i} - \frac{\sum_{i=1}^m (v_i l_i - a_i l_i - b_i l_i^2) - Z_1 - Z_2}{\left(\sum_{i=1}^m l_i\right)^2}. \quad (6)$$

С учетом (3, 6) получим систему нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} 2b_1 l_1 \sum_{i=1}^m l_i = (v_1 - a_1) \sum_{i=1}^m l_i - \sum_{i=1}^m (v_i l_i - a_i l_i - b_i l_i^2) + Z_1 + Z_2; \\ 2b_2 l_2 \sum_{i=1}^m l_i = (v_2 - a_2) \sum_{i=1}^m l_i - \sum_{i=1}^m (v_i l_i - a_i l_i - b_i l_i^2) + Z_1 + Z_2; \\ \dots \\ 2b_m l_m \sum_{i=1}^m l_i = (v_m - a_m) \sum_{i=1}^m l_i - \sum_{i=1}^m (v_i l_i - a_i l_i - b_i l_i^2) + Z_1 + Z_2. \end{cases} \quad (7)$$

Для решения системы уравнений (7) можно применить метод простых итераций [7, 8]. Приведем систему уравнений к следующему виду:

$$\begin{cases} l_1 = \frac{(v_1 - a_1)L - P}{2b_1 L} = \varphi_1(\vec{l}); \\ l_2 = \frac{(v_2 - a_2)L - P}{2b_2 L} = \varphi_2(\vec{l}); \\ \dots \\ l_m = \frac{(v_m - a_m)L - P}{2b_m L} = \varphi_m(\vec{l}), \end{cases} \quad (8)$$

где $L = \sum_{i=1}^m l_i$ – общий срок службы вагона; $P = \sum_{i=1}^m (v_i l_i - a_i l_i - b_i l_i^2) - Z_1 - Z_2$ – общая прибыль от эксплуатации одного вагона.

Представим систему уравнений (8) в векторной форме:

$$\vec{l}|_1 = \vec{\Phi}(\vec{l}|_0), \quad (9)$$

$$\text{где } \vec{\Phi} = \begin{bmatrix} \frac{(v_1 - a_1)L - P}{2b_1L} \\ \frac{(v_2 - a_2)L - P}{2b_2L} \\ \dots \\ \frac{(v_m - a_m)L - P}{2b_mL} \end{bmatrix} - \text{вектор функций правой части; } \vec{l}|_1 - \text{новое приближение вектора}$$

длительностей МРП на данной итерации; $\vec{l}|_0$ – предыдущее приближение вектора длительностей МРП.

Тогда общую последовательность применения метода простых итераций можно представить так:
– задается начальное приближение вектора длительностей межремонтных периодов, например:

$$\vec{l}|_0 = \left\{ \frac{l_{\min} + l_{\max}}{2}, \frac{l_{\min} + l_{\max}}{2}, \dots, \frac{l_{\min} + l_{\max}}{2} \right\};$$

– вычисляются значения переменных L и P ;

– определяется вектор $\vec{\Phi}$ и находится новое приближение вектора длительностей МРП по (9);

– оценивается погрешность вычисления путем сравнения максимального изменения длительности МРП с заданной точностью ε ; если выполняется условие:

$$\max(l_i|_1 - l_i|_0) \leq \varepsilon, \quad (10)$$

то итерационный процесс можно считать завершенным; если же нет – то новое приближение принимается в качестве начального для следующей итерации, и процесс повторяется;

– по завершении итераций последнее приближение вектора $\vec{l}$ принимается в качестве окончательного и вычисляются итоговые значения срока службы L , выручки V (2), затрат Z (3) и критерия прибыли единицы пробега (1).

На основе разработанных программ было выполнено решение задачи оптимизации СТОИР рефрижераторных вагонов. За основу был взят вариант системы технического обслуживания и ремонта, приведенный на рис. 1. По разработанной методике выполнены расчеты базовой СТОИР.

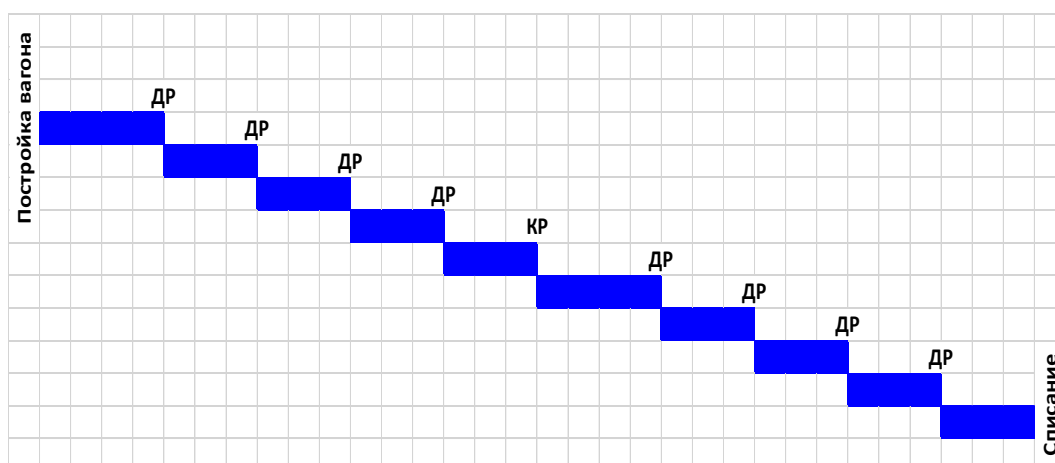


Рис. 1. Базовая система ТОИР

Были выполнены массовые расчеты с оценкой зависимости экономических показателей от длительности срока службы. Результаты представлены на рис. 2, 3. Оказалось, что оптимальна система с одинаковыми значениями длительности каждого МРП, равными 5,35 лет, или 1956 дней. Это соответствует общему сроку службы 53,5 года. На рис. 4 показаны гистограммы длительностей МРП для исходной системы, а также оптимизированной.

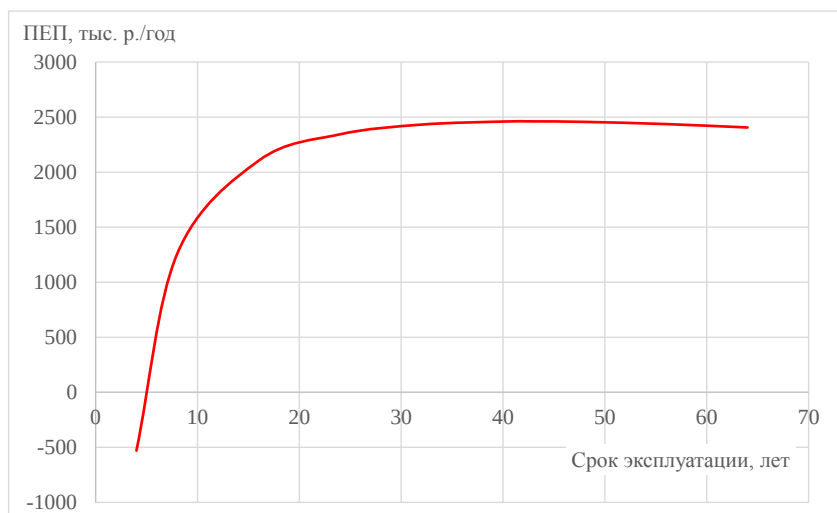


Рис. 2. Зависимость ПЕП от общего срока службы

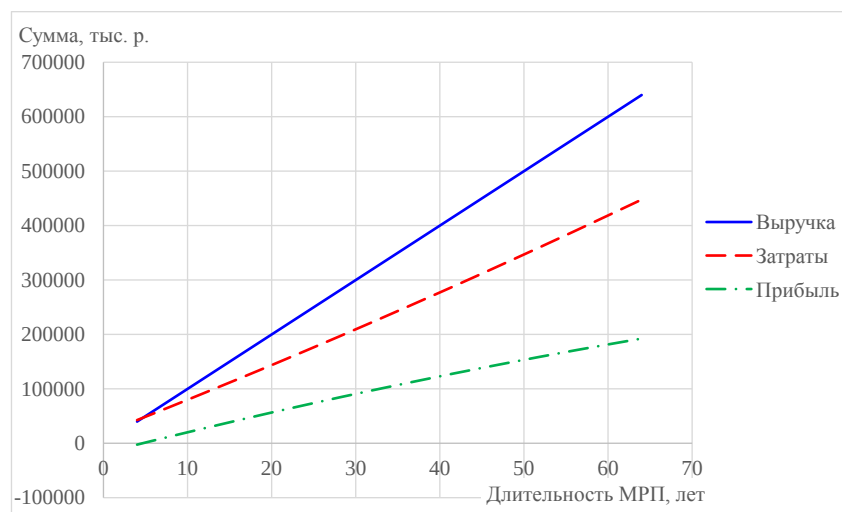


Рис. 3. Зависимость экономических показателей от общего срока службы

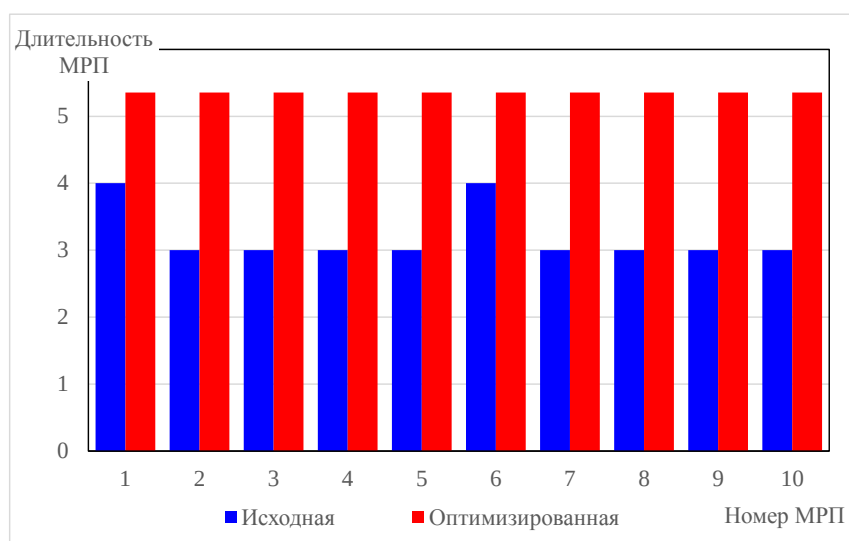


Рис. 4. Гистограммы длительностей МРП

Равномерность длительностей МРП можно объяснить тем, что коэффициенты затрат на ТО и ТР принимались одинаковыми для всего срока службы вагона.

Заключение

Разработана методика оптимизации СТОИР рефрижераторных вагонов на основе критерия прибыли единицы пробега.

Предложен способ решения оптимизационной задачи с применением метода простых итераций для решения системы нелинейных уравнений.

Проведено имитационное моделирование с применением разработанных программ.

Проведенное исследование позволило создать оптимизированную СТОИР для АРВ при их проектировании и эксплуатации во взаимодействии с изготовителем подвижного состава [9, 10]. Предлагаемая система включает 10 МРП с длительностями, равными 5,35 лет, или 1956 дней. Это соответствует общему сроку службы 53,5 года.

Таким образом, при исходном сроке службы в 32 года представляется возможным и экономически целесообразным увеличить срок службы на 50 % – до 48 лет.

Методика может использоваться при проектировании новых и модернизации существующих АРВ при выборе СТОИР, которая также позволяет определять оптимальные длительности МРП при заданных экономических условиях.

Список литературы

1 Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотра вагона) № 808-2022 ПКБ ЦВ, утверждена Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества Протоколом 8 декабря 2022 г. № 77. – Москва : ЦЕНТРАГ, 2026. – 204 с. – ISBN 979-5-903030-49-0.

2 **Устич, П. А.** Применение информационных технологий в системе технического обслуживания и ремонта вагонов / П. А. Устич, А. А. Иванов, Ф. А. Мажидов // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 10 (50). – С. 29–38. – ISSN 0869-4931.

3 Моделирование и оптимизация системы ремонта вагонов / А. В. Зяблов, С. В. Беспалько, П. С. Григорьев, Ю. А. Кузнецова // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 2. – С. 64–66. – ISSN 0044-4448.

4 **Шинкарук, А. С.** Оптимизация системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов / А. С. Шинкарук, С. В. Беспалько // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 11 (35). – С. 64–70. – DOI 10.30987/2782-5957-2024-11-64-70.

5 Вагонное хозяйство : учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. А. Ивашов, М. В. Орлов, П. А. Устич [и др.] ; под редакцией П. А. Устича. – Москва : Маршрут, 2003. – 560 с. – ISBN 5-89035-082-X.

6 **Польщиков, А. Д.** К проблеме организации системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов в современных условиях работы вагонного хозяйства / А. Д. Польщиков, А. А. Иванов // Инфраструктура и эксплуатация наземного транспорта : материалы Международной студенческой научно-практической конференции : в 2 ч. Ч. 2. Нижний Новгород, 10 апреля 2019 года / Филиал Самарского государственного университета путей сообщения в г. Нижнем Новгороде. – Нижний Новгород : Научно-издательский центр «21 век», 2019. – С. 320–324. – EDN CDKISX.

References

1 Instructions for the technical maintenance of wagons in operation (instructions for wagon inspectors) No. 808-2022 PKB CV approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States by Protocol No. 77 of December 8, 2022. – Moscow : CENTERMAG, 2026. – 204 p. – ISBN 979-5-903030-49-0.

2 **Ustich, P. A.** Application of information technologies in the system of maintenance and repair of wagons / P. A. Ustich, A. A. Ivanov, F. A. Mazhidov // Automation. Modern technologies. – 2016. – No. 10 (50). – P. 29–38. – ISSN 0869-4931.

3 Modeling and optimization of the wagon repair system / A. V. Zyablov, S. V. Bepalko, P. S. Grigoriev, Yu. A. Kuznetsova // Railway transport. – 2021. – No. 2. – P. 64–66. – ISSN 0044-4448.

4 **Shinkaruk, A. S.** Optimization of the system of technical maintenance and repair of passenger cars / A. S. Shinkaruk, S. V. Bepalko // Transport engineering. – 2024. – No. 11 (35). – P. 64–70. – DOI 10.30987/2782-5957-2024-11-64-70.

5 Wagon fleet : a textbook for higher education institutions of railway transport / V. A. Ivashov, M. V. Orlov, P. A. Ustich [et al.] ; edited by P. A. Ustich. – Moscow : Route, 2003. – 560 p. – ISBN 5-89035-082-X.

6 **Polshchikov, A. D.** On the problem of organizing the system of maintenance and repair of freight cars in modern conditions of operation of the carriage industry / A. D. Polshchikov, A. A. Ivanov // Infrastructure and operation of land transport : proceedings of the International student scientific and practical conference : in 2 parts, Nizhny Novgorod, April 10, 2019 / Branch of Samara State Transport University in Nizhny Novgorod. – Nizhny Novgorod : Scientific Publishing Center "21st Century", 2019. – P. 320–324. – EDN CDKISX.

7 **Зенков, А. В.** Численные методы : учебное пособие / А. В. Зенков. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2016. – 124 с. – ISBN 978-5-7996-1781-3.

8 **Калиткин, Н. Н.** Численные методы : учебное пособие / Н. Н. Калиткин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 592 с. – ISBN 978-5-9775-0500-0.

9 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (ТР ТС 001/2011) // Ространснадзор : официальный сайт. – URL: https://rostransnadzor.gov.ru/storage/%D0%9C%D0%A2%D0%A3%20%D0%9F%D0%9E%20%D0%94%D0%A4%D0%9E/%D0%A2%D0%A0%20%D0%A2%D0%A1%20001_2011.pdf?ysclid=mpzey54jdw868875485 (дата обращения: 29.05.2026).

10 Приказ Министерства транспорта РФ от 23 июня 2022 года № 250 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» // Гарант : информационно-правовое обеспечение. – URL: <https://base.garant.ru/405042985> (дата обращения: 29.05.2026).

7 **Zenkov, A. C.** Numerical methods : textbook / A. C. Zenkov. – Yekaterinburg : Ural University Publishing House, 2016. – 124 p. – ISBN 978-5-7996-1781-3.

8 **Kalitkin, N. N.** Numerical methods : textbook / N. N. Kalitkin. – Saint Petersburg : BHV-Petersburg, 2011. – 592 p. – ISBN 978-5-9775-0500-0.

9 Technical Regulations of the Customs Union “On the safety of railway rolling stock” (TR CU 001/2011). // Rosrtansnadzor : official website. – URL: https://rostransnadzor.gov.ru/storage/%D0%9C%D0%A2%D0%A3%20%D0%9F%D0%9E%20%D0%94%D0%A4%D0%9E/%D0%A2%D0%A0%20%D0%A2%D0%A1%20001_2011.pdf?ysclid=mpzey54jdw868875485 (date of access: 29.05.2026).

10 Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 23, 2022 No. 250 “On approval of the Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation” // Garant : information and legal support. – URL: <https://base.garant.ru/405042985> (date of access: 29.05.2026).

V. G. Kargin, S. V. Bepalko, A. V. Tretyakov, A. S. Shinkaruk, A. A. Rogov

OPTIMIZATION OF THE SYSTEM FOR MAINTENANCE AND REPAIR OF REFRIGERATED CARS

Abstract. The railcar maintenance and repair system (MRS) includes scheduled repairs (major repairs) and routine repairs and maintenance between scheduled repairs (hereinafter referred to as inter-repair periods, or IRPs). This paper examines the MRS of refrigerated railcars for potential improvement. Based on an analysis of the existing repair system, the scheduled repair intervals are varied. An optimization problem is solved, in which the best combination of these intervals is determined based on the adopted criterion. This makes it possible to both improve the economic efficiency of railcar operation and extend its service life. A new term, "unit profit per mileage" (hereinafter referred to as UPM), is introduced, which denotes the ratio of the total profit from railcar operation to its overall service life. This indicator, characterizing the economic efficiency of railcar operation, will be adopted as a criterion for optimizing the MRS of refrigerated railcars.

Keywords: refrigerated car, repair, maintenance, profit, service life, operation.

For citation: Optimization of the system for maintenance and repair of refrigerated cars / V. G. Kargin, S. V. Bepalko, A. V. Tretyakov [at al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 105–112. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_105.

Сведения об авторах

Каргин Валентин Геннадьевич

Российский университет транспорта
(РУТ МИИТ),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
аспирант,
e-mail: w_g_k@mail.ru

Беспалько Сергей Валерьевич

Российский университет транспорта (РУТ МИИТ),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: besp-alco@yandex.ru

Information about the authors

Kargin Valentin Gennadievich

Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair “Carriages and Carriage Facilities”,
Postgraduate Student,
e-mail: w_g_k@mail.ru

Bepalko Sergey Valeryevich

Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair “Carriages and Carriage Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: besp-alco@yandex.ru

Третьяков Александр Владимирович

Петербургский университет путей сообщения
императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: AVTretiakov@pgups.ru

Шинкарук Андрей Сергеевич

Акционерное общество
«Федеральная пассажирская компания»,
доктор технических наук,
главный ревизор по безопасности
движения поездов,
e-mail: Shinkarukas@mail.ru

Рогов Анатолий Алексеевич

Российский университет транспорта
(РУТ МИИТ),
кафедра «Менеджмент качества»,
кандидат физико-математических наук,
доцент,
e-mail: rogov_a@rambler.ru

Tretyakov Alexander Vladimirovich

Emperor Alexander I Saint Petersburg
State Transport University (PGUPS),
Chair “Carriages and Carriage Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: AVTretiakov@pgups.ru

Shinkaruk Andrey Sergeevich

Joint Stock Company
“Federal Passenger Company”,
Doctor of Engineering Sciences,
Chief Auditor for Train Safety,
e-mail: Shinkarukas@mail.ru

Rogov Anatoly Alekseevich

Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair “Quality Management”,
Candidate of Physical
and Mathematical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: rogov_a@rambler.ru

Ю. Ю. Романенко, Ю. И. Булыгин, И. А. Яицков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В КАБИНАХ МАШИНИСТОВ ЭЛЕКТРОВЗОВ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА И ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. Представлены результаты статистического анализа параметров микроклиматических условий (температура, индекс тепловой нагрузки среды – ТНС-индекс) в кабинах машинистов электропоездов серий ЭП1М, 2ЭС5К и ВЛ80. Исследование основано на данных специальной оценки условий труда локомотивных бригад электропоездов, проведенной в разное время года. Методами описательной статистики и визуализации данных выявлено, что эмпирические распределения изучаемых параметров существенно отличаются от нормального и представляют собой смесь нескольких компонентов, каждый из которых соответствует определенному классу условий труда и близок к нормальному распределению. Установлено, что воздействие нагревающего микроклимата представляет более значительный риск для работников локомотивных бригад электропоездов по сравнению с охлаждающим. Результаты работы служат основой для разработки и валидации математических моделей тепломассопереноса, а также для проектирования систем и устройств нормализации микроклимата в кабинах машинистов для обеспечения безопасности труда и безопасности движения подвижного состава.

Ключевые слова: электропоезд, микроклиматические условия, ТНС-индекс, статистический анализ, безопасность труда, локомотивные бригады, тепловой стресс, безопасность движения.

Для цитирования: Романенко, Ю. Ю. Экспериментальные исследования микроклиматических условий в кабинах машинистов электропоездов для совершенствования систем и устройств обеспечения безопасности труда и повышения безопасности движения / Ю. Ю. Романенко, Ю. И. Булыгин, И. А. Яицков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 113–123. – DOI10.46973/0201-727X_2026_2_113.

Введение

Неблагоприятные условия труда локомотивных бригад часто становятся причиной снижения производительности труда и концентрации внимания, что напрямую сказывается на обеспечении безопасности движения поездов [4, 7]. Современные локомотивы эксплуатируются круглогодично в широком диапазоне климатических условий разных регионов России, что приводит к необходимости изучения состояния условий труда по фактору производственного микроклимата в кабинах машинистов [2, 3].

Для решения задачи нормализации параметров микроклимата в кабинах электропоездов с целью обеспечения безопасности труда и безопасности движения подвижного состава необходимы организационно-технические решения, основанные на представительной выборке эмпирических данных, полученной посредством проведенной специальной оценки условий труда [1, 6].

Цель экспериментального исследования состоит в статистической оценке воздействия параметров микроклимата, таких как температура и ТНС-индекс, на условия труда локомотивных бригад в кабинах электропоездов. Исследование включает анализ распределения этих параметров в различных климатических условиях и на различных высотах.

При проведении специальной оценки условий труда были выполнены замеры нескольких ключевых показателей: скорости воздушного потока, температурного режима, уровня относительной влажности, а также рассчитан комплексный показатель теплового воздействия среды – ТНС-индекс [8, 12].

Методы исследования

Авторами рассматривались рабочие места локомотивных бригад электропоездов серий ЭП1М, 2ЭС5К и ВЛ80, на которых была проведена специальная оценка условий труда по фактору производственного микроклимата. Измерения осуществлялись на предприятиях железнодорожного транспорта в период с июля по сентябрь и с ноября по декабрь 2020 года.

Экспериментальные данные были проанализированы на основании 46 карт СОУТ, подтвержденных протоколами измерения микроклимата: 22 карты относятся к холодному периоду, а 24 – к теплому.

При проведении замеров использовались такие проверенные устройства, как «Метеоскоп-М» для измерения условий микроклимата и измерительная лента серии «Каучук» производства «Энкор». Процесс измерений соответствовал действующим стандартам и методическим указаниям (методические указания по измерению и оценке микроклимата производственных помещений (МУК) 4.3.2756-10, СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений», ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях»), а также руководству БВЕК.431110.04.РЭ по эксплуатации прибора «Метеоскоп-М» [2, 12].

Замеры параметров микроклиматической обстановки выполнялись на разных высотах относительно пола кабины машиниста электровоза – на уровне 0,1 м, 1 м и 1,5 м. Собранная информация обладает достаточной репрезентативностью для последующего систематического изучения и аналитической обработки. Итоги специальной оценки условий труда показали, что среди обследованных 22 рабочих мест машинистов электровозов в зимний сезон на 19 местах зафиксированы условия труда класса 3.1, соответствующие категории вредных факторов (рис. 1, а).

Соответственно в теплый период года обследованию подлежало 24 рабочих места, из которых 6 были отнесены к 4-му классу условий труда (КУТ) – недопустимые условия, остальные – к КУТ 3 (рис. 1, б).

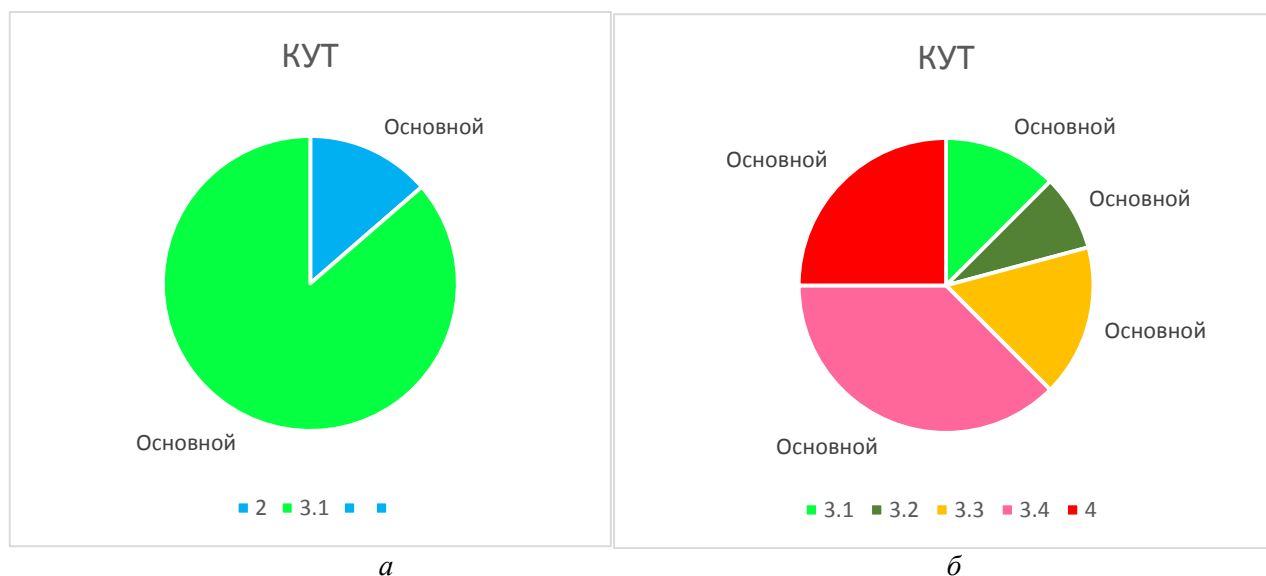


Рис. 1. Доля КУТ:

а – при влиянии охлаждающего микроклимата; б – при влиянии нагревающего микроклимата

Результаты исследования

Полученные экспериментальные данные распределены на три группы вдоль оси Y в зависимости от уровня расположения точек замера внутри кабины машиниста электровоза (0,1 м, 1,0 м, 1,5 м). Классификация производится соответственно определенному классу условий труда, каждый из которых обозначен цветом.

На рис. 2 представлены рассчитанные ТНС-индексы для 24 электровозов в условиях нагревающего климата.

Анализ представленных на рис. 2 и 3 распределений позволяет сделать вывод, что работа машиниста и помощника машиниста электровоза в условиях нагревающего микроклимата сопровождается значительно большим уровнем негативного влияния на организм по сравнению с условиями охлаждающей среды [4, 5, 9], что, в свою очередь, значительно снижает уровень обеспечения безопасности движения подвижного состава.

Картина распределения температур и ТНС-индексов выглядит достаточно равномерной в диапазоне 24–31 °С без преимущественного преобладания того или иного КУТ.

При влиянии охлаждающего микроклимата наблюдается несколько иная ситуация. На высотах 0,1 м и 1 м от пола в кабине электровоза температура находится в узком коридоре значений 13–16 °С, что соответствует КУТ 3.1. Отметим, что допустимые санитарно-гигиенические нормативы (2 КУТ) встречаются только здесь и крайне редко [2].

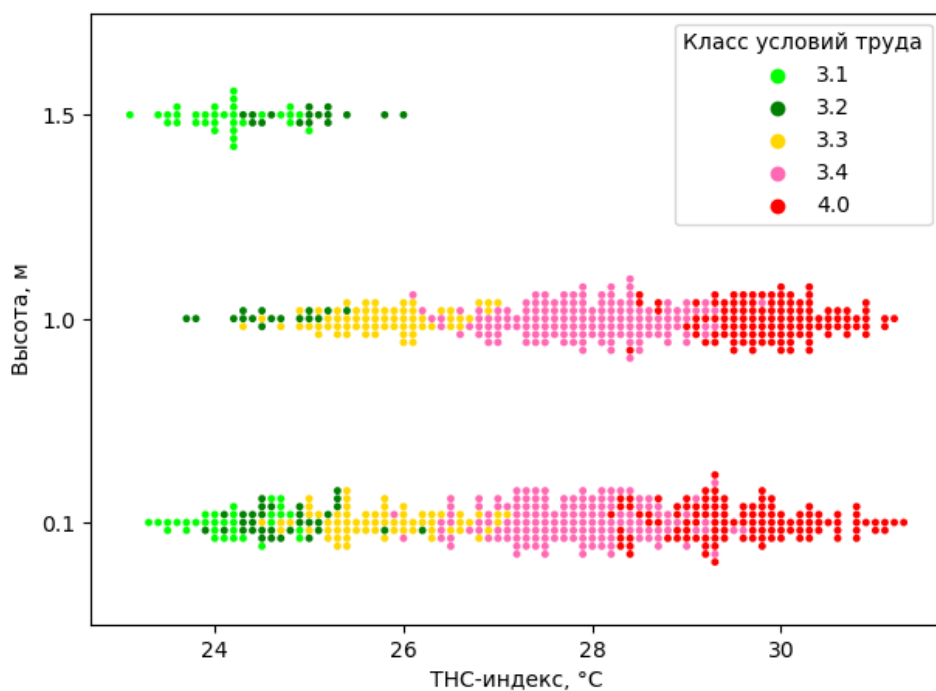


Рис. 2. Значения индекса тепловой нагрузки среды (ТНС-индекса), полученные на разной высоте внутри кабин машинистов электровозов, с классификацией по уровню вредности условий труда

На рис. 3 приведено графическое представление температурных показателей на различных уровнях высоты внутри кабин машинистов у 22 электровозов в условиях охлаждения рабочей зоны.

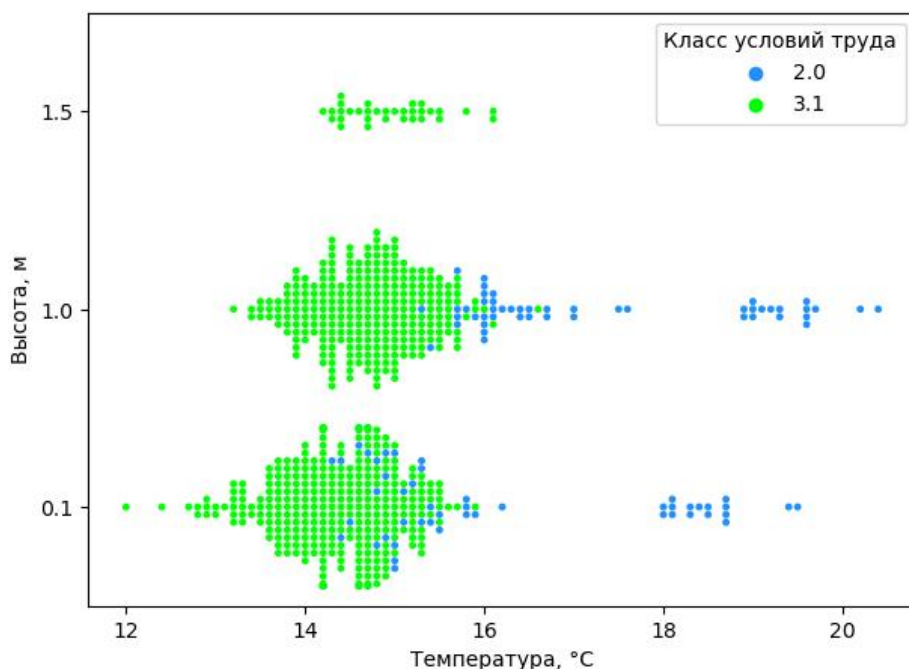


Рис. 3. Распределение значений температуры в кабинах машинистов электровоза на разных уровнях высоты над полом с учетом класса условий труда

Для детального исследования закономерностей и формирования теоретических моделей наибольший интерес представляют эмпирические распределения таких важных микроклиматических

параметров, как температура и ТНС-индекс. На рис. 4 изображены гистограммы и кривые плотности, демонстрирующие распределение температуры и ТНС-индекса в условиях нагревающего микроклимата на разных высотах. Дополнительно на графике отмечены медианное значение и границы межквартирного размаха, выделенные штриховыми линиями.

Отметим, что распределения исследуемых параметров микроклимата имеют одну моду примерно 31 °С. Выраженная мода при наличии достаточного объема данных наблюдается на высотах 0,1 м и 1 м. Распределение температур в кабинах машинистов электровозов отличается выраженной асимметрией, что указывает на преобладание повышенных значений (табл. 1). При этом ТНС-индекс, который учитывает не только температуру, но и влажность, а также скорость движения воздуха, демонстрирует более равномерное распределение по сравнению с температурой как отдельным показателем [8, 10]. Таким образом, скорость движения воздуха и относительная влажность оказывают существенное влияние на состояние условий труда [9, 11] и, следовательно, на обеспечение безопасности труда локомотивных бригад и безопасности движения поездов.

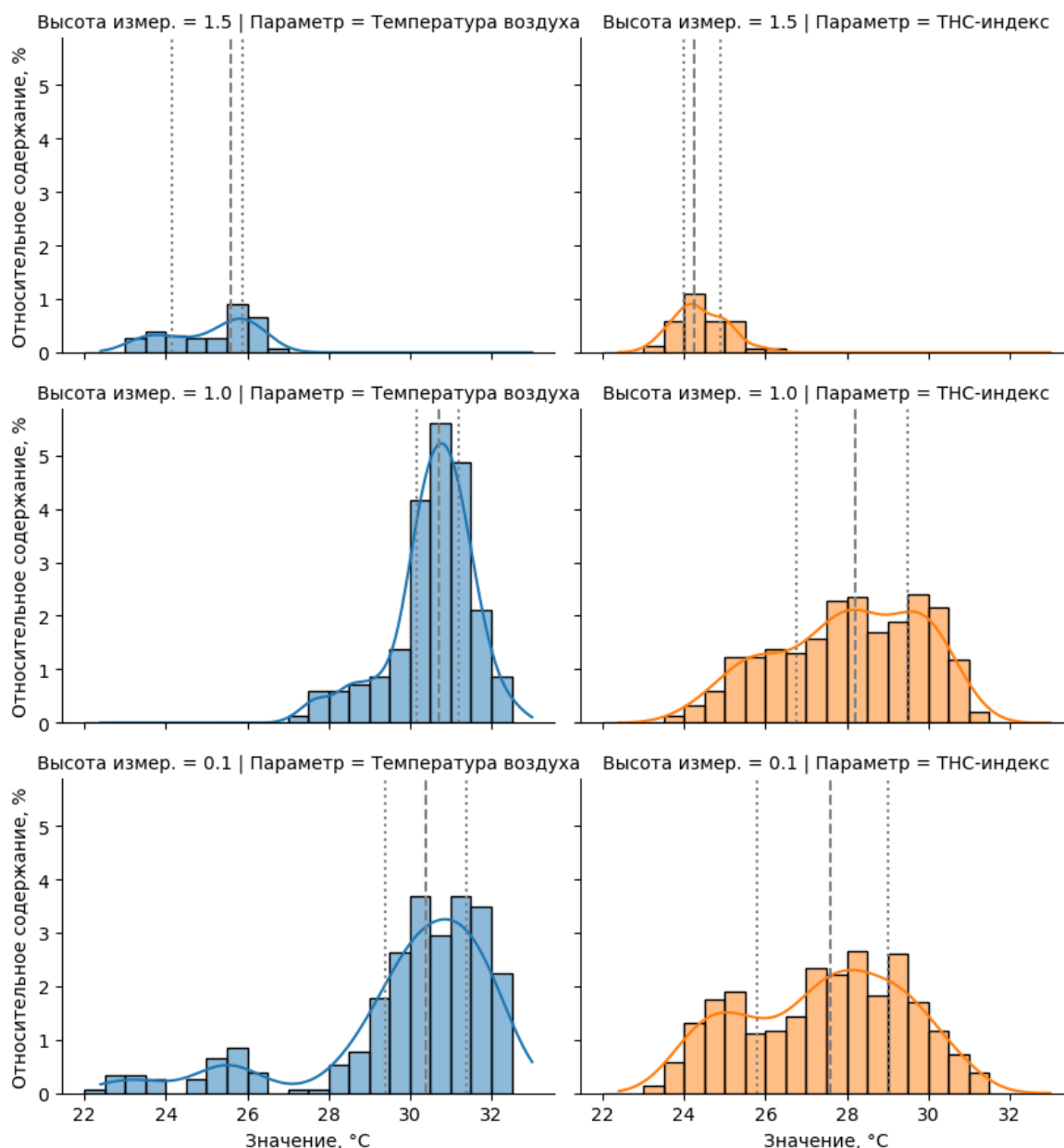


Рис. 4. Распределение температур и ТНС-индексов в зависимости от высоты (пунктиром показаны квартили и медиана)

Таблица 1

**Статистические показатели распределения ТНС-индекса
в кабинах машинистов электровозов в теплый период года с учетом КУТ**

Класс 3.1							
Высота, м	Минимум	Максимум	Медиана	Среднее	СКО	Асимметрия	Экссесс
0,1	23,3	24,9	24,15	24,15	0,454	-0,031	-0,909
1	-	-	-	-	-	-	-
1,5	23,1	25	24,15	24,1	0,469	0,114	-0,361
Класс 3.2							
Высота, м	Минимум	Максимум	Медиана	Среднее	СКО	Асимметрия	Экссесс
0,1	23,9	26,2	24,6	24,75	0,498	0,912	1,189
1	23,7	25,4	24,55	24,6	0,484	-0,241	-0,506
1,5	24,3	26	25	25	0,487	0,419	-0,122
Класс 3.3							
Высота, м	Минимум	Максимум	Медиана	Среднее	СКО	Асимметрия	Экссесс
0,1	24,5	27,1	25,7	25,775	0,631	0,28	-0,622
1	24,3	27	25,75	25,775	0,589	-0,058	-0,135
1,5	-	-	-	-	-	-	-
Класс 3.4							
Высота, м	Минимум	Максимум	Медиана	Среднее	СКО	Асимметрия	Экссесс
0,1	25,9	29,6	27,8	27,767	0,753	0,065	-0,29
1	26,1	29,8	27,9	27,922	0,746	-0,138	-0,424
1,5	-	-	-	-	-	-	-
Класс 4							
Высота, м	Минимум	Максимум	Медиана	Среднее	СКО	Асимметрия	Экссесс
0,1	28,2	31,3	29,6	29,614	0,768	0,151	-0,65
1	28,4	31,2	29,9	29,914	0,586	-0,128	-0,059
1,5	-	-	-	-	-	-	-

Аналогичное графическое представление температурных распределений для ситуации с охлаждающим микроклиматом показано на рис. 5. Статистически картина здесь несколько отличается. Распределение более симметрично и близко к нормальному, что подтверждается численными значениями интегральных моментов (табл. 2) и расположением медианы на равном расстоянии от квартилей.

Таблица 2

**Статистические показатели распределения ТНС-индекса
в кабинах машинистов электровозов в холодный период года с учетом КУТ**

Класс 2							
Высота, м	Минимум	Максимум	Медиана	Среднее	СКО	Асимметрия	Экссесс
0,1	14,3	19,5	15,4	16,233	1,685	0,646	-1,295
1	15,3	20,4	16,45	17,267	1,605	0,609	-1,318
1,5	-	-	-	-	-	-	-
Класс 3.1							
Высота, м	Минимум	Максимум	Медиана	Среднее	СКО	Асимметрия	Экссесс
0,1	12	15,9	14,4	14,347	0,638	-0,425	0,221
1	13,2	16,6	14,7	14,706	0,586	0,014	-0,299
1,5	14,2	16,1	14,9	14,95	0,517	0,561	-0,307

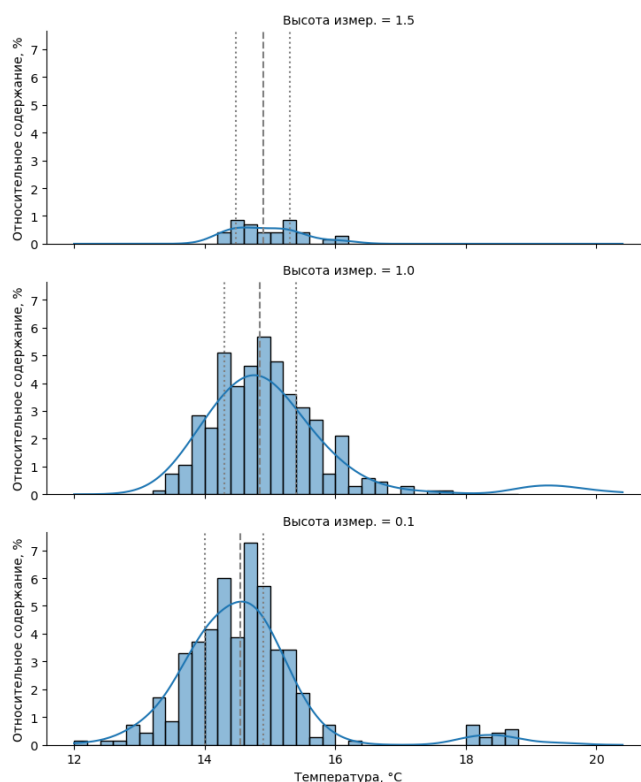


Рис. 5. Анализ распределения температур и ТНС-индексов по высоте в условиях охлаждающего микроклимата

Для понимания причин выявленных особенностей распределения целесообразно провести дополнительный анализ состава классов условий труда в изученной совокупности данных. Графическое представление соответствующих результатов представлено на рис. 6 в виде гистограмм. На рис. 7 представлена подобная структура визуальных материалов и количественных оценок для условий охлаждающего микроклимата.

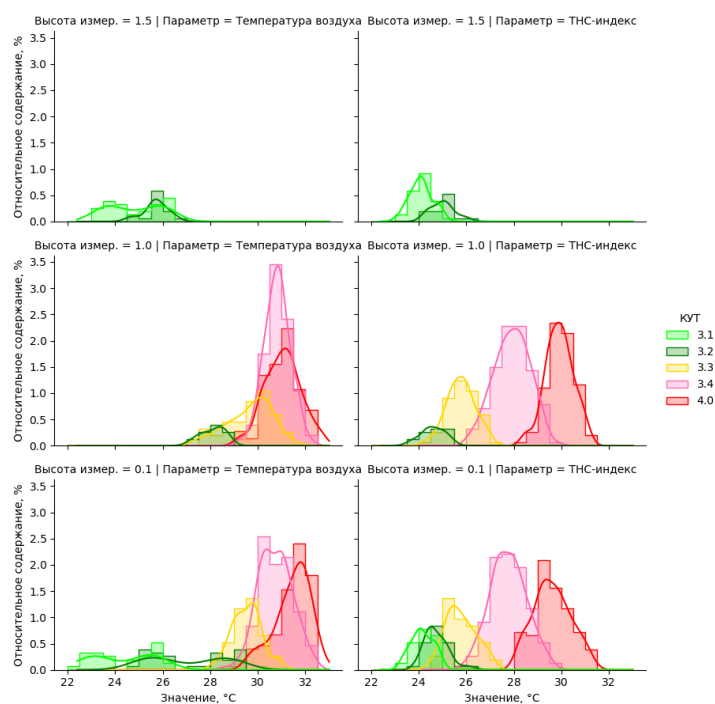


Рис. 6. Распределение ТНС-индексов и температур с учетом КУТ и высоты в условиях нагревающего микроклимата

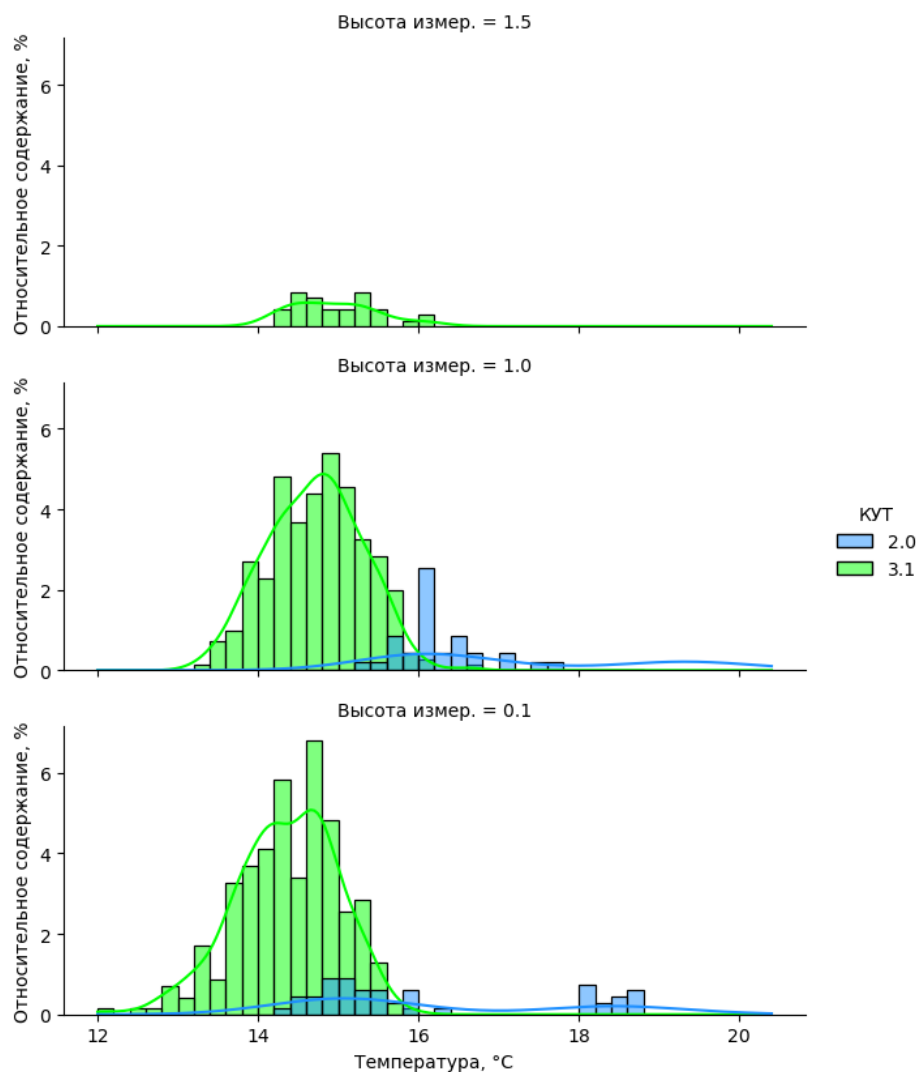


Рис. 7. Распределение ТНС-индексов и температур с учётом КУТ и высоты в условиях охлаждающего микроклимата

Обсуждение результатов исследования

На основе результатов исследования предложен объективный количественный метод оценки микроклиматических условий в кабинах машинистов электровозов в режимах как охлаждения, так и нагрева [1, 6]. Главное преимущество этого подхода состоит в том, что он позволяет избежать субъективных оценок при анализе условий труда для работников локомотивных бригад электровозов [11].

Структура рассматриваемых распределений температуры и ТНС-индекса представляет собой совокупность отдельных компонентов, каждый из которых соответствует конкретному классу условий труда и характеризуется приближенностью к нормальному распределению. Однако объединение этих данных не формирует нормальное распределение вследствие их непропорционального влияния. Подобная картина наблюдается повсеместно при условии наличия достаточных объемов статистических данных [6].

В источнике [7] был предложен градиент ТНС-индекса, который можно использовать для комплексной оценки состояния условий труда и который применим к кабинам других серий электровозов.

Необходимо более детально рассмотреть закономерности изменения градиентов температур и ТНС-индекса в кабине машиниста электровоза (рис. 8 и 9). Под влиянием как нагревающих, так и охлаждающих микроклиматических условий соблюдается нормативное ограничение изменения температуры, равное $3\text{ }^{\circ}\text{C/м}$ [2, 13].

Следовательно, результаты проведенного исследования имеют важное значение для дальнейшей разработки проектов систем и устройств поддержания оптимальных микроклиматических условий в кабинах машинистов электровозов для обеспечения безопасности труда работников, а также для построения и валидации математических моделей процессов тепломассопереноса в помещениях кабин локомотивных бригад электровозов [1, 7, 13].

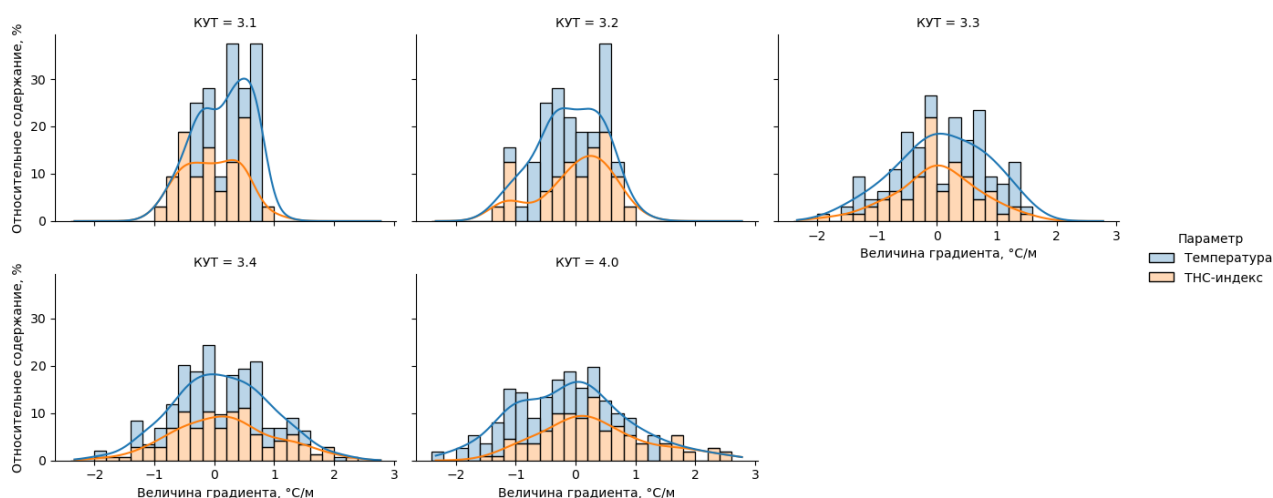


Рис. 8. Распределение температурных градиентов в условиях нагревающего микроклимата

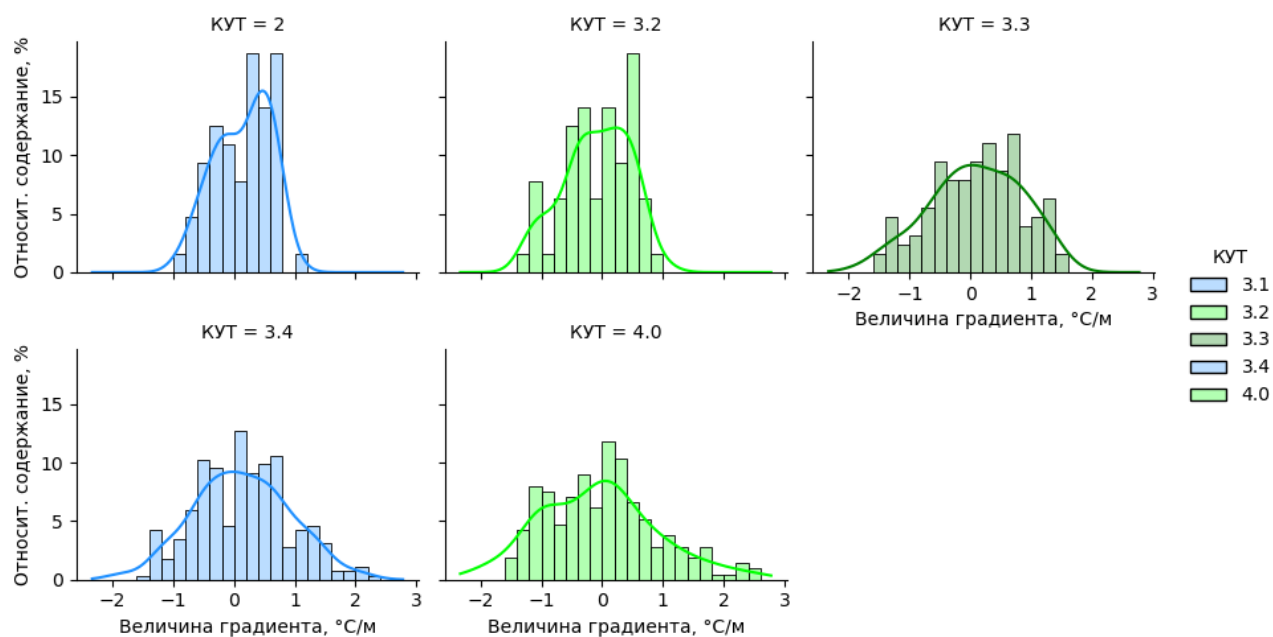


Рис. 9. Распределение температурных градиентов в условиях охлаждающего микроклимата (с учетом КУТ)

Заключение

В теплое время года локомотивные бригады электровозов, как правило, сталкиваются с более неблагоприятными условиями труда по показателям микроклимата, чем в холодный сезон [4, 5]. При воздействии нагревающего микроклимата распределения ТНС-индекса и температуры имеют один выраженный пик, так же как и в условиях охлаждающего. Результаты исследования демонстрируют, что каждый из изученных микроклиматических параметров по отдельности соответствует нормальному распределению и относится к определенному классу условий труда, однако их совокупность не формирует общего нормального распределения [6].

С ухудшением условий труда отмечается увеличение величин температурных градиентов и ТНС-индекса. При этом, несмотря на рост показателей, их значения не превышают допустимый санитарный предел в 3 °С/м ни в теплое, ни в холодное время года [2, 13]. Перспективным аспектом дальнейших научных изысканий представляется выявление статистически значимых зависимостей между параметрами микроклимата в кабине машиниста электровоза и аналогичными характеристиками окружающего пространства за ограждающими конструкциями подвижного состава.

Полученные результаты являются базой для создания и проверки математических моделей тепломассообмена, а также для конструирования систем и устройств, нормализующих микроклимат в кабинах машинистов, с целью повышения безопасности труда и безопасности движения поездов.

Результаты работы служат основой для разработки и валидации математических моделей тепломассопереноса, а также для проектирования систем и устройств нормализации микроклимата в кабинах машинистов для обеспечения безопасности труда и безопасности движения подвижного состава.

Список литературы

1 Сравнительный анализ условий труда машинистов автомотрис при воздействии как нагревающего, так и охлаждающего микроклимата / И. А. Баланов, Ю. И. Булыгин, А. С. Гуменюк, И. А. Яицков // XXI век : итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13, № 2 (66). – С. 132–140. – EDN ZWNPJR.

2 **Давыdochkin, Ю. Н.** Нормативное обеспечение в области микроклимата на железнодорожном подвижном составе / Ю. Н. Давыdochkin, Д. В. Емельянов, Л. В. Вербицкая // Локомотив. – 2022. – № 12 (792). – С. 6–8. – EDN QZOUFC.

3 **Гмызин, В. С.** Вопросы улучшения микроклимата в кабине локомотива / В. С. Гмызин // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2011» : в 3 частях, Ростов-на-Дону, 01 апреля 2011 года / Министерство транспорта РФ, Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Южный научный центр РАН, Российский национальный комитет по трибологии, Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская академия транспорта ; редактор А. Н. Гуда. Часть 2. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2011. – С. 401–402. – EDN URRUYO.

4 **Гутор, Е. М.** Факторы риска развития заболеваний у работников локомотивных бригад / Е. М. Гутор, Е. А. Жидкова, К. Г. Гуревич // Медицина труда и промышленная экология. – 2022. – Т. 61, № 1. – С. 43–52. – DOI 10.31089/1026-9428-2022-62-1-43-52.

5 **Киле, К. М.** Микроклимат в кабине машиниста тепловоза / К. М. Киле, Н. В. Муллер // Трансформация информационно-коммуникативной среды общества в условиях вызовов современности : материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 30 ноября

References

1 Comparative analysis of the working conditions of railway cars drivers under the influence of both heating and cooling microclimates / I. A. Balanov, Yu. I. Bulygin, A. S. Gumenyuk, I. A. Yaitskov // XXI century : results of the past and problems of the present plus. – 2024. – Vol. 13, No. 2 (66). – P. 132–140. – EDN ZWNPJR.

2 **Davydochkin, Yu. N.** Regulatory support in the field of microclimate on railway rolling stock / Yu. N. Davydochkin, D. V. Yemelyanov, L. V. Verbitskaya // Locomotive. – 2022. – No. 12 (792). – P. 6–8. – EDN QZOUFC.

3 **Gmyzin, V. S.** Issues of improving the microclimate in the locomotive cabin / V. S. Gmyzin // Transport-2011 : proceedings of the All-Russian scientific and practical conference : in 3 parts, Rostov-on-Don, April 01, 2011 / Ministry of Transport of the Russian Federation, Federal Agency of Railway Transport, Department of Energy, Mechanical Engineering, Mechanics and Management Processes of the Russian Academy of Sciences, Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Russian National Committee for Tribology, Rostov State Transport University, Russian Academy of Transport ; Editor A.N. Guda. Part 2. Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2011. – P. 401–402. – EDN URRUYO.

4 **Gutor, E. M.** Risk factors for the development of diseases in workers of locomotive crew / E. M. Gutor, E. A. Zhidkova, K. G. Gurevich // Occupational medicine and industrial ecology. – 2022. – Vol. 61, No. 1. – P. 43–52. – DOI 10.31089/1026-9428-2022-62-1-43-52.

5 **Kiele, K. M.** Microclimate in the cabin of a locomotive driver / K. M. Kiele, N. V. Muller // Transformation of the information and communication environment of society in the context of modern challenges : proceedings of the II International scientific and practical conference of young scientists, Komso-

2023 г. – Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 452–454. – EDN VROYAK.

6 Статистический анализ параметров микроклимата в кабинах путевых машин / И. А. Баланов, Ю. И. Булыгин, Д. В. Ашихмин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 111–118. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-9-111-112.

7 **Патент № 2489287 С2 Российская Федерация, МПК B61C 17/12.** Система обеспечения микроклимата в кабине управления локомотива : № 2011119395/11 : заявл. 07.11.2011 : опубл. 10.08.2013 / Д. А. Газев, Е. М. Лыткина, А. М. Худоногов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВПО ИРГУПС). – EDN FNSRQS.

8 **Parsons, K.** Human Thermal Environments : The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance / K. Parsons. – 3rd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – ISBN 978-1-4822-0461-4.

9 **d'Ambrosio Alfano, F. R.** Thermal Environment Assessment in Train Cabins / F. R. d'Ambrosio Alfano, B. I. Palella, G. Riccio // Applied Ergonomics. – 2011. – Vol. 42, No. 2. – P. 235–245. – DOI 10.1016/j.apergo.2010.07.005.

10 **Budd, G. M.** Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT)–Its History and Its Limitations / G. M. Budd // Journal of Science and Medicine in Sport. – 2008. – Vol. 11, No. 1. – P. 20–32. – DOI 10.1016/j.jsams.2007.07.003.

11 **Vimalanathan, K.** The Effect of Indoor Office Environment on Work Performance, Health and Well-Being of Office Workers / K. Vimalanathan, T. R. Babu // Ergonomics. – 2014. – Vol. 57, No. 8. – P. 1166–1177. – DOI 10.1080/00140139.2014.926794.

12 **ISO 7243:2017.** Ergonomics of the thermal environment – Assessment of heat stress using the wet bulb globe temperature (WBGT) index. – URL: <https://clck.ru/3ULYiJ> (дата обращения: 10.06.2026).

13 **Lin, Yang.** Thermal comfort analysis of a high-speed train cabin considering the solar radiation effects / Lin Yang, Xiangdong Li, Jiyuan Tu // International Journal of Sustainable Transportation. – 2019. – Vol. 29, Iss. 8. – P. 685–701. – DOI 10.1177/1420326X19876082.

molsk-on-Amur, November 30, 2023 – Komso-molsk-on-Amur : Komsomolsk-on-Amur State University, 2023. – P. 452–454. – EDN VROYAK.

6 Statistical analysis of microclimate parameters in cabins of track maintenance machines / I. A. Balanov, Yu. I. Bulygin, D. V. Ashikhmin [et al.] // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. – 2023. – No. 9. – P. 111–118. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-9-111-112.

7 **Patent No. 2489287 C2.** Russian Federation, IPC B61C 17/12. Microclimate control system in the locomotive control cabin : No. 2011119395/11 : application 07.11.2011 : published 10.08.2013 / D. A. Gazev, E. M. Lytkina, A. M. Khudonogov ; applicant Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Professional Education Irkutsk State Transport University (FSBEE HE IrSPE). – EDN FNSRQS.

8 **Parsons, K.** Human Thermal Environments : The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance / K. Parsons. – 3rd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – ISBN 978-1-4822-0461-4.

9 **d'Ambrosio Alfano, F. R.** Thermal Environment Assessment in Train Cabins / F. R. d'Ambrosio Alfano, B. I. Palella, G. Riccio // Applied Ergonomics. – 2011. – Vol. 42, No. 2. – P. 235–245. – DOI 10.1016/j.apergo.2010.07.005.

10 **Budd, G. M.** Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT)–Its History and Its Limitations / G. M. Budd // Journal of Science and Medicine in Sport. – 2008. – Vol. 11, No. 1. – P. 20–32. – DOI 10.1016/j.jsams.2007.07.003.

11 **Vimalanathan, K.** The Effect of Indoor Office Environment on Work Performance, Health and Well-Being of Office Workers / K. Vimalanathan, T. R. Babu // Ergonomics. – 2014. – Vol. 57, No. 8. – P. 1166–1177. – DOI 10.1080/00140139.2014.926794.

12 **ISO 7243:2017.** Ergonomics of the thermal environment – Assessment of heat stress using the wet bulb globe temperature (WBGT) index. – URL: <https://clck.ru/3ULYiJ> (date of access: 06/10/2026).

13 **Lin, Yang.** Thermal comfort analysis of a high-speed train cabin considering the solar radiation effects / Lin Yang, Xiangdong Li, Jiyuan Tu // International Journal of Sustainable Transportation. – 2019. – Vol. 29, Iss. 8. – P. 685–701. – DOI 10.1177/1420326X19876082.

Yu. Yu. Romanenko, Yu. I. Bulygin, I. A. Yaitskov

EXPERIMENTAL STUDIES OF MICROCLIMATIC CONDITIONS IN THE CABINS OF ELECTRIC LOCOMOTIVE DRIVERS TO IMPROVE WORKPLACE SAFETY SYSTEMS AND DEVICES AND INCREASE SAFE RAILWAY OPERATION

Abstract. The article presents the results of a statistical analysis of the microclimate parameters (temperature, the environmental heat load index – EHL-index) in the cabins of electric locomotive drivers of the EP1M, 2ES5K and VL-80 series. The study is based on data of a special assessment of electric locomotive crews' working conditions carried out at different times of the year. The methods of descriptive statistics and data visualization revealed that the empirical distributions of the studied parameters differ significantly from the normal one and represent a mixture of several components, each of which corresponds to a certain class of working conditions and is close to the normal distribution. It has been established that the effect of a heating microclimate poses a greater risk to locomotive crew members compared to the cooling one. The results of the work serve as the basis for the development and validation of mathematical models of heat and mass transfer, as well as for the design of microclimate normalization systems and devices in drivers' cabins to ensure workplace safety and safe railway operation of rolling stock.

Keywords: electric locomotive, microclimate conditions, WBGT-index (Wet Body Global Temperature), statistical analysis, workplace safety, locomotive crews, heat stress, safe railway operation.

For citation: Romanenko, Yu. Yu. Experimental studies of microclimatic conditions in the cabins of electric locomotive drivers to improve workplace safety systems and devices and increase safe railway operation / Yu. Yu. Romanenko, Yu. I. Bulygin, I. A. Yaitskov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 113–123. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_113.

Сведения об авторах

Романенко Юлия Юрьевна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
аспирант,
e-mail: romanenko.iulya@ya.ru

Бulygin Юрий Игоревич

Донской государственный технический
университет (ДГТУ),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности
и защиты окружающей среды»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: bulyur_rostov@mail.ru

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

Information about the author

Romanenko Yuliya Yuryevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Postgraduate Student,
e-mail: romanenko.iulya@ya.ru

Bulygin Yuri Igorevich

Don State Technical University (DSTU),
Chair “Life Safety and Environmental Protection”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: bulyur_rostov@mail.ru

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

А. С. Самойлова

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОВРЕМЕННОГО ОТЕЧЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОВОЗА СЕРИИ «ЕРМАК»

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной задачи повышения эффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока серии «Ермак», представляющего собой основу тяжеловесного движения поездов на грузонапряжённых линиях железных дорог Восточного полигона (Транссиб и БАМ). В условиях сложного горно-перевального рельефа с затяжными спусками на данных железнодорожных магистралях особую роль приобретает эффективность работы электровозов в режиме рекуперативного торможения.

В процессе исследования выявлена проблема, ограничивающая тормозные характеристики электровоза по каналу регулирования выпрямительно-инверторного преобразователя на уровне 3,5 зон ввиду конструкционной специфики построения электрических силовых цепей.

В качестве решения предлагается способ, позволяющий расширить область регулирования напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя свыше принятого ограничения вплоть до полных четырёх зон.

Для подтверждения эффективности реализации предлагаемого способа выполнен расчёт его работы применительно к современному отечественному электровозу переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак». В результате применения предлагаемого способа улучшаются тормозные характеристики электровоза, повысится его скорость по спуску и увеличится возврат электрической энергии в контактную сеть.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, тормозные характеристики, электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, блок балластных резисторов.

Для цитирования: Самойлова, А. С. Совершенствование тормозных характеристик современного отечественного электровоза серии «Ермак» / А. С. Самойлова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 124–133. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_124.

Введение

Ежегодно в России наблюдается рост грузооборота по всем видам транспорта, и каждый из них вносит свой вклад в развитие страны [1]. Среди них лидирующую позицию занимает железнодорожный транспорт, обеспечивая 87 % грузооборота и около трети пассажиропотока. Российские железные дороги занимают первое место в мире по интенсивности использования, поэтому представляют собой транспортную артерию страны [2]. В качестве стратегического приоритета выступает эффективное развитие железнодорожной сети Восточного полигона [3]. Своевременное наращивание провозной способности Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей (Транссиба и БАМа) играет существенную роль для экономики страны. К 2030 году объём перевозки грузов должен возрасти до 210 млн тонн в год [4]. Провозная способность железнодорожной сети тесно коррелирует со скоростью движения поездов, поэтому в рамках стратегии технического развития железнодорожного транспорта её повышение является важнейшей задачей для Российских железных дорог.

Особенностью железных дорог Восточного полигона является сложный горно-перевальный рельеф местности с многочисленными затяжными подъёмами и спусками, а также кривыми малого радиуса [5]. Грузонапряжённость Транссиба и БАМа составляет 60 млн ткм брутто/км, что в 1,5 раза превышает средний показатель по сети. Один из наиболее грузонапряжённых участков Большой Луг – Слюдянка. Здесь протяжённость кривых участков достигает 72,3 % от общей длины дистанции пути, причём 49 % из них имеют радиус менее 350 метров. Более половины участков характеризуются подъёмами и спусками в диапазоне от 10 до 21 ‰ [6]. Для преодоления этих сложных участков пути в работу включаются подталкивающие локомотивы, которые увеличивают суммарную силу тяги или создают дополнительное тормозное усилие для тяжеловесного поезда.

В настоящее время ведётся модернизация железнодорожной инфраструктуры Транссиба и БАМа с целью увеличения провозной способности железных дорог Восточного полигона и расширения поставок продукции через дальневосточные порты [7]. Вместе с этим глобальным процессом для повышения интенсивности движения поездов и, как следствие, объёмов грузооборота активно применяется и развивается технология интервального регулирования движения поездов (ИРДП) «Виртуальная сцепка». Данная технология использует цифровой радиоканал для оперативной синхронизации параметров режима движения между локомотивами ведущего и ведомого поезда, тем самым обеспечивая минимальный интервал времени их следования при сохранении требуемого уровня безопасности [8]. «Виртуальная сцепка» уже сегодня способствует увеличению интенсивности движения поездов на Восточном полигоне, дополняя процесс модернизации инфраструктуры без необходимости её непосредственной реконструкции.

Стоит заметить, что все стоящие перед железнодорожной отраслью стратегические задачи по увеличению грузооборота и провозной способности железнодорожной сети, а также по повышению интенсивности и скорости движения поездов неизбежно оказывают влияние на характеристики тягового подвижного состава и выдвигают дополнительные требования к его надёжности и эффективности работы. Основную тяговую мощность железных дорог Восточного полигона составляют современные отечественные электровагоны переменного тока 2(3, 4)ЭС5К серии «Ермак». Эти локомотивы специально адаптированы для работы на горно-перевальных участках и способны вести тяжеловесные поезда массой до 7100 тонн. По состоянию на конец 2024 года инвентарный парк Восточного полигона насчитывает более 1800 таких электровагонов с общим пробегом свыше 6,8 млрд км. Для обеспечения планируемых объёмов грузоперевозок в ближайшей и долгосрочной перспективе ОАО «РЖД» ежегодно закупает более 50 электровагонов данной серии на Восточный полигон. В соответствии с современными требованиями конструкция и алгоритмы управления электровагонами постоянно совершенствуются.

Таким образом, улучшение эксплуатируемых отечественных электровагонов является ключевым фактором для устойчивого развития железных дорог Восточного полигона в масштабах всей страны. В контексте этого развития совершенствование режима рекуперативного торможения современных отечественных электровагонов переменного тока становится особенно актуальным и востребованным направлением. Применение рекуперативного торможения позволяет осуществлять подтормаживание локомотива для стабилизации скорости движения поезда на затяжных спусках и обеспечивает значительное энергосбережение за счёт возврата электрической энергии обратно в контактную сеть. Вопросы реализации указанного потенциала посвящены современные исследования и научные работы в области совершенствования режима рекуперативного торможения на электровагонах переменного тока с коллекторным приводом [9–19].

Описание предлагаемого способа

В интересах достижения поставленных целей и желаемого эффекта от совокупности реализуемых стратегий развития железнодорожного транспорта России, а именно совершенствования и модернизации отечественного электровагоностроения, в настоящий момент разработан способ, предназначенный для повышения эффективности работы режима рекуперативного торможения электровагонов переменного тока.

В ходе исследования особенностей реализации режима рекуперативного торможения было выявлено, что его работа осуществляется не в полной мере вследствие конструктивной специфики построения электрических силовых цепей электровагона [20–22]. Данная специфика обусловлена наличием блоков балластных резисторов (ББР) в электрической цепи якорей тяговых электродвигателей (ТЭД), согласно рассматриваемому режиму – якорей генераторов. Их роль в процессе реализации электровагоном рекуперативного торможения заключается в обеспечении электрической устойчивости и выравнивании токов якорей ТЭД, что позволяет устранять и сглаживать влияние возникающих возмущающих воздействий [23]. При этом негативная составляющая наличия ББР в силовой электрической цепи электровагона выражается в ограничении регулирования выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) на уровне 3,5 зон [24], введённом по причине возникновения значительных потерь напряжения на ББР при максимально возможном значении тока якоря ТЭД. На рис. 1 представлена тормозная характеристика электровагона переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак» – зависимость тормозной силы и тока якоря ТЭД от скорости движения при фиксированных значениях напряжения на ТЭД. Регулирование скорости движения электровагона в режиме рекуперативного торможения за счёт изменения конфигурации цепи питания ТЭД осуществляется в зоне высоких скоростей фазным регулированием напряжения выпрямительной установки возбуждения (ВУВ) (белая область) и в зоне средних и малых скоростей зонно-фазным регулированием напряжения ВИП до

уровня 3,5 зоны (серая область) с учётом ограничений по сцеплению и максимальному току (950 А) на ББР (красные линии).

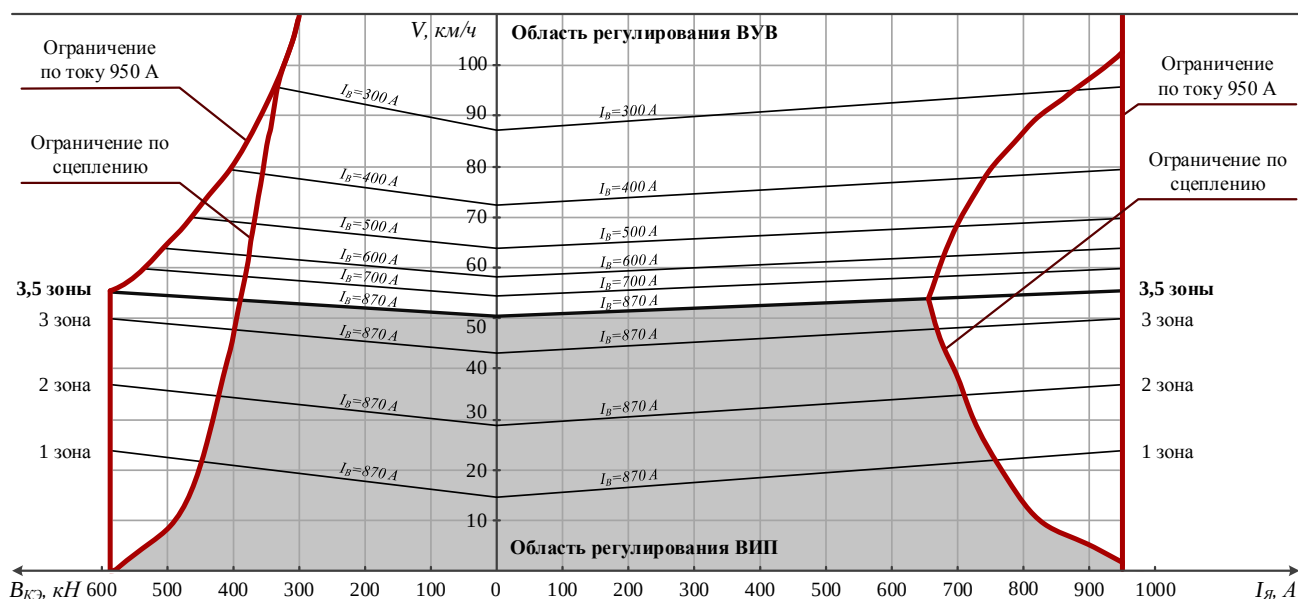


Рис. 1. Тормозные характеристики электровоза переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак»

Анализ режимных карт вождения поездов на участке Восточного полигона Большой Луг – Слюдянка выявил на всём его протяжении ограничение по скорости движения 60 км/ч. При такой скорости электровоз, согласно своей тормозной характеристике (рис. 1), находится в области 3,5 зоны регулирования ВИП (установленное ограничение по регулированию ВИП) с управлением по каналу ВУВ. Учитывая наличие затяжных спусков, движение электровоза в таком режиме осуществляется на протяжении 40 % всего участка. Принимая во внимание данный факт недоиспользование возможностей электровоза в режиме рекуперативного торможения вызывает ряд негативных последствий:

- сокращение объёмов электрической энергии, возвращаемой электровозом в контактную сеть, из-за наличия её недорекуперируемой части;
- снижение скорости движения поезда по спуску, что препятствует росту пропускной способности тяговых участков железных дорог и лимитирует тем самым интенсивность движения поездов;
- вследствие перехода на регулирование тормозной силы по каналу ВУВ (путём ослабления магнитного потока ТЭД) возникают пульсации магнитодвижущей силы и магнитного потока, дополнительные потери, нагрев обмоток ТЭД и нарушение его коммутации;
- увеличение вероятности потери сцепления по причине ослабления магнитного потока ТЭД при разнице токов якоря и возбуждения, и, следовательно, возникновение юза в режиме рекуперативного торможения.

Потенциал совершенствования алгоритмов управления электрооборудованием электровоза, закладываемых в программное обеспечение микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД), с учётом специфики построения его электрических силовых цепей позволил реализовать способ регулирования выпрямленного напряжения ВИП в рассматриваемом режиме свыше установленного ограничения 3,5 зоны. Способ заключается в том, что для возможности регулирования выпрямленного напряжения свыше 3,5 зоны в зависимости от скорости движения электровоза формируется предлагаемая величина угла регулирования на четвёртой зоне в соответствии с определяемой максимально возможной величиной выпрямленного напряжения, ограничиваясь текущей величиной тока якоря ТЭД, постоянно контролируемой с датчиков тока [25].

Расчёт работы предлагаемого способа для современного отечественного электровоза серии «Ермак»

В качестве подтверждения результативности реализации предлагаемого авторами способа произведём расчёт его работы применительно к современному отечественному электровозу переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак». Величина предлагаемого угла регулирования $\alpha_p^{\text{предл}}$ будет рассчитываться по формуле (1):

$$\alpha_p^{\text{предл}} = \pi - \arccos \left(\frac{2U_{d\max} - U_{d4} \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \cos \delta + (2 \cdot \varepsilon^2 + \varepsilon + \mu / \varepsilon - \mu + 1) \cdot \frac{2 \cdot \lambda \cdot X_{T4} \cdot I_d}{\pi}}{U_{d4} \cdot (1 - \varepsilon)} \right), \quad (1)$$

где $U_{d\max}$ – максимально возможная величина среднего выпрямленного напряжения инвертора, В;

ε – коэффициент, выражающий отношение амплитудного значения переменного напряжения предыдущей зоны ВИП к такому же напряжению последующей зоны, 0,75;

δ – угол запаса инвертора, 25 эл. град.;

μ – коэффициент, выражающий отношение приведенного эквивалентного значения индуктивного сопротивления цепи переменного тока ВИП предыдущей зоны к такому же сопротивлению последующей зоны, 0,075;

λ – коэффициент, учитывающий влияние пульсаций выпрямленного тока, 1,05;

X_{T4} – индуктивное сопротивление обмоток тягового трансформатора на четвёртой зоне регулирования (цепи переменного тока), 0,088 Ом;

I_d – среднее значение выпрямленного тока инвертора, А;

U_{d4} – действующее значение напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора на четвёртой зоне регулирования, 1260 В.

При этом $U_{d\max}$ принимается в соответствии с условием (2) относительно текущей максимальной величины тока якоря ТЭД $I_{\text{яmax}}^{\text{тек}}$ в зависимости от значения задаваемой скорости движения электровоза V_3 :

$$U_{d3,5} \leq U_{d\max}^{\text{тек}} \leq U_{d\max}^3, \quad (2)$$

где $U_{d\max}^{\text{тек}}$ – максимально возможная величина среднего выпрямленного напряжения относительно $I_{\text{яmax}}^{\text{тек}}$, В;

$U_{d\max}^3$ – максимально допустимая величина среднего выпрямленного напряжения в зависимости от V_3 .

$U_{d3,5}$ определяется по формуле (3) при величине угла регулирования α_p равной 90 эл. град., что соответствует 3,5 зонам регулирования ВИП:

$$U_{d3,5} = \frac{U_{d4}}{2} \cdot ((1 + \varepsilon) \cdot \cos \delta + (1 - \varepsilon) \cdot \cos \beta_p) - (2 \cdot \varepsilon^2 + \varepsilon + \mu / \varepsilon - \mu + 1) \cdot \frac{\lambda \cdot X_{T4} \cdot I_d}{\pi}, \quad (3)$$

где β_p – угол регулирования, равный $\beta_p = \pi - \alpha_p$, эл. град.

$U_{d\max}^{\text{тек}}$ вычисляется по формуле (4) с учётом текущих потерь напряжения на ББР относительно $I_{\text{яmax}}^{\text{тек}}$:

$$U_{d\max}^{\text{тек}} = U_{d3,5} + U_{\text{доб}}^{\text{тек}} = U_{d3,5} + R_{\text{ББР}} \cdot (I_{\text{яmax}}^{\text{огр}} - I_{\text{яmax}}^{\text{тек}}), \quad (4)$$

где $U_{d3,5}$ – величина среднего выпрямленного напряжения, соответствующая установленному ограничению 3,5 зоны регулирования ВИП, В;

$U_{\text{доб}}^{\text{тек}}$ – величина потенциального резерва по напряжению относительно максимальных и текущих потерь напряжения на ББР, В;

$R_{\text{ББР}}$ – сопротивление ББР типа ББР-64, 0,143 Ом;

$I_{\text{яmax}}^{\text{огр}}$ – ограничение по максимальному значению тока якоря ТЭД на ББР, 950 А.

$U_{d\max}^3$ рассчитывается по формуле (5) в зависимости от V_3 и с учётом текущего значения скорости движения электровоза $V_{\text{тек}}$:

$$U_{d\max}^3 = U_{d3,5} + U_{\text{доб}}^3 = U_{d3,5} + C_V \Phi \cdot (V_3 - V_{\text{тек}}), \quad (5)$$

где $U_{\text{доб}}^3$ – величина добавочного напряжения относительно разницы V_3 и $V_{\text{тек}}$, В;

$C_V \Phi$ – удельная ЭДС ТЭД в зависимости от величины тока возбуждения I_B , В/км/ч.

В рамках расчёта по формуле (6) $V_{\text{тек}}$ принимается в отношении величины $U_{d3,5}$ в качестве установления ограничения 3,5 зоны регулирования ВИП при определённой величине $I_{\text{яmax}}^{\text{тек}}$, также по формуле (7) V_3 реализуется в данном примере относительно $U_{d\max}^{\text{тек}}$ как максимально возможная величина в диапазоне регулирования ВИП свыше 3,5 зон:

$$V_{\text{тек}} = \frac{(U_{d3,5} - I_{\text{яmax}}^{\text{тек}} \cdot n_d \cdot (\frac{2\lambda}{\pi} X_{T4} - \varepsilon \cdot R_{T4} - r_{\text{ср}}) + \Delta U_{\text{вент}}) + I_{\text{яmax}}^{\text{тек}} \cdot (\sum r_d' + R_{\text{ББР}})}{C_V \Phi}, \quad (6)$$

$$V_3 = \frac{(U_{d\max}^{I_{\text{тек}}} - I_{\text{ямак}}^{\text{тек}} \cdot n_d \cdot (\frac{2\lambda}{\pi} X_{T4} - \varepsilon \cdot R_{T4} - r_{\text{ср}}) + \Delta U_{\text{вент}}) + I_{\text{ямак}}^{\text{тек}} \cdot (\sum r'_d + R_{\text{ББР}})}{C_V \Phi}, \quad (7)$$

где n_d – количество ТЭД, получающих питание от одного ВИП, 2;

R_{T4} – активное сопротивление обмоток тягового трансформатора на четвёртой зоне регулирования, 0,007 Ом;

$r_{\text{ср}}$ – сопротивление обмотки сглаживающего реактора типа РС-19, 0,0182 Ом;

$\Delta U_{\text{вн}}$ – падение напряжения в тиристорах плеч ВИП, 8,4 В;

$\sum r'_d$ – сопротивление якорной обмотки ТЭД с учетом обмоток добавочных полюсов и компенсационной обмотки, 0,0237 Ом.

Результаты расчёта величины предлагаемого угла регулирования $\alpha_r^{\text{предл}}$ и максимально возможной величины среднего выпрямленного напряжения инвертора $U_{d\max}$ по формулам (1), (2) и (4) в диапазоне изменения $I_{\text{ямак}}^{\text{тек}}$ от 100 А до 900 А сведены в табл. 1.

Таблица 1

Величина предлагаемого угла регулирования $\alpha_r^{\text{предл}}$ и максимально возможной величины среднего выпрямленного напряжения инвертора $U_{d\max}$ в диапазоне изменения текущей максимальной величины тока якоря ТЭД $I_{\text{ямак}}^{\text{тек}}$

$I_{\text{ямак}}^{\text{тек}}, \text{ А}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$U_{d\max}, \text{ В}$	1101,77	1069,33	1035,14	1003,95	971,26	938,56	905,87	873,18	840,49
$\alpha_r^{\text{предл}}, \text{ эл.град.}$	140	133	125	120	114	109	103	98	93

Основываясь на возможности реализации регулирования выпрямленного напряжения ВИП вплоть до четырёх полных зон применительно к рассматриваемому электровозу, тормозные характеристики приобретают совершенный вид. Произведём расчёт тормозной силы по формуле (8) при её регулировании в зоне средних скоростей движения электровоза по каналу ВИП в диапазоне изменения $I_{\text{ямак}}^{\text{тек}}$ от 100 А до 950 А.

$$B_{\text{кэ}} = \frac{3,6 \cdot n_d \cdot C_V \Phi \cdot I_{\text{ямак}}^{\text{тек}}}{\eta_{\text{зп}} \cdot \eta_d}, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{зп}}$ – коэффициент, учитывающий потери в зубчатой передаче в процессе преобразования энергии, 0,975;

η_d – коэффициент, отражающий потери силы в ТЭД, 0,95.

При этом расчёт скоростей движения электровоза выполним по формуле (9) при условии установления ограничения 3,5 зоны и свыше данного уровня вплоть до четырёх полных зон за счёт реализации предлагаемого способа:

$$V_{\text{тек}} = \frac{(U_{d0} - I_{\text{ямак}}^{\text{тек}} \cdot n_d \cdot (\frac{2\lambda}{\pi} X_T - \varepsilon \cdot R_T - r_{\text{ср}}) + \Delta U_{\text{вент}}) + I_{\text{ямак}}^{\text{тек}} \cdot (\sum r'_d + R_{\text{ББР}})}{C_V \Phi}, \quad (9)$$

где U_{d0} – выпрямленное напряжение холостого хода инвертора, В.

Результаты расчёта необходимых данных для построения тормозных характеристик электровоза переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак» по формулам (8) и (9) сведены в таблицу 2.

На основании рассчитанных значений построим тормозные характеристики электровоза переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак» с применением предлагаемого способа в режиме рекуперативного торможения, позволяющего расширить их область регулирования по каналу ВИП с 3,5 зон до полной 4 зоны (штрихованная область) и тем самым повысить скорость движения поезда на 4 км/ч (диапазон ΔV) (рис. 2).

Таблица 2

**Результаты расчёта тормозных характеристик электровоза переменного тока 2ЭС5К
серии «Ермак» с применением предлагаемого способа**

Параметры по каналу регулирования ВИП												
$I_{\text{ямак}}^{\text{тек}}, \text{ A}$		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950
$B_{\text{кэ}}, \text{ кН}$		0	61,8	123,6	185,4	247,3	309,1	370,9	432,7	494,5	556,3	587,2
$V, \text{ км/ч}$	3 зона	43,2	43,9	44,6	45,3	46	46,7	47,4	48,1	48,8	49,4	49,8
	3,5 зоны	50,4	50,9	51,4	51,9	52,5	53	53,5	54	54,5	55,1	55,3
	4 зона	54,6	55,2	44,7	56,2	56,7	57,2	57,8	58,3	58,8	59,3	59,6
Параметры по каналу регулирования ВУВ												
$B_{\text{кэ}}, \text{ кН}$	$I_{\text{В}}= 700 \text{ A}$	0	57,2	114,5	171,7	229	286,2	343,5	400,7	457,9	515,2	543,8
	$I_{\text{В}}= 600 \text{ A}$	0	53,5	107,1	160,6	214,2	267,7	321,3	374,8	428,3	481,9	508,7
$V, \text{ км/ч}$	$I_{\text{В}}= 700 \text{ A}$	59	59,6	60,1	60,7	61,3	61,8	62,4	62,9	63,5	64,1	64,3
	$I_{\text{В}}= 600 \text{ A}$	63,1	63,7	64,3	64,9	65,5	66,1	66,7	67,3	67,9	68,5	68,8

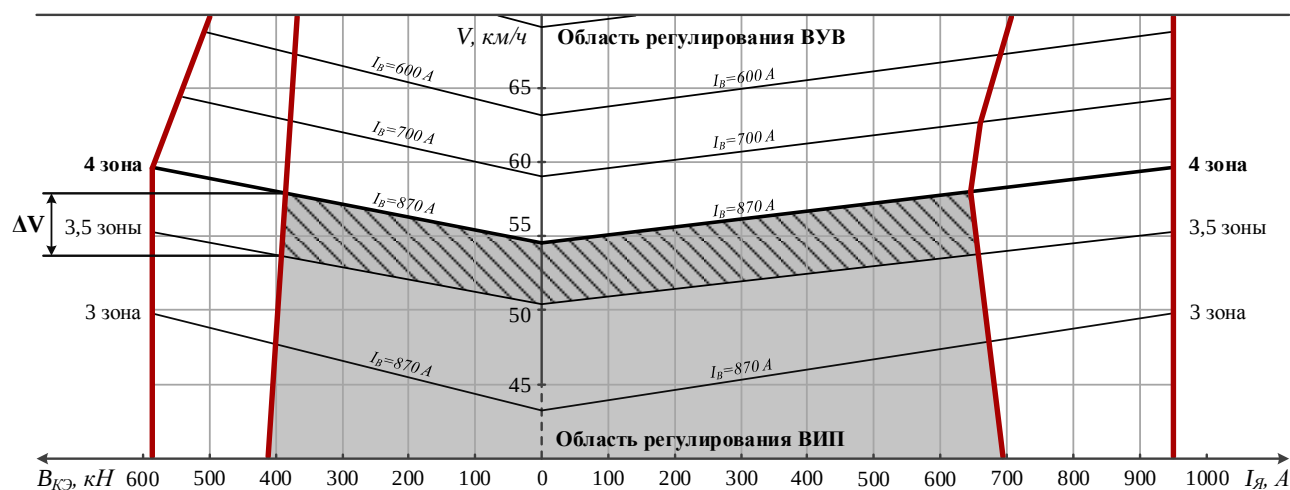


Рис. 2. Часть тормозных характеристик электровоза переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак» с применением предлагаемого способа

Заключение

Применение предлагаемого способа в режиме рекуперативного торможения на современном отечественном электровозе переменного тока серии «Ермак» способствует улучшению его тормозных характеристик за счёт расширения области их регулирования по каналу ВИП вплоть до полных четырёх зон. Разработанное решение повышает эффективность работы электровоза в исследуемом режиме, позволяя достичь следующих преимуществ:

- прирост продуктивности использования энергоресурсов при сокращении затрат электрической энергии на тягу поездов за счёт увеличения объёмов возвращаемой электрической энергии в контактную сеть не менее чем на 5 % [26];
- наращивание интенсивности движения поездов на железных дорогах Восточного полигона при повышении их скорости движения по спуску не менее чем на 4 км/ч;
- предотвращение возникновения юза в режиме рекуперативного торможения на электровозе благодаря увеличению длительности работы ТЭД на полном поле, а также снижение дополнительных потерь, пульсаций магнитодвижущей силы и магнитного потока, нагрева обмоток ТЭД и нарушений его коммутации.

Рост и улучшение приведённых показателей эффективности работы электровоза переменного тока напрямую способствует решению стратегических задач отрасли, направленных на увеличение грузооборота и провозной способности железнодорожной сети, а также на повышение интенсивности перевозочного процесса.

Список литературы

1 Перевозки грузов транспортом в РФ за 2024 год выросли на 5,5% // Информационное агентство ТАСС : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/23084489> (дата обращения: 28.02.2026).

2 РЖД в цифрах // ОАО «РЖД» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377/page/1417901?id=17127#main-header> (дата обращения: 28.02.2026).

3 Совещание по развитию Восточного полигона железных дорог // Президент России : официальный сайт. – 2025. – URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/deliberations/73078> (дата обращения: 01.03.2026).

4 Реализация III этапа развития Восточного полигона // Официальное представительство ОАО «РЖД» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19722#main-header> (дата обращения: 01.03.2026).

5 Восточный полигон. Общая характеристика // Официальное представительство ОАО «РЖД» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19722#main-header> (дата обращения: 01.03.2026).

6 **Лисицын, А. И.** Совершенствование системы технического обслуживания пути со сложными эксплуатационными условиями горно-перевальных участков : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 2.9.2 / Лисицын Андрей Иванович ; Российский университет транспорта (РУТ МИИТ). – Москва, 2022. – 149 с.

7 Утвержден третий этап модернизации БАМа и Транссиба на 3,7 трлн рублей // Сетевое издание Ведомости : официальный сайт. – 2024. – URL: <https://www.vedomosti.ru/strana/siberian/articles/2024/05/02/1035157-modernizatsii-bam-transsiba> (дата обращения: 04.03.2026).

8 Системы интервального регулирования и управления движением поездов // АО «НИИАС» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://niias.ru/projects/isuzht/> (дата обращения: 04.03.2026).

9 **Власьевский, С. В.** Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов однофазно-постоянного тока с рекуперативным торможением : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.09.03 / Власьевский Станислав Васильевич. – Москва, 2001. – 396 с.

References

1 Cargo transportation by transport in the Russian Federation increased by 5.5% in 2024 // TASS Information Agency : official website. – 2025. –

URL: <https://tass.ru/ekonomika/23084489> (date of access: 28.02.2026).

2 RZD in numbers // JSC Russian Railways : official website. – 2025. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377/page/1417901?id=17127#main-header> (date of access: 28.02.2026).

3 Meeting on the development of the Eastern Railway Polygon // President of Russia : official website. – 2025. – URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/deliberations/73078> (date of access: 01.03.2026).

4 Implementation of Stage III of the Eastern Polygon Development // Official representative office of JSC Russian Railways : official website. – 2025. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19722#main-header> (date of access: 01.03.2026).

5 Eastern Polygon. General Characteristics // Official Representative Office of JSC Russian Railways : official website. – 2025. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19722#main-header> (date of access: 01.03.2026).

6 **Lisitsyn, A. I.** Improvement of the track maintenance system with complex operating conditions of mountain-transshipment sections : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 2.9.2 / Lisitsyn Andrey Ivanovich ; Russian University of Transport (RUT MIIT). – Moscow, 2022. – 149 p.

7 The third stage of the modernization of the Baikal – Amur Mainline and the Trans-Siberian Railway for 3.7 trillion rubles has been approved // Online edition of Vedomosti : official website. – 2024. – URL: <https://www.vedomosti.ru/strana/siberian/articles/2024/05/02/1035157-modernizatsii-bam-transsiba> (date of access: 04.03.2026).

8 Interval regulating and train traffic control systems // JSC NIIAS : official website. – 2025. – URL: <https://niias.ru/projects/isuzht/> (date of access: 04.03.2026).

9 Vlashevsky, S. V. Increasing the efficiency of rectifier-inverter converters of single-phase DC electric locomotives with regenerative braking : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 05.09.03 / Vlashevsky Stanislav Vasilyevich. – Moscow, 2001. – 396 p.

10 **Линьков, А.О.** Совершенствование выпрямительной установки возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Линьков Алексей Олегович. – Иркутск, 2015. – 177 с.

11 **Шрамко, С. Г.** Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения за счет изменения параметров балластных резисторов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.09.03 / Шрамко Сергей Геннадьевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2016. – 142 с.

12 Способ повышения энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / Е. В. Буняева, В. Г. Скорик, С. В. Власьевский, Д. С. Фокин // Электротехника. – 2016. – № 2. – С. 17–20. – ISSN 0013-5860.

13 **Савоськин, А. Н.** Анализ электромагнитных процессов в тяговой сети при взаимодействии электровозов в режимах рекуперации и тяги / А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков, И. И. Гарбузов // Электротехника. – 2014. – № 5. – С. 47–52. – ISSN 0013-5860.

14 **Кучумов, В. А.** О реализации рекуперативного торможения на электровозе переменного тока с однофазным обратимым преобразователем напряжения / В. А. Кучумов, И. Н. Никончук // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81, № 1. – С. 31–37. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37.

15 **Мельниченко, О. В.** Повышение энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с помощью разнофазного управления инверторами на первой зоне регулирования / О. В. Мельниченко, С. В. Власьевский // Вестник ИРГТУ. – 2014. – № 7 (90). – С. 93–99. – ISSN 1814-3520.

16 **Кулинич, Ю. М.** Повышение качества электроэнергии, потребляемой электровозом однофазно-постоянного тока, на основе применения гибридного компенсатора реактивной мощности : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.09.03 / Кулинич Юрий Михайлович. – Москва, 2002. – 270 с.

17 **Соловьёв, В. А.** Выравнивание нагрузок в параллельных цепях тяговых двигателей, работающих в режиме генератора, и снижение энергетических потерь электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В. А. Со-

10 **Linkov, A. O.** Improving the rectifier excitation unit of AC electric locomotive traction motors in regenerative braking mode : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.22.07 / Linkov Aleksey Olegovich. – Irkutsk, 2015. – 177 p.

11 **Shramko, S. G.** Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives in the regenerative braking mode by changing the parameters of ballast resistors : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.09.03 / Shramko, Sergey Gennadievich. – Komsomolsk-on-Amur, 2016. – 142 p.

12 A method for increasing the energy efficiency of an alternating current electric locomotive in the mode of regenerative braking / E. V. Bunyaeva, V. G. Skorik, S. V. Vlashevsky, D. S. Fokin // Russian Electrical Engineering. – 2016. – No. 2. – P. 17–20. – ISSN 0013-5860.

13 **Savoskin, A. N.** Analysis of electromagnetic processes in the traction network during the interaction of electric locomotives in recovery and traction modes / A. N. Savoskin, O. E. Pudovikov, I. I. Garbuzov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – No. 5. – P. 47–52. – ISSN 0013-5860.

14 **Kuchumov, V. A.** On the implementation of regenerative braking on an AC electric locomotive with a single-phase reversible voltage converter / V. A. Kuchumov, I. N. Nikonchuk // Vestnik of the Railway research institute. – 2022. – Vol. 81, No. 1. – P. 31–37. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37.

15 **Melnichenko, O. V.** Increasing the energy efficiency of an alternating current electric locomotive in the regenerative braking mode by means of multiphase control of inverters in the first control zone / O. V. Melnichenko, S. V. Vlashevsky // The Bulletin of Irkutsk State University. – 2014. – No. 7 (90). – P. 93–99. – ISSN 1814-3520.

16 **Kulinich, Ju. M.** Improving the quality of electricity consumed by a single-phase DC electric locomotive, based on the use of a hybrid reactive power compensator : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 05.09.03 / Kulinich Yuri Mikhailovich. – Moscow, 2002. – 270 p.

17 **Soloviev, V. A.** Load balancing in parallel circuits of traction motors operating in generator mode and reducing energy losses of an AC electric locomotive in regenerative braking mode / V. A. Soloviev, A. I. Malyukova,

ловьев, А. И. Малюкова, С. В. Власьевский // Информатика и системы управления. – 2013. – № 3 (37). – С. 168–174. – ISSN 1814-2400.

18 **Томилов, В. С.** Повышение эффективности режима рекуперативного торможения электроваз переменного тока : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 2.9.3 / Томилов Вячеслав Станиславович. – Иркутск, 2022. – 154 с.

19 Оценка энергетической эффективности электровазов 3ЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» / С. В. Власьевский, О. А. Малышева, Н. Г. Шабалин, В. В. Семченко // Вестник ВНИИЖТ. – 2020. – Т. 79, № 1. – С. 17–25. – DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-1-17-25.

20 **Трахтман, Л. М.** Электрическое торможение электроподвижного состава / Л. М. Трахтман. – Москва : Транспорт, 1965. – 204 с.

21 **Мельниченко, О. В.** Повышение эффективности работы рекуперативного торможения электровазов переменного тока в зоне высоких скоростей движения / О. В. Мельниченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 1 (29). – С. 174–179. – ISBN 978-5-98710-157-5.

22 **Мельниченко, О. В.** Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровазов переменного тока : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.09.03 / Мельниченко Олег Валерьевич. – Хабаровск, 2015. – 392 с.

23 **Самойлова, А. С.** Проблема негативного влияния ББР на эффективность работы электроваз переменного тока серии 2(3)ЭС5К в режиме рекуперативного торможения и способ её решения / А. С. Самойлова // Молодежная наука : Труды XXVII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Красноярск, 20 апреля 2023 года. – Красноярск : ФГБОУ ВО ИрГУПС, 2023. – С. 227–231. – ISBN 978-5-903293-88-9.

24 Электроваз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы : ИДМБ.661142.009-05РЭ1 (ЗТС.001.012-05РЭ1) / разработчик и изготовитель – НЭВЗ. – Новочеркасск, 2015. – 348 с.

25 **Самойлова, А. С.** Разработка способа повышения эффективности работы электровазов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / А. С. Самойлова, О. В. Мельниченко, П. В. Григоренко // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. –

S. V. Vlasievsky // Computer Science and Control Systems. – 2013. – No. 3 (37). – P. 168–174. – ISSN 1814-2400.

18 **Tomilov, V. S.** Improving the efficiency of regenerative braking mode in AC electric locomotives : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 2.9.3 / Vyacheslav Stanislavovich Tomilov. – Irkutsk, 2022. – 154 p.

19 Energy efficiency assessment of the 3ES5K electric locomotives when using interval traffic control technology in the form of “virtual coupling” / S. V. Vlasievsky, O. A. Malysheva, N. G. Shabalin, V. V. Semchenko // Vestnik of the Railway Research Institute. – 2020. – Vol. 79, No. 1. – P. 17–25. – DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-1-17-25.

20 **Trakhtman, L. M.** Electric braking of electric rolling stock / L. M. Trakhtman. – Moscow : Transport, 1965. – 204 p.

21 **Melnichenko, O. V.** Improving the efficiency of regenerative braking of AC electric locomotives in the high-speed zone / O. V. Melnichenko // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. – 2011 – No. 1 (29) – P. 174–179. – ISBN 978-5-98710-157-5.

22 **Melnichenko, O. V.** Improving the energy efficiency of traction electric drives of AC electric locomotives : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 09/05/03 / Melnichenko Oleg Valerievich. – Khabarovsk, 2015. – 392 p.

23 **Samoilova, A. S.** The problem of the negative impact of the regenerative braking system on the efficiency of the 2(3) ES5K Series AC electric locomotive in regenerative braking mode and a method for solving it / A. S. Samoilova // Youth Science : proceedings of the XXVII All-Russian student scientific and practical conference, Krasnoyarsk, April 20, 2023. – Krasnoyarsk : ISTU, 2023. – P. 227–231. – ISBN 978-5-903293-88-9.

24 Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). User manual. Book 1. Description and operation. Electrical circuits : IDMB. 661142.009-05RE1 (ЗТС.001.012-05RE1). – NEVZ. – Novocherkassk, 2015. – 348 p.

25 **Samoilova, A. S.** Development of a method to increase the efficiency of AC electric locomotives in regenerative braking mode / A. S. Samoilova, O. V. Melnichenko, P. V. Grigorenko // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2025. –

2025. – № 3 (67). – С. 72–79. – DOI 10.20291/2079-0392-2025-3-72-79.

26 **Самойлова, А. С.** Повышение энергоэффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / А. С. Самойлова, О. В. Мельниченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – № 1 (77). – С. 136–143. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143.

No. 3 (67). – P. 72–79. – DOI 10.20291/2079-0392-2025-3-72-79.

26 **Samoilova, A. S.** Improving the energy efficiency of a modern domestic AC electric locomotive in the regenerative braking mode / A.S. Samoilova, O.V. Melnichenko // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. – 2023. – No. 1 (77). – P. 136–143. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143.

A. S. Samoilova

IMPROVING THE BRAKING CHARACTERISTICS OF A MODERN DOMESTIC ELECTRIC LOCOMOTIVE OF THE ERMAK SERIES

Abstract. The article is devoted to the urgent task of improving the efficiency of a modern domestic AC electric locomotive of the “Ermak” series. This is the basis for heavy-haul train traffic on heavily loaded railway lines in the Eastern Polygon (Trans-Siberian Railway and Baikal-Amur Mainline). In conditions of difficult mountainous terrain and protracted descents, the efficiency of these electric locomotives during regenerative braking plays a special role.

In the course of the study, a problem was identified that limits the braking characteristics of an electric locomotive through the control channel of a rectifier-inverter converter at the level of 3.5 zones due to the design specifics of the construction of electrical power circuits. A proposed solution allows for expanding the voltage regulation range of a rectifier-inverter converter beyond the accepted limit, up to a full four zones.

To confirm the effectiveness of the proposed method's implementation, the calculation of its operation was carried out for a modern domestic AC electric locomotive of the 2ES5K “Ermak” series. The proposed method will improve the locomotive's braking performance, increase its downhill speed, and increase the return of electrical energy to the overhead contact system.

Keywords: regenerative braking mode, braking characteristics, alternating current electric locomotive, rectifier-inverter converter, block of ballast resistors.

For citation: Samoilova, A. S. Improving the braking characteristics of a modern domestic electric locomotive of the Ermak series / A. S. Samoilova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 124–133. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_124.

Сведения об авторах

Самойлова Анастасия Сергеевна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Транспортное машиностроение»,
аспирант,
e-mail: a.s.samoilova@mail.ru

Information about the authors

Samoilova Anastasia Sergeevna

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair “Transport Engineering”,
Postgraduate Student,
e-mail: a.s.samoilova@mail.ru

П. А. Харченко

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ О ВЫПОЛНЕННЫХ ПОЕЗДКАХ

Аннотация. Рассмотрена задача повышения эффективности эксплуатации тягового подвижного состава (ТПС) на основе анализа информации о выполненных поездках, полученной из бортовых регистраторов параметров движения, микропроцессорных систем управления и диагностики, а также приборов безопасности и автоведения. Предложена постановка задачи рационального выбора модели ведения поезда и назначения локомотивной бригады или алгоритма автоматизированной системы ведения на рейс с учётом категории поезда, параметров поездной работы и приоритетности частных критериев качества управления. Показана возможность представления указанной задачи как многокритериальной задачи принятия решений и комбинаторной оптимизации. Практическая значимость подхода связана с формированием основы для автоматизированной системы поддержки принятия решений в условиях цифровизации эксплуатации локомотивов.

Ключевые слова: тяговый подвижной состав; локомотивная бригада; модель ведения поезда; выполненные поездки; многокритериальная оптимизация; безопасность движения; энергоэффективность; цифровая железная дорога.

Для цитирования: Харченко, П. А. Методический подход к повышению эффективности эксплуатации тягового подвижного состава на основе информации о выполненных поездках / П. А. Харченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 134–141. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_134.

Введение

Совершенствование технологии эксплуатации ТПС в современных условиях связано с переходом от преимущественно экспертных и нормативных подходов к использованию данных, формируемых в процессе реальной поездной работы. Информация о выполненных поездках позволяет оценивать не только факт соблюдения регламентных требований, но и особенности реализации модели ведения поезда локомотивной бригадой или автоматизированной системой управления. Особое значение приобретает задача рационального сопоставления планируемых рейсов и моделей ведения поезда с учётом категории поезда, маршрута, массы состава, профиля пути, требований безопасности, энергоэффективности, точности хода и продольной динамики. Такая постановка позволяет рассматривать управленческое решение не как разовое назначение на рейс, а как формализованную процедуру выбора наилучшего варианта из множества допустимых альтернатив.

Целью исследования является структурирование и формализация методического подхода к повышению эффективности эксплуатации ТПС на основе анализа информации о выполненных поездках, а также представление задачи выбора модели ведения поезда как многокритериальной оптимизационной задачи.

Постановка задачи выбора модели ведения поезда

Одна из приоритетных задач, направленных на совершенствование технологии и повышение эффективности эксплуатации ТПС, может быть сформулирована как задача о рациональном выборе модели ведения поезда (назначении локомотивной бригады или определённого алгоритма автоматизированной системы ведения) на рейс в зависимости от категории поезда и типа перевозимого груза на основе анализа информации о выполненных поездках.

В такой постановке она может рассматриваться как многокритериальная задача принятия решений, при которой необходимо из множества доступных моделей ведения поезда выбрать наилучшие варианты для соответствующих планируемых рейсов, обеспечив их оптимальное сопоставление с учётом заданных условий и факторов.

Дано множество вариантов моделей ведения поезда, реализуемых локомотивными бригадами (автоматизированной системой ведения):

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_N\}, i = \overline{1:N}, \quad (1)$$

где m_i – i -я модель ведения поезда; $N = |M|$ – число моделей ведения поезда.

Множество планируемых рейсов

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_L\}, j = \overline{1:L}, \quad (2)$$

где z_j – j -й планируемый рейс (категория поезда, маршрут, масса, профиль); $L = |Z|$ – число планируемых рейсов, причём $L \leq N$.

Требуется найти оптимальное соответствие (отображение):

$$h: Z \rightarrow M; h = (z_j, m_i) |_{i \in (1:N); j \in (1:L)}; h \subseteq Z \times M, \quad (3)$$

где h – искомое оптимальное соответствие или инъективное отображение множества Z на множество M ; (z_j, m_i) – множество пар «планируемый рейс – модель ведения»; $Z \times M$ – декартово произведение множеств Z и M .

Данная задача имеет множество решений N_h , которое при заданных Z и M может быть оценено как размещение из L различных элементов, выбранных из общей совокупности в N элементов:

$$N_h = A_N^L = \frac{N!}{(N-L)!}, \quad (4)$$

причём если число планируемых рейсов равно числу доступных моделей ведения $|M| = |Z|$, то N_h может быть оценено как число перестановок P_z из L элементов: $N_h = P_z = L!$

Критерии оценки моделей ведения поезда по категориям рейсов

Актуальность рассматриваемой задачи обусловлена тем, что различные категории поездов (пассажирские, грузовые, хозяйственные и др.) характеризуются своими особенностями и приоритетами по частным критериям качества управления. Например, для пассажирских поездов с организованными группами детей («детские») основное внимание уделяется безопасности, комфортности и точности соблюдения расписания. Для грузовых соединённых поездов ключевым критерием является минимизация продольно-динамических реакций для предотвращения обрыва автосцепных устройств и схода подвижного состава [1, 2].

Ранжирование критериев оценки моделей ведения поезда в зависимости от категорий поездов разработано автором и представлено в таблице. Категории поездов приведены согласно [3, 4] с использованием следующих обозначений:

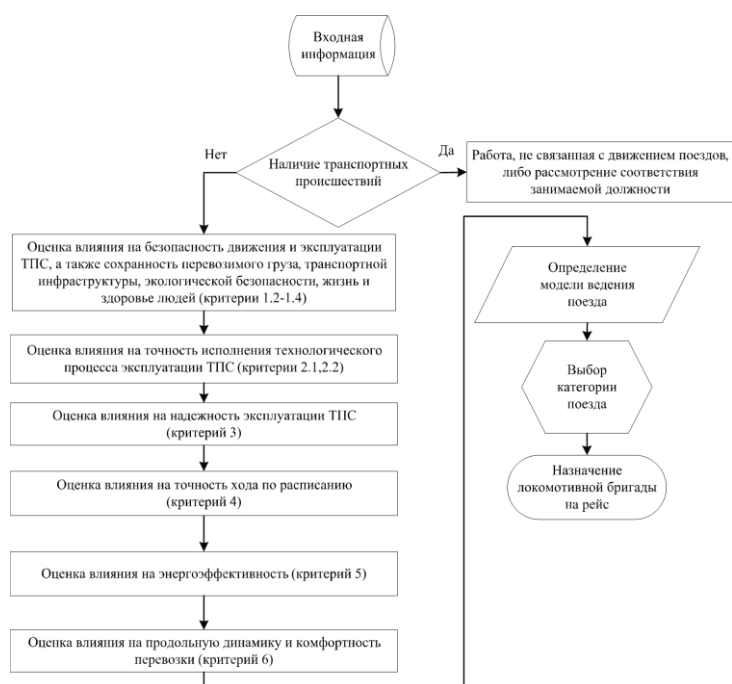
- *пассажирские поезда*: п. 1 – поезда с организованными группами детей («детские»);
- п. 2 – высокоскоростные, скоростные, скорые и пригородные; п. 3 – людские, грузопассажирские, почтово-багажные; п. 4 – прочие, в том числе пригородные (за исключением п. 1–3);
- *грузовые поезда*: гр. 1 – соединённые; гр. 2 – повышенной длины 350–520 осей; гр. 3 – тяжеловесные 8000–9000 т и более; гр. 4 – контейнерные, рефрижераторные; гр. 5 – прочие (за исключением гр. 1–4);
- *хозяйственные поезда*: хоз. 1 – восстановительные; хоз. 2 – пожарные; хоз. 3 – прочие (за исключением хоз. 1–2).

Приоритетность критериев модели ведения поезда в зависимости от категории определяется шкалой от 1 до 13, где 1 соответствует наивысшей значимости, а 13 – наименьшей. Наивысший приоритет отведён пассажирским поездам с организованными группами детей («детским»). Наименьший приоритет установлен для прочих хозяйственных поездов, в управлении которыми допускается большая гибкость.

Анализ практики назначения локомотивных бригад на конкретные рейсы в зависимости от реализуемых моделей ведения поездов в эксплуатационных локомотивных депо позволил автору на основе метода экспертных оценок сформулировать эвристический алгоритм, отражающий типичный подход, применяемый машинистами-инструкторами при управлении локомотивными бригадами (рисунок).

Ранжирование критериев модели ведения поезда в зависимости от категорий поездов

№, п/п	Критерий модели ведения поезда	Категория поезда											
		Пассажирский (п.)				Грузовой (гр.)					Хозяйственный (хоз.)		
		1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3
1.1	Транспортные происшествия	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.2	События	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1.3.1	ОТС 1-й категории	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1.3.2	ОТС 2-й категории	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1.3.3	ОТС 3-й категории	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1.4.1	Нарушения при управлении тормозами (грубые)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
1.4.2	Нарушения при управлении тормозами (прочие)	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
2.1	Технологические нарушения 1-й категории	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
2.2	Технологические нарушения 2-й категории	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
3	Нарушения режимов эксплуатации ТПС	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
4	Точность хода по расписанию	12	11	13	12	13	13	13	11	13	11	11	12
5	Энергоэффективность	13	13	11	13	12	12	12	12	12	12	12	11
6	Продольная динамика (плавность хода)	11	12	12	11	11	11	11	13	11	13	13	13



Эвристический алгоритм выбора модели ведения поезда на рейсы различных категорий поездов

Методика выбора модели ведения поезда для заданной категории поезда

Выбор модели ведения поезда осуществляется на основе последовательного анализа соответствия реализуемых режимов управления требованиям безопасности движения, энергоэффективности и обеспечения заданных параметров графика движения.

На первом этапе оценки модели ведения поезда осуществляется анализ накопленных данных о реализации моделей ведения поезда и их соответствия установленным требованиям безопасности движения. При выявлении в процессе анализа случаев крушений, аварий либо инцидентов при перевозке опасных грузов с последствиями оценивается влияние действий при управлении локомотивом на формирование небезопасной модели ведения поезда. В зависимости от характера выявленных нарушений принимается решение о временном отстранении от работы локомотивной бригады, связанной с движением поездов, направлении на внеочередную аттестацию либо рассмотрении вопроса о соответствии занимаемой должности.

На втором этапе учитываются критерии безопасности движения и эксплуатации подвижного состава (критерии 1–3), обязательные при назначении на любую категорию поезда. Третий этап включает анализ по критериям 4–6, связанным с соблюдением расписания, энергоэффективностью и продольной динамикой в процессе ведения поезда. По результатам оценки формируется интегральная характеристика качества модели ведения поезда. Модель, обеспечивающая минимальное значение штрафного показателя по критериям безопасности и имеющая максимальное соответствие требованиям конкретной категории поезда по эксплуатационным критериям, получает приоритет при назначении на соответствующий рейс. Дальнейшее развитие данного алгоритма может быть выполнено на основе решения оптимизационной задачи о выборе модели ведения поезда и назначении локомотивных бригад на рейсы [5–7].

Указанная выше формулировка задачи оптимизации является неполной, поскольку не определён критерий качества выбора h , представляемый в виде функционала (или целевой функции) J , который требуется минимизировать.

Формализация оптимизационной задачи назначения на рейсы

С учётом специфики управления локомотивом (см. таблицу), модель ведения поезда оценивается комплексом таких показателей:

$$J = \left| J_p \right|_{p=1}^q, \quad (5)$$

где J_p – частный критерий модели ведения поезда; q – общее число таких критериев.

Принято решение объединить критерии, отражающие параметры модели № 1–3 (см. таблицу), в единый комплексный показатель J_1 , характеризующий безопасность движения, технологическую стабильность и надёжность эксплуатации ТПС. Данный комплексный параметр регламентирован Правилами технической эксплуатации (ПТЭ) и основными директивными нормативными документами ОАО «РЖД».

J_2 (п. 6, см. таблицу) – определяет продольную динамику (плавность хода) подвижного состава; J_3 (п. 4, см. таблицу) – определяет точность управления с целью соблюдения расписания; J_4 (п. 5, см. таблицу) – характеризует энергоэффективность режима ведения поезда.

Введём операторы, формирующие оценки соответствующих компонентов вектора $\hat{J}$:

$$\hat{J}_p = \Psi^{(p)}(D^{(p)}), \quad p = \overline{1:q}, \quad (6)$$

где $\Psi^{(p)}$ – оператор оценки; $D^{(p)}$ – совокупность исходных данных, отражающих соблюдение следующих требований: безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС ($p = 1$), продольная динамика (плавность хода) ($p = 2$), точность хода (соблюдение расписания) ($p = 3$), энергоэффективность ведения поезда ($p = 4$); $\hat{J}$ – оценка частных функционалов J .

Данные оценки $\hat{J}$ формируются в дискретные моменты времени, соответствующие установленным контрольным периодам, таким образом, в k -й момент времени формируется оценка p -го показателя i -й модели ведения поезда:

$$\hat{J}_{ip}(k) = F^{(p)}(k)(D^{(p)}(k-1)), \quad i = \overline{1:N}, \quad p = \overline{1:q}, \quad k = \overline{1:\infty}, \quad (7)$$

где $\hat{J}_{ip}$ – частная оценка p -го показателя качества J_p i -й модели ведения поезда в k -й момент времени; $F^{(p)}$ – функция оценки p -го показателя.

Постановка задачи назначения локомотивных бригад на рейсы, в отличие от алгоритма автоматизированной системы, с учётом категории поезда приводит к необходимости рационального планирования их графика работы, адаптированного под конкретные типы поездов. Такая задача может быть

представлена в виде задачи математического программирования, относящейся к области комбинаторной оптимизации.

Для получения корректной задачи примем допущение, что функционал качества, характеризующий выбор варианта назначения локомотивной бригады на рейс из множества возможных, определяется на основе оценок деятельности локомотивной бригады за предыдущий период. Сформулированная выше задача оптимального формирования отображения h с учётом вышесказанного может быть сформулирована как задача принятия решения о рациональном назначении бригады на рейс Ω :

$$h_{(k)} = \Omega_{(k)}(D_{(k-1)}) : J(h) \rightarrow \text{extr}; J(h) = J_k^{\text{прогн}}(h_{(k)}); h_{(k)} \in H_{(k)}; \Omega_{(k)} = \langle h_{(k)}, \hat{J}_{(k)} \rangle, \quad (8)$$

где $H_{(k)}$ – множество всех вариантов назначения локомотивных бригад; J – комплексный функционал (целевая функция), характеризующий качество принятого назначения бригады на рейс как прогноз:

$$J^* = J_k^{\text{прогн}}(h_{(k)}^*) = \underbrace{\arg \min}_{h_{(k)} \in H_{(k)}; \Omega_{(k)} = \langle h_{(k)}, \hat{J}_{(k)} \rangle} \hat{J}_{(k)} \quad (9)$$

на следующий (k -й) контрольный период при условии принятия $h_{(k)}$ назначения бригады на рейс:

$$J_k^{\text{прогн}} = F(h_{(k)}, D_{(k-1)}), \quad (10)$$

где $h_{(k)} = \left\{ h_{(k)ij} \right\}_{i=1:N; j=1:L} : h_{(k)} = (z_j; m_i)$.

То есть требуется на основе оценок моделей управления подвижным составом по результатам работы N локомотивных бригад за $k-1$ -й период осуществить принятие рационального решения $h_{(k)}$ на k -й период эксплуатации. При этом прогнозируемая оценка $J = J_k^{\text{прогн}}(h_{(k)})$ формируется с помощью оператора оценки F на основе статистики D за предыдущий $k-1$ контрольный период эксплуатации.

Будем исходить из того, что множество планируемых рейсов относится к нескольким категориям:

$$Z = \left| z_j \right|_{j=1}^L : \forall z_j \in \tilde{Z} = \left(\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \dots, \tilde{z}_r, \dots, \tilde{z}_B \right), \quad (11)$$

где $\tilde{z}_r, r = \overline{1:B}$ – типы рейсов, B – их число.

С учётом вышесказанного задача об оптимальном назначении может быть сформулирована следующим образом. Задано множество локомотивных бригад M , множество рейсов Z , каждый из которых относится к одному из конкретных типов $\tilde{Z}$:

$$\forall z \in Z \exists \tilde{z} \in \tilde{Z} \Rightarrow z \rightarrow \tilde{z}. \quad (12)$$

Необходимо на основе данных о работе локомотивных бригад за предшествующий $k-1$ -й период $D_{(k-1)}$ сформировать с помощью процедуры (оператора) F прогноз оценок $\hat{J}_{(k)} = \hat{J}_{(k)p} \mid p = \overline{1:q}$ и на их основе осуществить выбор такого инъективного отображения h , которое обеспечивает оптимальное значение комплексных прогнозируемых оценок на следующем k -м периоде $J_k^{\text{прогн}}$ с учётом допущения, что прогноз оценок $\hat{J}_{(k)}$ однозначно определяется оценками на $k-1$ -м периоде:

$$J_k^{\text{прогн}}(h_{(k)}, D_{(k-1)}) \xrightarrow{\substack{h: Z \rightarrow M, \forall z \in Z \rightarrow \tilde{z}(z) \in \tilde{Z}; \\ \hat{J}_k = F(h_{(k)}, D_{(k-1)}); \\ h_{(k)} = \Omega(\hat{J}_k, D_{(k-1)}, Z, \tilde{Z})}} \text{extr.} \quad (13)$$

Здесь $\tilde{z}(z)$ является отображением $\tilde{z}: Z \rightarrow \tilde{Z}$. Для корректной формализации указанной задачи необходимо решить вспомогательную задачу вычисления прогноза:

$$\hat{J}_k = F(h_{(k)}, D_{(k-1)}). \quad (14)$$

В настоящее время сформулированная выше задача может быть представлена как задача группового принятия решения коллективом машинистов-инструкторов, когда процесс принятия решений включает несколько последовательных этапов. Экспертный подход, который используется в локомотивных депо, автором был формализован в виде процедуры принятия решения и показан в виде блок-схемы алгоритма (см. рисунок).

Таким образом, предлагаемый подход позволяет, во-первых, повысить эффективность принятия решений, поскольку при более точном учёте всех факторов в ряде случаев может быть найдено решение, дающее более высокую оценку прогноза по совокупности факторов, особенно в том случае, если имеется несколько локомотивных бригад примерно одного уровня (с примерно одинаковыми оценками их моделей ведения), а также в том случае, когда на ответственные рейсы не хватает локомотивных бригад с наиболее высоким уровнем квалификации и необходимо осуществлять назначения на соответствующие рейсы из бригад более низкого уровня квалификации, но это требуется сделать таким образом, чтобы минимизировать соответствующие риски, а во-вторых, реализация более гибкой модели позволит в дальнейшем реализовать автоматизированную систему поддержки принятия решений в рамках модели «Цифровая железная дорога» [8–10].

Оценка степени соответствия (эффективности) назначения на конкретный рейс заданного типа модели ведения поезда, реализуемой конкретной локомотивной бригадой (алгоритмом автоматизированной системой ведения), может быть определена по формуле

$$J_{ij} = F(z_j, \bar{z}(z_j), m_i), \quad (15)$$

где J_{ij} – оценка качества назначения i -й модели ведения поезда на j -й рейс типа $r = \bar{z}(z_j)$, здесь r – индекс, характеризующий тип рейса.

Тогда общая оценка

$$\hat{J}(h) = \sum_{j=1}^L J_{ij}, i=1: N, j=1: L, L \leq N \quad (16)$$

является суммой оценок по каждому назначению.

Заключение

Выполненная формализация показывает, что задача повышения эффективности эксплуатации ТПС может быть представлена как задача рационального выбора модели ведения поезда и назначения модели ведения на рейс с учётом информации о выполненных поездках. При этом использование множества моделей ведения и множества планируемых рейсов позволяет перейти от экспертного сопоставления вариантов к математически описанной процедуре выбора инъективного отображения между указанными множествами.

Предложенное ранжирование критериев по категориям поездов обеспечивает учёт различий в эксплуатационных приоритетах: для одних категорий определяющими являются безопасность и точность соблюдения расписания, для других – продольная динамика, энергоэффективность или устойчи-

вость технологического процесса. Введение комплексного функционала качества позволяет объединить частные показатели в единую оценочную модель, пригодную для последующего прогнозирования результата назначения на следующий контрольный период.

Практическая значимость рассматриваемого подхода состоит в возможности использования данных о предшествующей работе локомотивных бригад для поддержки решений машинистов-инструкторов и руководителей эксплуатационных локомотивных депо. Дальнейшее развитие предложенной модели может быть связано с созданием автоматизированной системы поддержки принятия решений, интегрированной с цифровыми средствами регистрации параметров движения, диагностики и мониторинга технического состояния локомотивов.

Список литературы

- 1 **Ромен, Ю. С.** Влияние продольных сил в поездах на опасность схода вагонов в зависимости от их загрузки / Ю. С. Ромен, Л. А. Мугинштейн, Л. И. Неверова // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3 (46). – С. 64–68. – ISSN 1994-831X.
- 2 **Мугинштейн, Л. А.** Численное моделирование продольно-динамических процессов в грузовых поездах с распределённой тягой / Л. А. Мугинштейн, И. А. Ябло, С. И. Лисеев // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2004. – № 5. – С. 143–147. – ISSN 2307-3489.
- 3 Нумерация поездов для графика движения : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 5 апреля 2014 г. № 859р (ред. от 13.10.2020). – Москва : ОАО «РЖД», 2020. – 10 с.
- 4 Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утверждены Приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250. – Воронеж : ООО «ВИННЕР», 2022. – 598 с.
- 5 **Харченко, П. А.** Повышение уровня безопасности движения поездов и энергоэффективности перевозочного процесса путём совершенствования методов и моделей поддержания компетентности персонала / П. А. Харченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (61). – С. 123–131. – ISSN 1818-5509.
- 6 **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 (97). – С. 201–210. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_201.
- 7 **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 научных трудов, Ростов-на-Дону, 01–02 марта 2018

References

- 1 **Romen, Yu. S.** Influence of longitudinal forces in trains on the risk of car derailment depending on their loading / Yu. S. Romen, L. A. Muginshtein, L. I. Neverova // Transport of the Russian Federation. – 2013. – No. 3 (46). – P. 64–68. – ISSN 1994-831X.
- 2 **Muginshtein, L. A.** Numerical simulation of longitudinal dynamic processes in freight trains with distributed traction / L. A. Muginshtein, I. A. Yabko, S. I. Liseyev // Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. – 2004. – No. 5. – P. 143–147. – ISSN 2307-3489.
- 3 Train numbering for the timetable : approved by Order of JSC Russian Railways dated April 5, 2014 No. 859r (as amended on October 13, 2020). – Moscow : JSC Russian Railways, 2020. – 10 p.
- 4 Rules for technical operation of the railways of the Russian Federation : approved by Order of the Ministry of Transport of Russia dated June 23, 2022 No. 250. – Voronezh : WINNER LLC, 2022. – 598 p.
- 5 **Kharchenko, P. A.** Improving the level of train traffic safety and energy efficiency of the transportation process by improving methods and models for maintaining personnel competence / P. A. Kharchenko // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2022. – No. 4 (61). – P. 123–131. – ISSN 1818-5509.
- 6 **Kharchenko, P. A.** Improvement of the system and technology of rolling stock operation based on the analysis of information from movement parameter recording devices, diagnostics and monitoring of the technical condition of a locomotive / P. A. Kharchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 1 (97). – P. 201–210. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_201.
- 7 **Kharchenko, P. A.** Criteria for evaluating the driver's control activity based on data from onboard movement parameter recorders / P. A. Kharchenko, K. I. Yurenko // Current problems and prospects for the development of transport, industry and economy of Russia : collection of scientific papers, Rostov-on-Don, March 1–2, 2018. Vol. 1 : Engineering Sciences.

года. Т. 1 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 91–94. – ISBN 978-5-88814-749-8.

8 **Миронова, Л. А.** Анализ концепции «Цифровая железная дорога» и перспективы её развития / Л. А. Миронова, Г. В. Колодезная // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2020. – № 2 (23). – С. 21–23. – ISSN 2415-8658.

9 **Жашкова, Т. В.** Цифровая экономика и цифровая железная дорога / Т. В. Жашкова, А. С. Гришанина // Современные информационные технологии. – 2019. – № 30. – С. 105–110. – ISSN 1815-2724.

10 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.

– Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2018. – P. 91–94. – ISBN 978-5-88814-749-8.

8 **Mironova, L. A.** Analysis of the “Digital Railway” concept and prospects for its development / L. A. Mironova, G. V. Kolodeznaya // Transport of the Asia-Pacific Region. – 2020. – No. 2 (23). – P. 21–23. – ISSN 2415-8658.

9 **Zhashkova, T. V.** Digital economy and digital railway / T. V. Zhashkova, A. S. Grishanina // Modern Information Technologies. – 2019. – No. 30. – P. 105–110. – ISSN 1815-2724.

10 Ways of developing rolling stock within the framework of railway transport digitalization / A. N. Antropov, T. A. Antropova, S. V. Bushuev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2022. – No. 4 (88). – P. 200–208. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_200.

P. A. Kharchenko

A METHODOLOGICAL APPROACH TO IMPROVING THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF TRACTION ROLLING STOCK BASED ON THE ANALYSIS OF INFORMATION ON COMPLETED TRAIN RIDES

Abstract. The article considers the problem of improving the operational efficiency of traction rolling stock based on the analysis of information on completed train rides performed by locomotive crews and obtained from on-board movement parameter recorders, microprocessor-based control and diagnostic systems, as well as safety and automatic train operation devices. The paper proposes a formulation of the problem of rational selection of a train operation model and assignment of a locomotive crew or an automated control system algorithm to a trip, taking into account the train category, train operation parameters, and the priority of particular control quality criteria. The possibility of representing this problem as a multicriteria decision-making problem and a combinatorial optimization problem is shown. The practical significance of the approach is associated with forming a basis for an automated decision support system under the conditions of digitalization of locomotive operation.

Keywords: traction rolling stock; locomotive crew; train operation model; completed train rides; multicriteria optimization; traffic safety; energy efficiency; digital railway.

For citation: Kharchenko, P. A. A methodological approach to improving the operational efficiency of traction rolling stock based on information on completed train rides / P. A. Kharchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 134–141. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_134.

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

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.2

DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_142

*А. В. Вохмянина, В. К. Некрасов***ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ
БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛАСТЕРАХ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ С УЧЁТОМ СУБКОНТРАКТАЦИИ И РИСКОВ**

Аннотация. Исследование посвящено разработке методического подхода к цифровой трансформации транспортно-логистических бизнес-процессов в региональных кластерах с учётом субконтрактных отношений и управления рисками. На примере Свердловской области анализируется влияние цифровизации на эффективность транспортно-логистических бизнес-процессов в условиях субконтракта. Методология включает системный анализ кластерных структур, экономико-математическое моделирование (линейное программирование, стохастические модели управления рисками) и корреляционно-регрессионный анализ. Установлено, что объём погрузки на Свердловской железной дороге за январь – ноябрь 2025 года составил 114,7 млн т, инвестиции в транспортно-логистический сектор в первом полугодии 2025 года превысили 50 млрд руб. Разработанная модель управления транспортно-логистическими бизнес-процессами интегрирует традиционные методы оптимизации с технологиями искусственного интеллекта, интернета вещей и блокчейн. Прогнозируемый экономический эффект оценивается в 40–60 млрд руб. ежегодной экономии логистических издержек при росте ВРП на 5–6 %.

Ключевые слова: транспортно-логистические бизнес-процессы, региональные кластеры, субконтракта, цифровая трансформация, управление рисками, экономико-математическое моделирование, Свердловская область.

Для цитирования: Вохмянина, А. В. Цифровая трансформация транспортно-логистических бизнес-процессов в региональных кластерах: моделирование с учётом субконтракта и рисков / А. В. Вохмянина, В. К. Некрасов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 142–146. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_142.

Введение

Современная трансформация российской экономики, обусловленная санкционным давлением и необходимостью импортозамещения, выдвигает региональные транспортно-логистические кластеры на передний план обеспечения конкурентоспособности промышленных регионов [1, 2]. В этих условиях транспортно-логистические бизнес-процессы (ТЛБП), организованные на принципах субконтракта, становятся не просто элементом инфраструктуры, а ключевым инструментом снижения транзакционных издержек и обеспечения гибкости цепей поставок [3].

Субконтракта в логистических кластерах представляет собой особую форму взаимодействия, при которой головной оператор координирует сеть специализированных подрядчиков, сохраняя ответственность перед конечным заказчиком. Такая модель получила широкое распространение в российских регионах благодаря высокой волатильности спроса, выраженной сезонности грузопотоков и необходимости быстрой адаптации к меняющимся внешним условиям [4]. Однако эффективность субконтрактных взаимодействий существенно ограничивается недостаточной цифровизацией логистических операций.

Свердловская область представляет собой показательный пример такой трансформации. Регион обеспечивает 11 % погрузки всей сети РЖД и обеспечил около 2,2 % ВВП России по итогам 2024 года. Примечательно, что логистический сектор впервые стал лидером по объёму инвестиций: в 2024 году капитальные вложения в транспортировку и хранение достигли рекордных 195,9 млрд руб. (21,8 % всех инвестиций региона), превысив даже металлургию. В первом полугодии 2025 года инвестиционная активность сохранилась на высоком уровне, превысив 50 млрд руб. При этом потенциал цифровизации реализуется лишь частично: только 35–40 % логистических операторов используют системы управления складом и транспортом.

Научная проблема заключается в отсутствии методических подходов к моделированию ТЛБП в региональных кластерах, которые учитывали бы одновременно специфику субконтрактации, стохастическую природу спроса и рисков, а также возможности интеграции традиционных методов с современными цифровыми технологиями [5]. Цель настоящего исследования – разработка модели цифровой трансформации ТЛБП в региональных кластерах с учётом субконтрактации и управления рисками.

Основная часть

Методологическая основа исследования построена на интеграции системного анализа, экономико-математического моделирования и статистических методов. Системный подход позволил выявить многоуровневую структуру транспортно-логистического кластера Свердловской области. В центре кластера находится ядро – крупные терминальные комплексы во главе с ТЛЦ «Уральский» и ведущие логистические операторы [6, 8]. Вокруг ядра формируется сеть специализированных поставщиков услуг: транспортные компании, складские операторы, таможенные брокеры.

Для формализации процесса оптимизации ТЛБП в условиях субконтрактации была разработана модель линейного программирования, минимизирующая совокупные логистические издержки с учётом мощностных ограничений участников кластера [4]:

$$\min Z(X, Y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^n f_j y_j$$

при ограничениях:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq s_i, \quad i = 1, \dots, m;$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq d_j, \quad j = 1, \dots, n;$$

$$x_{ij} \leq M * y_j, \quad \forall i, j;$$

$$x_{ij} \geq 0; \quad y_j \in \{0, 1\},$$

где c_{ij} – удельные транспортные затраты от поставщика i к потребителю j ; x_{ij} – объём перевозок; f_j – фиксированные издержки привлечения субконтрактора j ; y_j – бинарная переменная выбора субконтрактора (1 – привлекается, 0 – нет); s_i – мощность поставщика; d_j – спрос потребителя.

Ключевой особенностью модели является явный учёт субконтрактации через бинарные переменные y_j и фиксированные издержки f_j . Это отражает реальную практику, когда привлечение субконтрактора сопряжено с определёнными транзакционными издержками (поиск, переговоры, контроль), но при этом позволяет гибко масштабировать операции в зависимости от текущего спроса [9].

Стохастическая природа спроса и внешние риски учитываются через модель управления рисками, где целевая функция включает не только математическое ожидание затрат, но и их дисперсию:

$$R(Z(X, Y)) = E[Z(X, Y)] + \lambda \text{Var}[Z(X, Y)],$$

где $E[Z(X, Y)]$ – математическое ожидание логистических затрат; $\text{Var}[Z(X, Y)]$ – дисперсия затрат; λ – коэффициент несклонности к риску.

При этом стохастичность процессов предъявления грузов к перевозке может быть описана случайной величиной (например, объёмом мелкой отправки), для которой в рамках дальнейших исследований предполагается определение закона распределения на основе статистических данных.

Коэффициент λ характеризует степень несклонности к риску лица, принимающего решения. Для Свердловской области на основе опроса 25 логистических операторов установлено значение $\lambda = 0,3$, что отражает умеренную несклонность к риску, обусловленную наличием государственной поддержки и диверсификацией клиентской базы.

Для комплексной оценки рисков разработана формула определения интегральной величины риска

$$K_{\text{риск}} = \sum_{k=1}^K w_k * p_k * u_k,$$

где $k = \overline{1; K}$ – количество групп риска; w_k – весовой коэффициент значимости; p_k – вероятность реализации риска k ; u_k – ущерб от реализации.

Для транспортно-логистического кластера Свердловской области идентифицировано пять групп рисков (вероятности и ущербы определены на основе экспертных оценок авторов): инфраструктурные (перегрузка магистралей – вероятность 0,4, ущерб 15–20 % времени доставки), климатические (снегопады, паводки – вероятность 0,3, потери >100 млн руб. ежегодно), санкционные (рост стоимости оборудования на 20–30 % – вероятность 0,8), операционные (сбои информационных систем – вероятность 0,2), рыночные (волатильность спроса – вероятность 0,5).

Для установления количественных зависимостей между уровнем цифровизации и показателями регионального развития применялся корреляционно-регрессионный анализ. Построена модель

$$\text{ВРП} = \beta_0 + \beta_1 * \text{ГРУЗОБОРОТ} + \beta_2 * \text{ЦИФРОВИЗАЦИЯ} + \beta_3 * \text{ИНВЕСТИЦИИ} + \varepsilon.$$

На основе панельных данных по 10 промышленным регионам России за 2020–2025 годы установлено, что увеличение доли цифровизированных логистических операторов на 10 процентных пунктов коррелирует с ростом ВРП на 0,8–1,2 % при контроле прочих факторов ($\beta_2 = 0,095$, $p < 0,05$) [7]. Эмпирическая база исследования включает официальную статистику Росстата (ВРП Свердловской области 4,4 трлн руб. в 2024 году), данные РЖД о погрузке на Свердловской железной дороге (114,7 млн т за январь – ноябрь 2025 года), материалы Правительства Свердловской области об инвестициях в транспортно-логистический сектор.

Сравнительный анализ транспортно-логистических систем крупнейших промышленных регионов России представлен в таблице.

Сравнительные показатели транспортно-логистических систем

Показатель	Свердловская область	Новосибирская область	Татарстан
Погрузка железной дороги, млн т (январь – ноябрь 2025/2024)	114,7	~230 (ЗСЖД)	~16
Инвестиции в логистику, млрд руб. (Н1 2025)	>50	н/д	н/д
Доля транспорта в ВРП, %	7,5	14–15	5,6
Уровень цифровизации, %	35–40	~40	~35
ВРП, трлн руб. (2024)	4,4	~2,5	>5,0

Примечание. ЗСЖД – Западно-Сибирская железная дорога (обслуживает несколько регионов).

Экономическая оценка эффектов проведена на основе консервативного сценария достижения 50 % логистических операторов уровня цифровизации в течение 5 лет при инвестициях 150 млрд руб. По результатам моделирования прогнозируется сокращение совокупных логистических издержек на 15–20 %, что при текущей оценке в 10 % ВРП (около 400 млрд руб.) даёт экономию 40–60 млрд руб. ежегодно; повышение пропускной способности ТЛЦ на 15–20 % без капитальных затрат на расширение; снижение экологической нагрузки на 30–40 % за счёт оптимизации маршрутов; рост ВРП на 5–6 % за счёт мультипликативного эффекта снижения транзакционных издержек.

Полученные результаты подтверждают критическую роль цифровой трансформации ТЛБП для повышения эффективности региональных кластеров в условиях субконтрактации. Интеграция стохастического компонента через модель минимизации риска $R(Z(X,Y))$, учитывающую математическое ожидание и дисперсию логистических затрат $(Z(X,Y)) = E[Z(X,Y)] + \lambda \text{Var}[Z(X,Y)]$, позволяет учесть неопределённость спроса и риски. Доминирование санкционных (вклад 0,18 в $K_{\text{риск}}$) и инфраструктурных (0,12) рисков указывает на приоритетные направления государственной политики [10].

Сравнительный анализ показывает, что Свердловская область сохраняет стратегическую роль крупнейшего транспортно-логистического узла Урала, обеспечивая стабильную долю в 11 % общесетевой погрузки РЖД. При этом необходимо отметить, что абсолютные объёмы погрузки демонстрируют отрицательную динамику: снижение с 137,5 млн т в 2024 году до прогнозируемых 125 млн т в 2025 году (–9 %). Однако данный тренд отражает общесистемные процессы на сети РЖД (падение погрузки на 4,1 % в 2024 году), обусловленные структурными изменениями в российской экономике – сокращением добычи угля (–5,4 %), производства строительных материалов (–14,5 %) и чёрных металлов (–9,3 %). В этих условиях цифровая трансформация ТЛБП приобретает особую актуальность: при

снижении валовых объемов перевозок задача оптимизации логистических издержек и повышения эффективности субконтрактных взаимодействий становится критически важной для сохранения конкурентоспособности региональной экономики.

Выводы

Проведённое исследование подтверждает ключевую роль цифровой трансформации ТЛБП в обеспечении конкурентоспособности региональных кластеров при субконтрактации. Разработанная модель интегрирует традиционные методы оптимизации с современными технологиями искусственного интеллекта, интернета вещей и блокчейн. На примере Свердловской области выявлен диспаритет между масштабами инвестиций в логистическую инфраструктуру (более 50 млрд руб. в первом полугодии 2025 года) и уровнем цифровизации операционных процессов (только 35–40 % операторов используют специализированные системы управления). Прогнозируемый экономический эффект от полномасштабного внедрения разработанной модели оценивается в 40–60 млрд руб. ежегодной экономии при росте ВРП на 5–6 %. Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной модели для совершенствования региональной кластерной политики и оптимизации субконтрактных отношений между участниками логистических кластеров.

Список литературы

- 1 **Портер, М.** Конкурентная стратегия: методика анализа отраслей и конкурентов / М. Портер. – 6-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2023. – 454 с. – ISBN 978-5-9614-8101-9.
- 2 **Меньшенина, И. Г.** Кластеризация как инструмент повышения конкурентоспособности региональной экономики / И. Г. Меньшенина, Л. М. Капустина. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2020. – 246 с. – ISBN 978-5-7996-3086-2.
- 3 **Сергеев, В. И.** Корпоративная логистика в вопросах и ответах : монография / под общей и научной редакцией В. И. Сергеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ИНФРА-М, 2023. – 634 с. – ISBN 978-5-16-004556-6.
- 4 **Бродетский, Г. Л.** Экономико-математические методы и модели в логистике. Процедуры оптимизации : учебник / Г. Л. Бродетский, Д. А. Гусев. – Москва : Академия, 2014. – 288 с. – ISBN 978-5-4468-0660-7.
- 5 **Кристофер, М.** Логистика и управление цепями поставок : учебное пособие / М. Кристофер ; [перевод с английского В. И. Кузина]. – Санкт-Петербург : Питер, 2004. – 315 с. – ISBN 978-5-94723-168-9.
- 6 **Дыбская, В. В.** Логистика складирования : учебник / В. В. Дыбская. – Москва : ИНФРА-М, 2023. – 559 с. – ISBN 978-5-16-003716-5.
- 7 **Левин, Б. А.** Цифровая трансформация транспортно-логистических систем / Б. А. Левин, А. В. Галабурда // Вестник транспорта. – 2022. – № 5. – С. 8–13. – ISSN 0201-727X.
- 8 **Числов, О. Н.** Методы и принципы интеллектуализации при управлении терминально-складской системой транспортного узла / О. Н. Числов, В. В. Трапенов, А. А. Зайченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (81). – С. 143–152. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_104.

References

- 1 **Porter, M.** Competitive strategy : a methodology for analyzing industries and competitors / M. Porter. – 6th ed. – Moscow : Alpina Publisher, 2023. – 454 p. – ISBN 978-5-9614-8101-9.
- 2 **Menshenina, I. G.** Clustering as a tool for improving the competitiveness of the regional economy / I. G. Menshenina, L. M. Kapustina. – Ekaterinburg : Ural University Publishing House, 2020. – 246 p. – ISBN 978-5-7996-3086-2.
- 3 **Sergeev, V. I.** Corporate logistics in questions and answers : monograph / ed. by Prof. V. I. Sergeev. – 2nd ed. – Moscow : INFRA-M, 2023. – 634 p. – ISBN 978-5-16-004556-6.
- 4 **Brodetsky, G. L.** Economic and mathematical methods and models in logistics. Optimization procedures : a textbook / G. L. Brodetsky, D. A. Gusev. – Moscow : Academy, 2014. – 288 p. – ISBN 978-5-4468-0660-7.
- 5 **Christopher, M.** Logistics and supply chain management : a textbook / M. Christopher ; [transl. from English by V. I. Kuzin]. – Saint Petersburg : Piter, 2004. – 315 p. – ISBN 978-5-94723-168-9.
- 6 **Dybskaya, V. V.** Warehousing logistics : a textbook / V. V. Dybskaya. – Moscow : INFRA-M, 2023. – 559 p. – ISBN 978-5-16-003716-5.
- 7 **Levin, B. A.** Digital transformation of transport and logistics systems / B. A. Levin, A. V. Galaburda // Journal of Transport. – 2022. – No. 5. – P. 8–13. – ISSN 0201-727X.
- 8 **Chislov, O. N.** Methods and principles of intellectualization in the management of the terminal-warehouse system of a transport hub / O. N. Chislov, V. V. Trapenov, A. A. Zaychenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (81). – P. 143–152. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_104.

9 Григорьев, М. Н. Логистика : учебник для вузов / М. Н. Григорьев, А. П. Долгов, С. А. Уваров. – 5-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2024. – 475 с. – ISBN 978-5-534-15610-5.

10 Проценко, О. Д. Логистика и управление цепями поставок : учебник / О. Д. Проценко, И. А. Проценко. – Москва : Юрайт, 2023. – 272 с. – ISBN 978-5-534-14699-1.

9 Grigoriev, M. N. Logistics : a textbook for universities / M. N. Grigoriev, A. P. Dolgov, S. A. Uvarov. – 5th ed., corrected. and enlarged. – Moscow : Yurait Publishing House, 2024. – 475 p. – ISBN 978-5-534-15610-5.

10 Protsenko, O. D. Logistics and supply chain management : a textbook / O. D. Protsenko, I. A. Protsenko. – Moscow : Yurait, 2023. – 272 p. – ISBN 978-5-534-14699-1.

A. V. Vohmyanina, V. K. Nekrasov

**DIGITAL TRANSFORMATION OF TRANSPORT AND LOGISTICS BUSINESS
PROCESSES IN REGIONAL CLUSTERS:
MODELING WITH SUBCONTRACTING AND RISK MANAGEMENT**

Abstract. The study is devoted to the development of a methodological approach to the digital transformation of transport and logistics business processes in regional clusters, taking into account subcontracting relationships and risk management. Using the Sverdlovsk region as an example, the impact of digitalization on the efficiency of transport and logistics business processes under subcontracting conditions is analyzed. The methodology includes systematic analysis of cluster structures, economic and mathematical modeling (linear programming, stochastic risk management models) and correlation-regression analysis. The results demonstrate that the volume of loading on the Sverdlovsk Railway for January-November 2025 amounted to 114.7 million tons, investments in the transport and logistics sector in the first half of 2025 exceeded 50 billion rubles. The developed hybrid model for managing transport and logistics business processes integrates traditional optimization methods with artificial intelligence technologies, the Internet of Things and blockchain. The projected economic effect is estimated at 40-60 billion rubles in annual savings in logistics costs with GRP growth of 5-6%.

Keywords: transport and logistics business processes, regional clusters, subcontracting, digital transformation, risk management, economic and mathematical modeling, Sverdlovsk Region.

For citation: Vohmyanina, A. V. Digital transformation of transport and logistics business processes in regional clusters: modeling with subcontracting and risk management / A. V. Vohmyanina, V. K. Nekrasov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 142–146. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_2_142.

Сведения об авторах

Вохмянина Анна Владимировна

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Мировая экономика и логистика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: AVVohmyanina@usurt.ru

Некрасов Виталий Константинович

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Мировая экономика и логистика»,
аспирант,
e-mail: macmalik@mail.ru

Information about the authors

Vokhmyanina Anna Vladimirovna

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair “World Economy and Logistics”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: AVVohmyanina@usurt.ru

Nekrasov Vitalii Konstantinovich

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair “World Economy and Logistics”,
Postgraduate Student,
e-mail: macmalik@mail.ru

А. А. Гордиенко, И. А. Кощеев

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ СПОСОБОВ РАЗМЕЩЕНИЯ И КРЕПЛЕНИЯ ГРУЗОВ В ВАГОНАХ

Аннотация. Рассмотрены методы определения основных показателей надежности, применимых для оценки способов размещения и крепления грузов в вагонах. Приведены примеры расчетов определения показателей надежности утвержденных способов размещения и крепления грузов на основе статистических данных по выявленным коммерческим неисправностям и отказам. Предложен инструмент мониторинга надежности способа размещения и крепления груза на основании результатов перевозки. На основании обработанных статистических данных с использованием основных показателей надежности предлагается выносить заключение о дальнейшем продлении срока действия и переводе в сетевой формат местных и непредусмотренных технических условий.

Ключевые слова: надежность, груз, способ размещения и крепления груза, показатель, коммерческая неисправность, отказ, отцепка, безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость.

Для цитирования: Гордиенко, А. А. Показатели надежности способов размещения и крепления грузов в вагонах / А. А. Гордиенко, И. А. Кощеев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 147–155. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_147.

Введение

В хозяйстве грузовой и коммерческой работы одним из ключевых вопросов является контроль за обеспечением надежности используемых способов размещения и крепления грузов, которые напрямую влияют на безопасность движения поездов.

В настоящее время анализ надежности способов размещения и крепления грузов производится без вычисления показателей надежности в процессе их эксплуатации, и контроль носит эпизодический характер.

Заключение об удовлетворительном уровне надежности способов размещения и крепления грузов зачастую определяется по одному показателю – частота возникновения коммерческих неисправностей, требующих отцепки.

Однако данный подход не позволяет учесть все возможные показатели надежности способа размещения и крепления груза: среднее расстояние, пройденное до возникновения коммерческой неисправности, отказа, вероятность восстановления погрузки, среднее время восстановления погрузки на пункте исправления коммерческих неисправностей (ПИКН) и т.д. Вследствие чего отсутствует возможность выявления закономерностей возникновения коммерческих неисправностей и своевременных предложений по внесению изменений в утвержденные способы размещения и крепления грузов.

Основная часть

В [1] определено, что под надежностью способов размещения и крепления грузов понимается такой способ размещения и крепления, который гарантирует сохранность груза и безопасность движения на всем пути следования груза. Проблема повышения надежности способов размещения и крепления грузов в настоящее время актуальна, что доказано в работах [2, 3].

С учетом понятий Межгосударственного стандарта ГОСТ Р 27.102-2021 [4] предлагается к применению номенклатура показателей (рис. 1), характеризующих свойства надежности способов размещения и крепления грузов.

Как видно из рис. 1, показатели разделены на четыре категории «Безотказность», «Ремонтпригодность», «Долговечность» и «Сохраняемость».

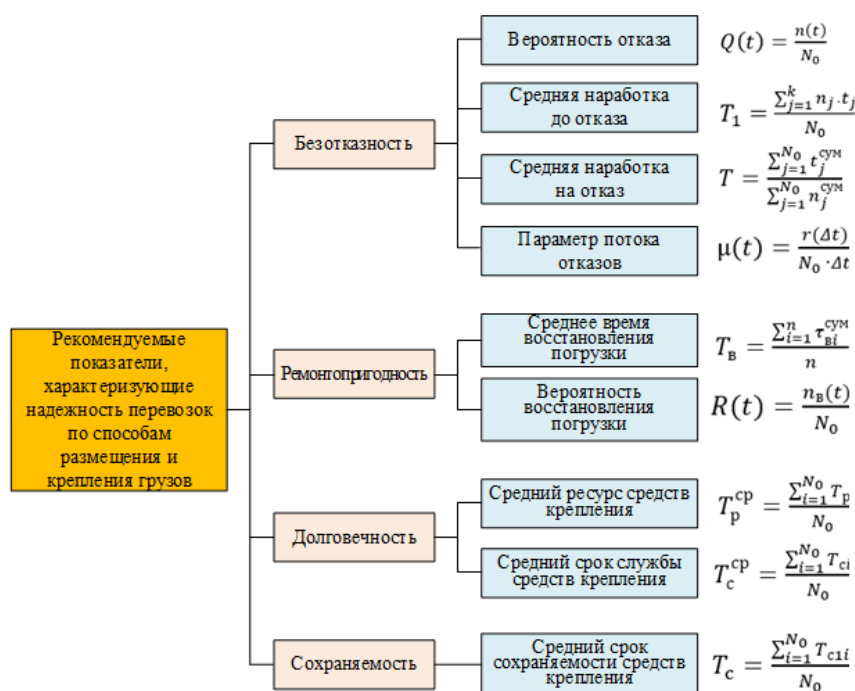


Рис. 1. Показатели, характеризующие надежность перевозок по способам размещения и крепления грузов

Безотказность способа размещения и крепления груза в вагоне определяется такими факторами, как качество применяемых средств крепления, достигнутый качественный уровень разработки способа погрузки, стабильность качества погрузочных работ, подготовка вагона и груза к перевозке, качество соблюдения технологической дисциплины на всех этапах перевозки, а также полнота соответствия погрузки груза утвержденному способу размещения и крепления [5, 6].

Рассмотрим основные показатели безотказности, которые могут использоваться для оценки надежности способов размещения и крепления грузов в вагонах.

Вероятность безотказной перевозки по способу размещения и крепления груза – вероятность того, что в пределах заданного интервала времени отцепки вагонов с коммерческими неисправностями не возникнут.

Показатель вероятности безотказной работы определяется статистической оценкой:

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad (1)$$

где N_0 – количество отправленных вагонов в соответствии со способом погрузки, ваг.;

$n(t)$ – количество отцепленных вагонов с коммерческими неисправностями за определенный период времени t .

На практике более удобной характеристикой безотказности, как правило, является вероятность отказа способа размещения и крепления груза:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (2)$$

Вероятность отказа $Q(t)$ – это вероятность, что в течение заданной наработки произойдет отцепка вагона с коммерческой неисправностью.

Под наработкой следует понимать продолжительность перевозок по способу размещения и крепления грузов (в километрах, количестве перевозок, днях, годах).

Приведем пример расчета вышеуказанных показателей. На практике с учетом данных показателей проводятся анализы, одним из которых является сравнительный анализ надежности способов

размещения и крепления, погруженных с применением проволочного и текстильного реквизита крепления [7]. Данные для проведения анализа показателей безотказности собираются специалистами в информационных системах ОАО «РЖД» [8].

В табл. 1 приведены результаты сравнительного анализа надежности способов размещения и крепления пиломатериалов с применением текстильных лент и проволочного реквизита крепления, выполненного по итогам погрузки на Свердловской железной дороге в 2025 году.

Таблица 1

Пример расчета показателей безотказности для способов размещения и крепления грузов

Способы размещения и крепления лесных грузов с текстильными лентами				Способы размещения и крепления лесных грузов с проволочным креплением			
Отправлено, ваг.	Отцеплено, ваг.	$P(t)$	$Q(t)$	Отправлено, ваг.	Отцеплено, ваг.	$P(t)$	$Q(t)$
6915	39	0,994	0,006	2386	18	0,992	0,008

Таким образом, из табл. 1 видно, что вероятность безотказной работы способов размещения и крепления с использованием текстильных лент незначительно превышает традиционные способы.

Средняя наработка перевозки по способу размещения и крепления грузов до отказа T_1 – математическое ожидание наработки до отказа (ГОСТ Р 27.102-2021[4]):

$$T_1 = \frac{\sum_{j=1}^k n_j \cdot t_j}{N_0}, \quad (3)$$

где j – расстояние от станции отправления до станции обнаружения коммерческой неисправности, отказа;

k – интервал наработки;

n_j – количество вагонов, отцепленных с коммерческими неисправностями, с отказами, погруженными по данному способу размещения и крепления грузов в интервале наработки;

t_j – продолжительность j -го интервала.

Рассмотрим на примере перевозки по НТУ-28-03-032-17.02.19. В течение срока действия НТУ по нему отправлено 500 вагонов. В результате анализа отцепок вагонов с коммерческими неисправностями и отказов получены данные, сформированные в табл. 2.

Таблица 2

Распределение количества отцепок вагонов с коммерческими неисправностями и отказов по рассматриваемым НТУ в j -м интервале наработки

Интервал наработки Δt_i , км	Количество отцепок вагонов с коммерческими неисправностями и отказов n_i
0–1000	5
1000–2000	12
2000–3000	10
3000–4000	2
4000–5000	1
5000–6000	0

По формуле (3) найдем среднюю наработку до отказа:

$$T_1 = \frac{5 \cdot 500 + 12 \cdot 1500 + 10 \cdot 2500 + 2 \cdot 3500 + 1 \cdot 4500 + 0 \cdot 5500}{500} = 114 \text{ км.}$$

Средняя наработка перевозки по способу размещения и крепления грузов на отказ T – отношение суммарной наработки к математическому ожиданию количества отцепок вагонов с коммерческими неисправностями, отказов в течение этой наработки [4]:

$$T = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} t_j^{сум}}{\sum_{j=1}^{N_0} n_j^{сум}}, \quad (4)$$

где $t_j^{сум}$ – суммарная наработка (суммарный пробег, пройденный вагоном с грузом в течении срока действия способа размещения и крепления грузов, км);

$n_j^{сум}$ – количество вагонов, отцепленных с коммерческими неисправностями, с отказами, погруженными по данному способу размещения и крепления грузов в течение его срока действия.

Рассмотрим пример. За период действия НТУ-28-03-032-17.02.19 произведено 30 отцепок вагонов с коммерческими неисправностями, отказов, а суммарная наработка составила 10 млн км.

По формуле (4) средняя наработка перевозки по способу размещения и крепления грузов на отказ составила:

$$T = \frac{10000000}{30} = 333 \text{ тыс. км.}$$

Параметр потока отказов $\mu(t)$ – предел отношения вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта за достаточно малый интервал времени к продолжительности этого интервала, стремящейся к нулю [4]:

$$\mu(t) = \frac{r(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (5)$$

где $r(\Delta t)$ – количество отцепок вагонов с коммерческими неисправностями, отказов в интервале наработки Δt .

В физическом смысле параметр потока отказов для перевозок по способам размещения и крепления грузов – это скорость возникновения отцепок вагонов с коммерческими неисправностями, отказов.

Рассмотрим на примере перевозки по НТУ-28-03.032-17.02.19. Произведем измерение количества отцепок вагонов с коммерческими неисправностями и отказов в течение каждой тысячи километров ($\Delta t = 1000$ км). Их устранение производится на станциях. Измерения произведем в течение срока действия НТУ, т.е. 5 лет. Схема измерений приведена на рис. 2.

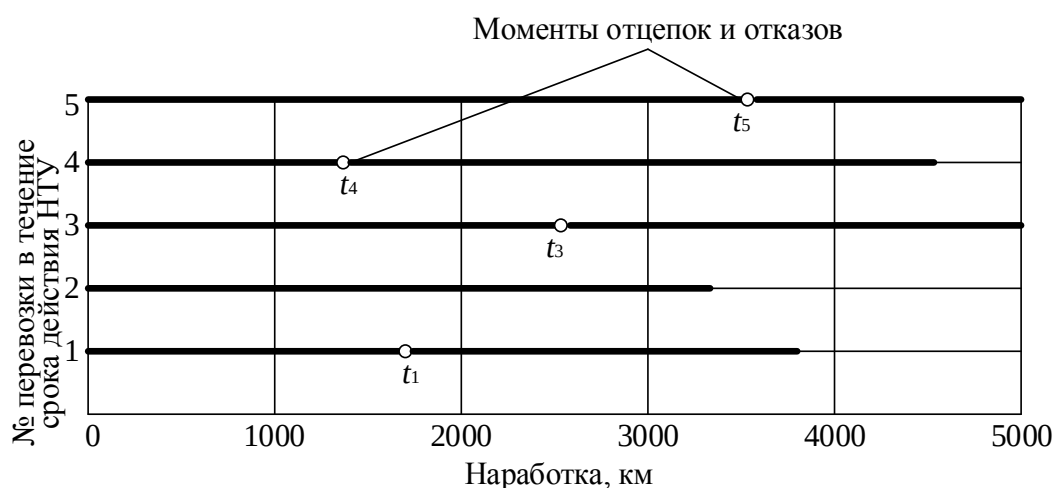


Рис. 2. Схема для расчета параметра потока отказов

Требуется определить параметр потока отказов в интервале наработки от 2000 до 3000 км: на рис. 2 в заданном интервале количество отцепленных вагонов с коммерческими неисправностями и отказами составило 1 вагон ($r(\Delta t) = 1$).

Для середины рассматриваемого интервала параметр потока отказов найдем по формуле (5):

$$\mu(2500) = \frac{1}{5 \cdot 1000} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ км.}$$

Для дальнейшего описания показателей надежности большое значение имеет правильное отношение вагонов с погруженными грузами по способам размещения и крепления грузов к видам объектов исследования теории надежности: ремонтируемым и неремонтируемым, восстанавливаемым и невосстанавливаемым.

В процессе перевозки под воздействием динамических воздействий система «вагон – крепление – груз» [9] теряет работоспособность, погрузку необходимо восстанавливать, для этого производят устранения коммерческих неисправностей и отказов. Поэтому вагоны с грузами по способам размещения и крепления относятся к ремонтируемым объектам.

Ремонтируемые объекты, например, многооборотные крепления, при определенной наработке: когда их параметры не удовлетворяют установленным технической документацией, или проволоочный реквизит крепления при обрыве отдельных нитей, – становятся неремонтируемыми.

Как известно, ремонтируемые объекты делятся на восстанавливаемые и невосстанавливаемые [10]. Вагон с грузом может быть восстанавливаемым или невосстанавливаемым в зависимости от условий возникновения коммерческих неисправностей и отказов. При их обнаружении на станциях с пунктами коммерческого осмотра (ПКО), постах коммерческой безопасности (ПКБ), пунктах исправления коммерческих неисправностей (ПИКН) вагон с грузом может приниматься как ремонтируемый восстанавливаемый объект – восстанавливаемый до соответствия способу размещения и крепления, на промежуточных станциях или перегоне – как ремонтируемый невосстанавливаемый объект [11]. Невосстанавливаемость определяется ограниченным временем восстановления, а также отсутствием необходимых условий и средств восстановления.

Груз, сместившийся в пути следования, на станциях с ПКО, ПИКН – восстанавливаемый объект, а на промежуточной станции при обнаружении – невосстанавливаемый. Что обусловлено рядом причин: ограниченное время стоянки поезда, отсутствие базы восстановления. В таких случаях, при возможности, производится частичное восстановление способа размещения и крепления груза. Например, производят натяжение ослабшего проволоочного реквизита крепления.

Показатели ремонтпригодности показывают приспособленность вагона с грузом, погруженным по способу размещения и крепления груза, к устранению коммерческих неисправностей.

Принято, что к показателям ремонтпригодности, характеризующим перевозки по способам размещения и крепления грузов в вагонах, относят:

- среднее время восстановления погрузки после возникновения коммерческой неисправности, отказа T_e – математическое ожидание времени восстановления погрузки для безопасной перевозки;
- вероятность восстановления погрузки $R(t)$ – вероятность того, что время восстановления погрузки до безопасного уровня не превысит заданное значение.

Среднее время восстановления погрузки после возникновения коммерческой неисправности, отказа определяется из следующей формулы:

$$T_e = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{ei}^{сум}}{n}, \quad (6)$$

где $\tau_{ei}^{сум}$ – суммарное время устранения коммерческих неисправностей, отказов вагонов с грузами, погруженными по i -му способу размещения и крепления грузов, за рассматриваемый период;

n – общее количество коммерческих неисправностей, отказов за рассматриваемый период.

Рассмотрим перевозку по НТУ-30.04-025.18.05.18. В течение срока действия НТУ выявлено 5 коммерческих неисправностей и отказов с суммарным временем устранения 54 ч.

По формуле (6) найдем среднее время восстановления погрузки:

$$T_e = \frac{54}{5} = 10,8 \text{ ч.}$$

Вероятность восстановления погрузки $R(t)$ характеризуется следующим выражением:

$$R(t) = \frac{n_e(t)}{N_0}, \quad (7)$$

где $n_e(t)$ – количество вагонов с грузами, подверженными устранению коммерческих неисправностей, отказов в период от 0 до t .

Рассмотрим на примере перевозки по НТУ-30-04-025-18.05.18. В течение срока действия НТУ по нему отцеплено 5 вагонов с коммерческими неисправностями, исправление которых производилось на ПИКН. Общее количество вагонов за срок действия НТУ составило 50 вагонов.

Тогда по формуле (7) получим:

$$R(t) = \frac{5}{50} = 0,1.$$

Показатели долговечности характеризуют потери работоспособности многооборотных средств крепления в процессе перевозки. Будем рассматривать средние показатели:

- средний ресурс средств крепления;
- средний срок службы средств крепления.

Средний ресурс средств крепления T_p^{cp} – математическое ожидание ресурса [4]:

$$T_p^{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} T_{pi}}{N_0}, \quad (8)$$

где T_{pi} – ресурс многооборотного средства крепления, который используется при i -й перевозке по способу размещения и крепления груза, км.

Под ресурсом здесь будем понимать суммарную наработку от начала перевозок с использованием многооборотных средств крепления или их возобновления после ремонта до момента достижения средствами крепления предельного состояния.

Также рассмотрим понятие назначенный срок службы многооборотного средства крепления – это календарная продолжительность, установленная в технической документации, при достижении которой эксплуатация многооборотного крепления должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Сохраняемость будем характеризовать средним сроком сохраняемости средств крепления – математическое ожидание срока сохраняемости (календарная продолжительность хранения многооборотного средства крепления, использования при перевозках одноразовых и многооборотных средств крепления, в течение которых значения параметров, характеризующих способность средств крепления обеспечивать безопасную перевозку грузов, остаются в пределах, установленных в документации):

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_{ci}}{N_0}, \quad (9)$$

где t_{ci} – срок сохраняемости средства крепления, который используется при i -й перевозке по способу размещения и крепления груза, мес.

В качестве инструмента в процессе мониторинга может использоваться предлагаемая сводная форма (рис. 3), которая для примера заполнена данными для способа размещения и крепления груза с многооборотными средствами крепления по результатам перевозки в течение года с момента его утверждения.

Форма, приведенная на рис. 3, разработана с учетом формул (1–9) и позволяет при вводе данных по результатам перевозок по способу размещения и крепления грузов оперативно получить его показатели надежности. В зависимости от вида способа погрузки и необходимости анализа отдельных показателей сводная форма может иметь полный или усеченный вид.

Безотказность			
t , сут.	$N(t)$, ваг.	$n(t)$, ваг.	
365	490	30	
1. Вероятность безотказной работы, вероятность отказа			
$P(t)$	$Q(t)$		
0,939	0,061		
2. Средняя наработка до отказа			
Δt_j , км	n_j , ваг.	T_j , км	
0 - 1000	5	116,327	
1000 - 2000	12		
2000 - 3000	10		
3000 - 4000	2		
4000 - 5000	1		
5000 - 6000	0		
3. Средняя наработка на отказ			
$t_{\text{ср}}^{\text{БЗ}}$, км	T , км		
10000000	333333		
4. Параметр потока отказов			
t , км	Δt , км	$r(\Delta t)$, ваг.	$\mu(t)$, 1/км
1500	1000	12	24,49
Ремонтопригодность			
1. Среднее время восстановления погрузки			
$t_{\text{в.ср}}^{\text{РП}}$, ч	$T_{\text{в}}$, ч		
290	9,667		
2. Вероятность восстановления погрузки			
n , ваг.	$R(t)$		
29	0,059		
Долговечность			
1. Средний ресурс средств крепления			
$T_{\text{п}}$, км	$T_{\text{ср}}^{\text{Д}}$, км		
5000000	10204,082		
2. Средний срок службы средств крепления			
$T_{\text{с}}$, мес.	$T_{\text{ср}}^{\text{Д}}$, мес.		
5750	11,735		
Сохраняемость			
Средний срок сохраняемости средств крепления			
$T_{\text{сх}}$, мес.	$T_{\text{ср}}^{\text{С}}$, мес.		
5800	11,837		

Рис. 3. Сводная форма для определения показателей надежности способов размещения и крепления грузов

Выводы

1 В статье предложен новый подход к анализу способов размещения и крепления груза на основе определения показателей надежности, используемых в теории надежности. Показатели разделены на четыре группы: «Безотказность», «Ремонтопригодность», «Долговечность» и «Сохраняемость».

2 Приведено математическое описание показателей надежности. На основании опыта использования утвержденных способов показаны примеры расчета показателей их надежности.

3 Предложен инструмент мониторинга надежности способов размещения и крепления груза в процессе их эксплуатации на примере сводной формы, с помощью которой предлагается отслеживать надежность утвержденных способов по результатам перевозки. Предложенный инструмент позволит получить статистические данные о наиболее и наименее надежных способах размещения и крепления груза. В дальнейшем накопленные статистические данные предполагается использовать как подтверждающий материал безопасности и надежности способа размещения и крепления груза при продлении срока действия утвержденных МТУ и НТУ, а также отбора наиболее надежных способов для перевода в сетевые МТУ.

Список литературы

- 1 Гордиенко, А. А. О надежности способов размещения и крепления грузов при перевозке железнодорожным транспортом / А. А. Гордиенко // Транспорт : наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2023. – № 9. – С. 9–16. – DOI 10.36535/0236-1914-2023-09-2.
- 2 Гордиенко, А. А. Исследование коммерческих неисправностей на железнодорожном транспорте / А. А. Гордиенко // Транспорт : наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2023. – № 1. – С. 13–18. – DOI 10.36535/0236-1914-2023-01-3.

References

- 1 Gordienko, A. A. On the reliability of methods for placing and securing cargo during transportation by rail / A. A. Gordienko // Transport : science, equipment, management. Scientific information collection. – 2023. – No. 9. – P. 9–16. – DOI 10.36535/0236-1914-2023-09-2.
- 2 Gordienko, A. A. Investigation of commercial faults in railway transport / A. A. Gordienko // Transport : science, equipment, management. Scientific information collection. – 2023. – No. 1. – P. 13–18. – DOI 10.36535/0236-1914-2023-01-3.

3 **Гордиенко, А. А.** О проблемах и методах повышения надежности способов размещения и крепления грузов / А. А. Гордиенко // Транспорт : наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2025. – № 1. – С. 23–32. – DOI 10.36535/0236-1914-2025-01-4.

4 **ГОСТ Р 27.102-2021.** Библиографическая запись. Библиографическое описание : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 декабря 2021 г. № 1104-ст. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 40 с.

5 **Власова, Н. В.** Декомпозиция основных бизнес-процессов и зоны формирования рисков железнодорожной транспортной системы в сфере грузовых перевозок / Н. В. Власова, В. А. Оленцевич // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (63). – С. 44–52. – DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_44.

6 **Гришкова, Д. Ю.** Анализ причин возникновения коммерческих неисправностей на сети железных дорог Российской Федерации / Д. Ю. Гришкова // Проблемы и перспективы экономики и управления : материалы VI Международной научной конференции (г. Санкт-Петербург, декабрь 2017 г.). – Санкт-Петербург : Свое издательство, 2017. – С. 215–219. – URL: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/263/13499> (дата обращения: 19.04.2026).

7 **Гордиенко, А. А.** О креплении лесных грузов на открытом подвижном составе с использованием текстильных лент / А. А. Гордиенко // Транспорт : наука, техника, управление. – 2021. – № 7. – С. 17–23. – DOI 10.36535/0236-1914-2021-07-3.

8 **Нутович, В. Е.** Цифровое обеспечение и соблюдение технических условий размещения и крепления / В. Е. Нутович // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16, № 4 (77). – С. 52–65. – ISSN 1992-3252.

9 **Туранов, Х. Т.** Крепления грузов в вагонах : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / Х. Т. Туранов, А. Н. Бондаренко, Н. В. Власова ; под редакцией д-ра техн. наук, профессора Х. Т. Туранова. – Екатеринбург : Издательство УрГУПС, 2006. – 321 с. – ISBN 5-94614-031-0.

10 **Пигунов, В. В.** Надежность подвижного состава железнодорожного транспорта : учебное пособие / В. В. Пигунов ; Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь. Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель : БелГУТ, 2016. – 202 с. – ISBN 978-985-554-571-3.

3 **Gordienko, A. A.** On the problems and methods of increasing the reliability of methods for placing and securing cargo / A. A. Gordienko // Transport : science, equipment, management. Scientific information collection. – 2025. – No. 1. – P. 23–32. – DOI 10.36535/0236-1914-2025-01-4.

4 **GOST R 27.102-2021.** Bibliographic entry. Bibliographic description : national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 8, 2021 – No. 1104-st. – Moscow : Standartinform, 2021. – 40 p.

5 **Vlasova, N. V.** Decomposition of the main business processes and the risk formation zone of the railway transport system in the field of freight traffic / N. V. Vlasova, V. A. Olentsevich // The Siberian Transport University Bulletin. – 2022. – No. 4 (63). – P. 44–52. – DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_44.

6 **Grishkova, D. Yu.** Analysis of the causes of commercial malfunctions on the railway network of the Russian Federation / D. Yu. Grishkova // Problems and prospects of economics and management : Proceedings of the VI Intern. scientific conf. (Saint Petersburg, December 2017). – Saint Petersburg : Svoy Publishing House, 2017. – P. 215–219. – URL: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/263/13499> (date of access: 04/19/2026).

7 **Gordienko, A. A.** On securing timber cargo on open rolling stock using textile straps / A. A. Gordienko // Transport : science, equipment, management. Scientific information collection. – 2021. – No. 7. – P. 17–23. – DOI 10.36535/0236-1914-2021-07-3.

8 **Nutovich, V. E.** Digital support and compliance with specifications for arrangement and fastening of cargoes / V. E. Nutovich // The World of transport. – 2018. – Vol. 16, No. 4 (77). – P. 52–65. – ISSN 1992-3252.

9 **Turanov, Kh. T.** Cargo securing in wagons : a textbook for universities of railway transport / Kh. T. Turanov, A. N. Bondarenko, N. V. Vlasova ; edited by doctor of technical sciences, professor Kh. T. Turanov. – Ekaterinburg : Publishing house of USURT, 2006. – 321 p. – ISBN 5-94614-031-0.

10 **Pigunov, V. V.** Reliability of rolling stock of railway transport : a tutorial / V. V. Pigunov ; Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus. Belarusian State University of Transport. – Gomel : BSUT, 2016. – 202 p. – ISBN 978-985-554-571-3.

11 Распоряжение ОАО «РЖД» № 2451/р от 28.11.2017 «О вводе в действие Регламента многоступенчатого контроля по обеспечению безопасности движения при приеме груза и порожних вагонов к перевозке, в пути следования и при выдаче груза». – URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-oao-rzhd-ot-28112017-n-2451r/> (дата обращения: 19.04.2026).

11 Order of JSC Russian Railways No. 2451/r of November 28, 2017 “On the implementation of the Regulations for multi-stage control to ensure traffic safety during the acceptance of cargo and empty wagons for transportation, during the journey, and during the delivery of cargo”. – URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-oao-rzhd-ot-28112017-n-2451r/> (date of access: 04/19/2026).

A. A. Gordienko, I. A. Koshcheyev

RELIABILITY INDICATORS FOR CARGO PLACEMENT AND SECURING METHODS IN RAILROAD CARS

Abstract. The article examines methods for determining key reliability indicators applicable to assessing cargo placement and securing methods in railcars. It provides examples of calculations for determining the reliability indicators of approved methods of approved cargo placement and securing methods based on statistical data on identified commercial malfunctions and failures. The article also proposes a tool for monitoring the reliability of cargo placement and securing methods based on the results of transportation. Based on the processed statistical data and key reliability indicators, it is proposed to issue a conclusion regarding the further extension of the validity period and the online conversion of local and unspecified technical specifications.

Keywords: reliability, cargo, cargo placement and securing method, indicator, commercial malfunction, failure, uncoupling, reliability, maintainability, durability, storability.

For citation: Gordienko, A. A. Reliability indicators for cargo placement and securing methods in railroad cars / A. A. Gordienko, I. A. Koshcheyev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 147–155. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_147.

Сведения об авторах

Гордиенко Андрей Александрович
Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Станции, узлы и грузовая работа»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: gordiii89@yandex.ru

Кошечев Илья Алексеевич
Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной
работой»,
аспирант,
e-mail: rentgen02@mail.ru

Information about the authors

Gordienko Andrey Aleksandrovich
Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair “Stations, junctions and freight
operations”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: gordiii89@yandex.ru

Koshcheyev Ilya Alekseevich
Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair “Operational work management”,
Postgraduate Student,
e-mail: rentgen02@mail.ru

Е. Е. Мизгирева, О. Н. Числов

МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ В ОЦЕНКЕ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ УЗЛОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация. Представлен авторский подход к выбору и оценке классификационных признаков узловых транспортных организационно-технических систем (УТОТС) на основе предложенного понятийного аппарата. Классификация строится на пяти ключевых признаках, отражающих динамические и синергетические свойства УТОТС: стадия жизненного цикла, тип динамики развития, способность к самоорганизации, тип аттрактора, фазовое состояние. Для определения весовой значимости классификационных признаков применен метод анализа иерархий (МАИ) Т. Саати, позволяющий математически обосновать их вклад в интегральную оценку. Отношение согласованности ($OS = 0,017$) подтверждает непротиворечивость экспертных суждений. Разработана иерархическая система частных индикаторов (23 показателя), обеспечивающая объективность оценивания. На основе предложенной методологии проведена квантификация пятидесяти УТОТС, получены их интегральные индексы развития, выполнено ранжирование и сравнительный анализ для целей стратегического планирования развития транспортной инфраструктуры и принятия управленческих решений.

Ключевые слова: узловая транспортная организационно-техническая система (УТОТС), классификация, метод анализа иерархий (МАИ), квантификация, синергетика, транспортное планирование, многокритериальная оценка.

Для цитирования: Мизгирева, Е. Е. Метод анализа иерархий в оценке классификационных признаков узловых транспортных организационно-технических систем / Е. Е. Мизгирева, О. Н. Числов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 156–164. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_156.

Введение

Современное развитие транспортной системы Российской Федерации сопровождается усложнением структуры транспортных объектов, развитием и усилением взаимосвязей между видами транспорта и возрастанием роли регионального планирования [1]. В этих условиях возникает потребность в адекватных инструментах анализа и классификации узловых объектов, учитывающих не только их технические параметры, но и динамические характеристики, способность к самоорганизации, включая их роль в региональной сети.

В работе [2] было рассмотрено понятие «узловая транспортная организационно-техническая система» (УТОТС), определены критерии ее идентификации и обоснована необходимость перехода от рассмотрения отдельных транспортных узлов к анализу их сетевых взаимодействий. Однако для практического применения данного понятия требуется развитие классификационного аппарата, позволяющего проводить сравнительный анализ различных УТОТС.

Традиционные классификации транспортных узлов [3, 4] строятся преимущественно на функциональных или инфраструктурных признаках и не учитывают динамические и синергетические характеристики. Кроме того, они носят разноразмерный качественный характер, что затрудняет их использование в математических моделях и при принятии управленческих решений.

Цель настоящей статьи – разработать многомерную классификацию УТОТС, основанную на количественной оценке их динамических и синергетических характеристик с применением метода анализа иерархий (МАИ) Т. Саати.

Последовательность исследования:

- 1 Обосновать систему классификационных признаков, отражающих различные аспекты функционирования и развития УТОТС.
- 2 Разработать методику квантификации качественных признаков УТОТС с применением МАИ.
- 3 Определить весовые коэффициенты значимости признаков и провести проверку согласованности экспертных суждений.
- 4 Апробировать разработанную методику на выборке параметров, существующих УТОТС.
- 5 Выполнить сравнительный анализ результатов и выявить закономерности распределения классификационных признаков узлов согласно уровням развития.

Основная часть

1 Теоретико-методологические основы исследования

Под узловой транспортной организационно-технической системой (УТОТС) понимается целостное образование, включающее совокупность взаимодействующих объектов транспортной инфраструктуры, объединенных единым технологическим процессом обработки грузов и пассажиров, а также организационно-управленческие механизмы, обеспечивающие координацию участников транспортного производства и согласованное развитие элементов узловой системы [2].

Необходимость выбора и оценки классификационных признаков УТОТС обусловлена следующими факторами:

- многообразием типов узловых объектов (морские хабы и порты, континентальные железнодорожные и транспортные узлы, авиационные и контейнерные хабы, пограничные комплексы и переходы, промышленные узлы, транспортно-пересадочные узлы и др.), требующим единой системы сравнения;
- потребностью в количественных оценках для ранжирования и отбора качественных приоритетов для объектов инвестирования;
- необходимостью учета динамических характеристик (развитие во времени, адаптивность, устойчивость) при стратегическом планировании;
- возможностью применения синергетического подхода к анализу сетей УТОТС [5], что требует формализации параметров порядка.

Метод анализа иерархий (МАИ) предложен Т. Саати еще в 1970-х гг. [6, 7]. Сегодня это один из самых распространенных подходов к многокритериальному принятию решений, и его используют в транспортном планировании, логистике, при управлении инфраструктурными проектами [8, 9]. Для данной задачи МАИ удобен по нескольким причинам: он допускает смешанные данные – количественные и качественные; парные сравнения не перегружают экспертов; имеется встроенная проверка согласованности суждений; на выходе получаются численные веса критериев [10].

В транспортных исследованиях МАИ используется давно и по разным поводам – от выбора маршрутов и видов транспорта [11] до оценки крупных инфраструктурных проектов [12] и выработки национальных транспортных стратегий [13]. Показательный пример – это планирование транспортной системы Республики Судан, где МАИ использован для ранжирования альтернативных сценариев [14].

С позиций синергетики транспортная система – это сложная динамическая система с собственной способностью к самоорганизации и коэволюции подсистем [5]. Переходя к УТОТС, это означает, что их развитие не сводится к одним директивным воздействиям, а здесь действуют также и внутренние механизмы самоорганизации.

В ряде работ [15] отмечается, что транспортные узлы – это элементы сети, а их взаимодействие порождает синергетические эффекты. Для описания такого рода систем вводят параметры порядка, аттракторы (устойчивое подмножество состояний в фазовом пространстве системы, описывающее её конечное поведение), фазовые переходы, а значит, нужен соответствующий понятийный и инструментальный аппарат. Предлагаемая методика выбора и оценки классификационных признаков УТОТС, включающая синергетические принципы, создает основания для перехода от статистического анализа к моделированию макрорегионального коэволюционного развития.

2 Система классификационных признаков УОТС

Выделены пять признаков, которые отражают динамику узловых транспортных организационно-технических систем и их системную целостность. Отбор признаков выполнен на основе обобщения подходов согласно [3, 4] и с учетом синергетической теории развития сложных систем [5].

Стадия жизненного цикла (СЖЦ) – показатель того, на каком этапе развития находится УТОТС: от возникновения до перехода в стагнацию. Различают стадии: формирующуюся, активного развития, стабильного функционирования, стабильную с рисками и стагнирующую.

Тип динамики развития (ТДР) – качественная характеристика изменений. Выделяют экстенсивный тип (рост за счет расширения мощностей), интенсивный (рост за счет повышения эффективности), смешанный и регрессивный (спад объемов, деградация инфраструктуры).

Способность к самоорганизации (ССО) – свойство УТОТС самостоятельно, без жесткого внешнего управления, формировать устойчивую структуру и правила взаимодействия между участниками перевозок. Используется пятиуровневая градация – от низкой до высокой степени самоорганизации.

Тип аттрактора узла (ТАУ) – определяет стратегическую роль узла в региональной сети: моноцентрический (доминирующий), полицентрический (равноправный), специализированный, спутниковый и формирующийся [18].

Фазовое состояние узла (ФСУ) – показывает текущую стабильность и предсказуемость поведения: устойчивая фаза, фаза упорядочения, фаза зарождения, переходная фаза, фаза хаоса/кризиса [5].

Для повышения объективности каждый признак раскрывается через систему частных индикаторов (всего их 23), структура и весовые параметры которых представлены на рис. 1.



Рис. 1. Структура иерархии признаков УТОТС

Веса частных индикаторов определены экспертным методом. Для каждого индикатора разработаны критерии оценки по 5-балльной шкале (от 1 до 5).

3 Определение весовых признаков методом анализа иерархий

Для определения относительной важности пяти классификационных признаков использован метод анализа иерархий. На основе экспертных суждений (согласованных с ведущими специалистами в области транспортного планирования) построена матрица парных сравнений A размерности 5×5 .

Таблица 1

Матрица парных сравнений признаков УТОТС

Признак	СЖД	ТДР	ССО	ТАУ	ФСУ
СЖД	1	2	3	2	1
ТДР	1/2	1	2	1	1/2
ССО	1/3	1/2	1	1/3	1/4
ТАУ	1/2	1	3	1	1
ФСУ	1	2	4	1	1

При построении матрицы использована классическая шкала относительной важности Саати [7]: 1 – равная значимость, 3 – умеренное превосходство, 5 – существенное превосходство, 7 – значительное превосходство, 9 – абсолютное превосходство; промежуточные значения (2, 4, 6, 8) – компромиссные оценки.

Обоснование экспертных оценок:

Сравнение СЖЦ и ТДР – (2): стадия жизненного цикла умеренно важнее типа динамики, так как определяет «точку на траектории» развития.

Сравнение СЖЦ и ССО – (3): стадия существенно важнее самоорганизации (узлом можно управлять и при низкой самоорганизации).

Сравнение СЖЦ и ФСУ – (1): стадия и фазовое состояние равнозначны, тесно коррелируют.

Сравнение ТДР и ССО – (2): тип динамики важнее самоорганизации.

Сравнение ТДР и ТАУ – (1): тип динамики и тип аттрактора равнозначны.

Сравнение ССО и ТАУ – (1/3): тип аттрактора существенно важнее самоорганизации.

Сравнение ССО и ФСУ – (1/4): фазовое состояние значительно важнее самоорганизации.

Сравнение ТА и ФСУ – (1): тип аттрактора и фазовое состояние равнозначны.

Расчет весов выполнен методом среднего геометрического по строкам матрицы [10].

Среднее геометрическое для каждой строки:

$$\begin{aligned}\text{Признак СЖЦ: } (1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1)^{1/5} &= 12^{1/5} = 1,644; \\ \text{Признак ТДР: } (1/2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1/2)^{1/5} &= 0,5^{1/5} = 0,871; \\ \text{Признак ССО: } (1/3 \cdot 1/2 \cdot 1 \cdot 1/3 \cdot 1,4)^{1/5} &= 0,0139^{1/5} = 0,425; \\ \text{Признак ТАУ: } (1/2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 1)^{1/5} &= 1,5^{1/5} = 1,084; \\ \text{Признак ФСУ: } (1 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 1)^{1/5} &= 8^{1/5} = 1,516.\end{aligned}$$

Сумма средних геометрических: $1,644 + 0,871 + 0,425 + 1,084 + 1,516 = 5,540$.

Нормированные веса:

$$\begin{aligned}w_1(\text{СЖЦ}) &= \frac{1,644}{5,540} = 0,297, \quad w_2(\text{ТДР}) = \frac{0,871}{5,540} = 0,157, \\ w_3(\text{ССО}) &= \frac{0,425}{5,540} = 0,077, \quad w_4(\text{ТАУ}) = \frac{1,084}{5,540} = 0,196, \\ w_5(\text{ФСУ}) &= \frac{1,516}{5,540} = 0,274.\end{aligned}$$

Преимуществом МАИ является возможность проверки согласованности экспертных суждений [19]. Для этого вычисляется отношение согласованности (ОС).

Шаг 1. Умножение матрицы A на вектор весов w :

$$\begin{aligned}\text{Признак СЖЦ: } 1 \cdot 0,297 + 2 \cdot 0,157 + 3 \cdot 0,077 + 2 \cdot 0,196 + 1 \cdot 0,274 &= 1,508; \\ \text{Признак ТДР: } 1/2 \cdot 0,297 + 1 \cdot 0,157 + 2 \cdot 0,077 + 1 \cdot 0,196 + 1/2 \cdot 0,274 &= 0,793; \\ \text{Признак ССО: } 1/3 \cdot 0,297 + 1/2 \cdot 0,157 + 1 \cdot 0,077 + 1/3 \cdot 0,196 + 1/4 \cdot 0,274 &= 0,389; \\ \text{Признак ТАУ: } 1/2 \cdot 0,297 + 1 \cdot 0,157 + 3 \cdot 0,077 + 1 \cdot 0,196 + 1 \cdot 0,274 &= 1,007; \\ \text{Признак ФСУ: } 1 \cdot 0,297 + 2 \cdot 0,157 + 4 \cdot 0,077 + 1 \cdot 0,196 + 1 \cdot 0,274 &= 1,389.\end{aligned}$$

Шаг 2. Вычисление $\lambda_{\max}$:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{5} \left(\frac{1,508}{0,297} + \frac{0,793}{0,157} + \frac{0,389}{0,077} + \frac{1,007}{0,196} + \frac{1,389}{0,274} \right) = 5,077.$$

Шаг 3. Индекс согласованности (ИС):

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5,077 - 5}{5 - 1} = 0,019.$$

Шаг 4. Отношение согласованности (ОС):

Для $n = 5$ средняя случайная согласованность (случайный индекс) составляет $\text{СС} = 1,12$ [10].

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СС}} = \frac{0,019}{1,12} = 0,017 \text{ (1,7 \%)}.$$

Полученное значение $\text{ОС} < 0,1$ (10 %), что свидетельствует о приемлемой согласованности экспертных суждений [7]. Матрица парных сравнений может быть использована для дальнейших расчетов. Таким образом, итоговые веса классификационных признаков составляют: признак СЖД – 0,297, признак ФСУ – 0,274, признак ТАУ – 0,196, признак ТДР – 0,157, признак ССО – 0,077.

4 Методика квантификации и расчета интегрального индекса УТОТС

Для каждой УТОТС проводится оценка по 23 частным индикаторам с использованием 5-балльной шкалы. Для каждого индикатора разработаны детальные критерии, обеспечивающие объективность и воспроизводимость оценок (табл. 2).

Таблица 2

Пример критериев оценки для индикатора 1.1 «Динамика грузооборота за 3 года»

Балл	Критерий
5	Рост > 15 % ежегодно
4	Рост 5–15 % ежегодно
3	Рост 0–5 % ежегодно или колебания без тренда
2	Падение 0–5 % ежегодно
1	Падение > 5 % ежегодно

Оценка по признаку k рассчитывается как взвешенная сумма оценок частных индикаторов:

$$B_k = \sum (\text{оценка индикатора}_i \cdot \text{вес индикатора}_i).$$

Интегральный индекс развития УОТС вычисляется по формуле:

$$I = B_1 \cdot 0,297 + B_2 \cdot 0,157 + B_3 \cdot 0,077 + B_4 \cdot 0,196 + B_5 \cdot 0,274.$$

На основе анализа распределения полученных значений предлагается интерпретация интегрального индекса, представленная в табл. 3.

Таблица 3

Интерпретация интегрального индекса

Диапазон	Уровень развития	Характеристика
4,5–5,0	Высший	Глобальные лидеры, уникальные УОТС мирового значения
4,0–4,4	Высокий	Национальные лидеры, опорные УОТС федерального значения
3,5–3,9	Выше среднего	Региональные лидеры с высоким потенциалом развития
3,0–3,4	Средний	Стабильно функционирующие УОТС
2,5–2,9	Ниже среднего	Проблемные УОТС, требующие внимания
2,0–2,4	Низкий	Кризисные УОТС
1,0–1,9	Депрессивный	Требуют срочного вмешательства или перепрофилирования

5 Результаты апробации на примере выборки отечественных УТОТС

Для апробации разработанной методики отобрано 50 УТОТС, представляющих различные типы и регионы Российской Федерации: морские портовые УТОТС (25 объектов), континентальные железнодорожные узлы (10 объектов), авиационные узлы (7 объектов), пограничные переходы (4 объекта), трубопроводные узлы (4 объекта). Выборка охватывает все федеральные округа и основные транспортные коридоры страны (Север-Юг, Запад-Восток, Северный морской путь).

Результаты расчета интегральных индексов для 50 УТОТС представлены в табл. 4 (в статье приводится сокращенная версия).

Таблица 4

Интегральные индексы развития УТОТС (фрагмент)

№ п/п	УТОТС	Тип (особенность)	Интегральный индекс
1	«Н»	Морской порт	4,68
2	«В»	Морской порт	4,45
3	«М-авиа»	Авиационный	4,42
4	«М-жд»	Железнодорожный	4,38
5	«П-авиа»	Авиационный	4,25
6	«Т-авиа»	Авиационный	4,22
7	«К-авиа»	Авиационный	4,21
8	«С-водн»	Морской порт	4,02
9	«Х-авиа»	Авиационный	3,84
10	«ЕК»	Железнодорожный	3,82
...	...	...	...
47	«ВГД»	Железнодорожный	1,95
48	«М»	Морской порт	1,94
49	«ХМС»	Морской порт	1,75
50	«КРС»	Морской порт	1,74

Распределение 50 УТОТС по группам развития представлено в табл. 5.

Таблица 5

Распределение УТОТС по уровням развития

Уровень развития	Диапазон	Количество	Доля, %
Лидеры (высший и высокий)	4,0–5,0	8	16
Выше среднего	3,5–3,9	9	18
Средний уровень	3,0–3,4	23	46
Ниже среднего	2,5–2,9	3	6
Кризисные и депрессивные	1,0–2,4	7	14
Всего		50	100

Средний интегральный индекс по выборке составляет 3,25, стандартное отклонение – 0,71, что свидетельствует о значительной дифференциации узлов по уровню развития.

Анализ средних значений интегрального индекса по типам УТОТС (табл. 6) выявил существенные расхождения.

Таблица 6

Средние значения интегрального индекса по типам УТОТС

Тип УТОТС	Количество	Средний индекс	Максимум	Минимум
Авиационные	7	3,94	4,42	3,41
Железнодорожные	10	3,36	4,38	1,95
Морские портовые	25	3,18	4,68	1,74
Пограничные переходы	4	3,25	3,44	3,19
Трубопроводные	4	3,08	3,09	0,05

Наиболее высокие и выровненные показатели демонстрируют авиационные узлы (средний индекс 3,94), что отражает активную фазу развития авиационной инфраструктуры в последние годы и процессы концентрации пассажиропотоков в крупнейших УТОТС. Морские портовые узлы характеризуются наибольшим разбросом показателей (от 1,74 до 4,68), что свидетельствует о неоднородности портового хозяйства России: современные высокоэффективные порты соседствуют с депрессивными, потерявшими грузопотоки. Полученные в ходе расчётов интегральные индексы для трубопроводных узлов оказались близки друг к другу (значения сконцентрированы в районе 3,08). Этот факт объясняется особенностями организации трубопроводного транспорта: управление такими системами осуществляется строго централизованно, а стандарты их функционирования унифицированы на уровне всей сети.

Выполненный анализ распределения индексов по макрорегионам (табл. 7) выявил следующие закономерности.

Данные табл. 7. демонстрируют следующую тенденцию: чем дальше на восток страны, тем ниже средние значения интегральных индексов, что синхронизируется с общей экономической ситуацией в российских регионах. Единственное исключение – узел «В» (4,45), здесь он локальный лидер. Но в целом дальневосточные узлы уступают тем, что в европейской части. Зато северные узлы – «М» (3,57) и «А» (3,18) – показывают результаты выше ожидаемых для своей группы. Это связано с активным развитием Северного морского пути.

Таблица 7

Средние значения интегрального индекса по макрорегионам

Регион	Средний индекс	Количество
Центральный	3,94	3
Северо-Запад	3,45	6
Южный (включая Каспий)	3,26	8
Урало-Поволжский	3,21	9
Сибирь	3,29	9
Дальний Восток	3,09	15

6 Обсуждение результатов

Разработана многомерная классификация УТОТС, учитывающая синергетические и региональные признаки. Например, способность к самоорганизации, тип аттрактора или фазовое состояние. Это позволяет не просто описывать узловые объекты статично, а анализировать, как они меняются во времени. Проведена квантификация пятидесяти узловых транспортных организационно-технических систем (УТОТС) России. Рассчитан интегральный индекс с учетом 23 частных индикаторов с критериями. Определены закономерности в распределении показателей узлов по уровням развития, расположению и типам УТОТС.

По системе динамических показателей на примере определены узлы-лидеры («Н», «В», «М-авиа», «М») и узлы-аутсайдеры («Х», «К», «Вл», «Мч»), что позволяет принимать управленческие и экономические решения стратегического развития.

Заключение

Применен метод анализа иерархий для выбора и оценки значимости признаков для разрабатываемой классификации узловых транспортных систем. За основу расчетов взяты пять ключевых характеристик: стадия жизненного цикла, тип динамики, способность к самоорганизации, тип аттрактора и фазовое состояние. Метод МАИ позволил получить обоснованные веса параметров: стадия жизненного цикла – 0,297, фазовое состояние – 0,274, тип аттрактора – 0,196, тип динамики – 0,157, способность к самоорганизации – 0,077. Отношение согласованности ($OC = 0,017$) говорит о том, что экспертные оценки при парных сравнениях получились вполне непротиворечивыми.

Методика апробирована на выборке из пятидесяти российских УТОТС. Результаты позволили: рассчитать для каждого УТОТС интегральный индекс развития, выполнить ранжирование, выделить лидеров и аутсайдеров, выявить отраслевые особенности (у авиационных узлов самые высокие и стабильные показатели, а у морских портов – самый сильный разброс), определить, как индексы распределяются в пространстве (падение при движении с запада на восток). Перспектива применения полученных результатов связана с их использованием для стратегических управленческих решений в транспортном планировании, а также в будущих исследованиях, например, при построении синергетических моделей развития сетей УТОТС.

Список литературы

- 1 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (дата обращения: 25.06.2026).
- 2 Мизгирева, Е. Е. Формирование метода размещения инфраструктурных объектов транспортных узлов в условиях нечетких принципов параметризации : специальность 2.9.1 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, её регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мизгирева Екатерина Евгеньевна ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2025. – 235 с.
- 3 Козлов, П. А. К теории транспортных узлов / П. А. Козлов, В. Ю. Пермикин, Н. В. Кашеева // Транспорт Урала. – 2013. – № 4 (39). – С. 8–10. – ISSN 1815-9400.
- 4 Правдин, Н. В. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) /

Reference

- 1 Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 : approved by Order of the Government of the Russian Federation No. 3363-r dated November 27, 2021. – URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (date of access: 06/25/2026).
- 2 Mizgireva, E. E. Formation of a method for locating infrastructure facilities at transport hubs under fuzzy parameterization principles : specialty 2.9.1 “Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport (technical sciences)” : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Mizgireva Ekaterina Evgenievna ; Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don, 2025. – 235 p.
- 3 Kozlov, P. A. To the theory of transport nodes / P. A. Kozlov, V. Yu. Permikin, N. V. Kashcheeva // Transport of the Urals. – 2013. – No. 4 (39). – P. 8–10. – ISSN 1815-9400.
- 4 Pravdin, N. V. Design of railway transport infrastructure (stations, railway and transport hubs)

Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Голович. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. – 1086 с. – ISBN 978-5-89035-619-2.

5 **Сандакова, Н. Ю.** К вопросу об использовании теории развивающихся систем как основы социально-экономического развития региона / Н. Ю. Сандакова // Проблемы современной экономики. – 2014. – № 2 (50). – С. 407–410. – ISSN 1818-3395.

6 **Saaty, T. L.** A scaling method for priorities in hierarchical structures / T. L. Saaty // Journal of Mathematical Psychology. – 1977. – Vol. 15, No. 3. – P. 234–281. – DOI 10.1016/0022-2496(77)90033-5.

7 **Саати, Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; перевод с английского Р. Г. Вачнадзе. – Москва : Радио и связь, 1993. – 278 с.

8 **Islam, R.** The analytic hierarchy process in the transportation sector / R. Islam, T. L. Saaty // Multiple criteria decision making for sustainable energy and transportation systems / ed. by M. Ehrgott [et al.]. – Berlin : Springer, 2010. – P. 79–91. – (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems ; Vol. 634). – DOI 10.1007/978-3-642-04045-0_7.

9 **Рассадникова, Е. Ю.** Модифицированный метод иерархии Саати для задачи выбора транспортного режима / Е. Ю. Рассадникова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2014. – Т. 18, № 5. – С. 146–152. – ISSN 1992-6502.

10 **Saaty, T. L.** Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty, L. G. Vargas. – 2nd ed. – New York : Springer, 2012. – 346 p. – (International Series in Operations Research & Management Science ; Vol. 175). – DOI 10.1007/978-1-4614-3597-6.

11 Макромоделирование транспортных узлов / П. А. Козлов, Н. А. Тушин, В. Ю. Пермикин, И. Г. Слободянюк // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 10. – С. 38–40. – ISSN 0044-4448.

12 О принципах расчёта транспортных узлов / П. А. Козлов, С. П. Вакуленко, В. П. Козлова, Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 4 (95). – С. 6–12. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-4-1.

13 **Воронов, В. А.** Транспортно-пересадочные узлы и интермодальные комплексы. Термины и определения / В. А. Воронов, К. Ю. Чистяков // Architecture and Modern Information Technologies. – 2020. – № 3 (52). – С. 252–264. – DOI 10.24411/1998-4839-2020-15214.

14 **Rotter, H.** New operating concepts for intermodal transport: The mega hub in Hanover/Lehrte

/ N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko, A. K. Golovnich. – Moscow : Educational and Methodological Center for Railway Transport Education, 2012. – 1086 p. – ISBN 978-5-89035-619-2.

5 **Sandakova, N. Yu.** On the issue of using the theory of developing systems as a basis for the socioeconomic development of a region / N. Yu. Sandakova // Problems of Modern Economics. – 2014. – No. 2 (50). – P. 407–410. – ISSN 1818-3395.

6 **Saaty, T. L.** A scaling method for priorities in hierarchical structures / T. L. Saaty // Journal of Mathematical Psychology. – 1977. – Vol. 15, No. 3. – P. 234–281. – DOI 10.1016/0022-2496(77)90033-5.

7 **Saaty, T.** Decision making. The analytic hierarchy process / T. Saaty ; translated from English by R. G. Vachnadze. – Moscow : Radio i Svyaz, 1993. – 278 p.

8 **Islam, R.** The analytic hierarchy process in the transportation sector / R. Islam, T. L. Saaty // Multiple criteria decision making for sustainable energy and transportation systems / ed. by M. Ehrgott [et al.]. – Berlin : Springer, 2010. – P. 79–91. – (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems ; Vol. 634). – DOI 10.1007/978-3-642-04045-0_7.

9 **Rassadnikova, E. Yu.** Modified Saaty hierarchy method for the problem of selecting a transport mode / E. Yu. Rassadnikova // Vestnik of the Ufa State Aviation Technical University. – 2014. – Vol. 18, No. 5. – P. 146–152. – ISSN 1992-6502.

10 **Saaty, T. L.** Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty, L. G. Vargas. – 2nd ed. – New York : Springer, 2012. – 346 p. – (International Series in Operations Research & Management Science ; Vol. 175). – DOI 10.1007/978-1-4614-3597-6.

11 Macromodeling of transport hubs / P. A. Kozlov, N. A. Tushin, V. Yu. Permikin, I. G. Slobodanyuk // Railway Transport. – 2015. – No. 10. – P. 38–40. – ISSN 0044-4448.

12 On the principles of calculating transport hubs / P. A. Kozlov, S. P. Vakulenko, V. P. Kozlova, N. Y. Evreenova // World of Transport and Transportation. – 2021. – Vol. 19, No. 4 (95). – P. 6–12. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-4-1.

13 **Voronov, V. A.** Transport hubs and intermodal complexes. Terms and definitions / V. A. Voronov, K. Yu. Chistyakov // Architecture and Modern Information Technologies. – 2020. – No. 3 (52). – P. 252–264. DOI 10.24411/1998-4839-2020-15214.

14 **Rotter, H.** New operating concepts for intermodal transport: The mega hub in Hanover/Lehrte

in Germany / H. Rotter // Transportation Planning and Technology. – 2004. – Vol. 27, No. 5. – P. 347–365. – DOI 10.1080/0308106042000273022.

15 **Сысоев, Н. Ю.** Развитие промышленно-транспортных узлов на основе совершенствования взаимодействия железнодорожного транспорта общего и необщего пользования : специальность 2.9.4 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сысоев Николай Юрьевич ; Российский университет транспорта (МИИТ). – Москва, 2025. – 185 с.

in Germany / H. Rotter // Transportation Planning and Technology. – 2004. – Vol. 27, No. 5. – P. 347–365. – DOI 10.1080/0308106042000273022.

15 **Sysoev, N. Yu.** Development of industrial and transport hubs based on improving the interaction of public and non-public railway transport : speciality 2.9.4 “Transportation Process Management” : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Sysoev Nikolay Yuryevich ; Russian University of Transport (MIIT). – Moscow, 2025. – 185 p.

E. E. Mizgireva, O. N. Chislov

THE METHOD OF HIERARCHY ANALYSIS IN THE EVALUATION OF CLASSIFICATION FEATURES OF HUB TRANSPORT ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Abstract. The article presents the author's approach to the selection and evaluation of classification features of hub transport organizational and technical systems (HTOTS) based on the proposed conceptual framework. The classification is based on five key features that reflect the dynamic and synergistic properties of HTOTS: the stage of the life cycle, the type of development dynamics, the ability to self-organize, the type of attractor, and the phase state. To determine the weighting significance of the classification features, the method of hierarchical analysis (MHA) by T. Saaty is used, which allows for a mathematical justification of their contribution to the integral assessment. The consistency ratio (CR = 0.017) confirms the consistency of the expert judgments. A hierarchical system of private indicators (23 indicators) has been developed to ensure objective evaluation. Based on the proposed methodology, fifty HTOTS of the Russian Federation were quantified, their integral development indices were obtained, and a ranking and comparative analysis were performed for the purposes of strategic planning of transport infrastructure development and management decision-making.

Keywords: hub transport organizational and technical system (HTOTS), classification, hierarchical analysis method (HAM), quantification, synergetics, transport planning, multi-criteria assessment.

For citation: Mizgireva, E. E. The method of hierarchy analysis in the evaluation of classification features of hub transport organizational and technical systems / E. E. Mizgireva, O. N. Chislov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 156–164. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_156.

Сведения об авторах

Мизгирева Екатерина Евгеньевна
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Станции и грузовая работа»,
кандидат технических наук, ассистент,
e-mail: BrutalD@yandex.ru

Числов Олег Николаевич
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Станции и грузовая работа»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: o_chislov@mail.ru

Information about the authors

Mizgireva Ekaterina Evgenievna
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Stations and Freight Operation”,
Candidate of Engineering Sciences, Assistant,
e-mail: BrutalD@yandex.ru

Chislov Oleg Nikolaevich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Stations and Freight Operation”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: o_chislov@mail.ru

О. В. Москвичев, А. Т. Осьминин, Е. Е. Москвичева, Е. А. Куприянова

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРКОМ ПОРОЖНИХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Аннотация. Рассматриваются вопросы совершенствования процессной модели управления парком порожних грузовых вагонов в ОАО «РЖД». Проведён анализ действующей модели, разработанной на основании Регламента процесса планирования показателей работы парка порожних грузовых вагонов на железных дорогах ОАО «РЖД» № 1397/р от 02.07.2025 г., в результате которого выявлены два системных недостатка: выполнение проверки пропускных и перерабатывающих способностей инфраструктуры с использованием динамической модели загрузки инфраструктуры только на завершающем этапе рассмотрения заявок на перевозку грузов железнодорожным транспортом, а также отсутствие формализованного механизма выбора станций для отстоя порожних вагонов после выгрузки. Для устранения выявленных недостатков авторами предложены мероприятия по переносу ввода данных в ДМ ЗИ на первый этап обработки заявок и введению в процессную модель нового структурного элемента «Контроль за выгрузкой и дальнейшая работа с порожним вагонным парком». Реализация предложенных мероприятий позволит сократить сроки рассмотрения заявок, снизить порожний пробег, повысить участковую скорость, пропускную способность линий и перерабатывающую способность станций.

Ключевые слова: процессная модель, управление парком порожних вагонов, планирование перевозок, операторы подвижного состава, владельцы вагонов, динамическая модель загрузки инфраструктуры, ОАО «РЖД».

Для цитирования: Концептуальные предложения по оптимизации процессной модели управления парком порожних грузовых вагонов / О. В. Москвичев, А. Т. Осьминин, Е. Е. Москвичева, Е. А. Куприянова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 165–174. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_165.

Введение

В рамках реализации программы развития процессного подхода в системе управления ОАО «РЖД» разработана Единая процессная модель (ЕПМ), закреплённая нормативными документами компании, в том числе Распоряжением № 859/р от 04.04.2024 г. ЕПМ, представляет собой интегрированную систему описания сквозных процессов, отражающую взаимосвязь функций подразделений, исполнителей, нормативной базы и применяемых информационных технологий.

Важным структурным элементом, предшествующим формированию ЕПМ, является Карта процессов верхнего уровня. Согласно приложению № 5 к Своду правил моделирования процессов ОАО «РЖД», № 859/р от 04.04.2024, Карта процессов верхнего уровня определяет перечень основных производственных процессов и зоны ответственности подразделений за их выполнение, однако не отражает всей полноты взаимосвязей между ними. В отличие от Карты, ЕПМ представляет собой совокупность связанных сквозных процессов, построенных по принципу «от клиента к результату», что позволяет выявлять дублирование операций, оценивать полноту нормативного обеспечения, контролировать наличие ответственных исполнителей на каждом этапе и своевременно обнаруживать барьерные места, препятствующие достижению целевых показателей. Таким образом, если Карта процессов верхнего уровня фиксирует ответственность и укрупнённую структуру, то ЕПМ объединяет все процессы в единое целое, обеспечивая возможность контроля деятельности на всех уровнях управления [1].

Особую значимость процессный подход имеет в сфере организации перевозочного процесса, где результат достигается за счёт согласованных действий большого числа подразделений. Одним из ключевых направлений является управление вагонным парком, в частности порожними вагонами, эффективность которого напрямую влияет на выполнение качественных и количественных показателей работы железнодорожной сети.

Анализ действующей процессной модели управления парком порожних грузовых вагонов

Процессная модель управления парком порожних грузовых вагонов разработана на основании Регламента процесса планирования показателей работы парка порожних грузовых вагонов на железных дорогах ОАО «РЖД» № 1397/р от 02.07.2025 г. Данный Регламент устанавливает методологию применения алгоритмов расчета показателей работы порожних грузовых вагонов, а также порядок взаимодействия подразделений ОАО «РЖД» и операторов подвижного состава / владельцев вагонов, участвующих в нормировании корреспонденций порожних грузовых вагонов, в целях увеличения объема погрузки. Целью создания процессной модели управления парком порожних вагонов является обеспечение грузоотправителей необходимым количеством порожних грузовых вагонов в условиях многообразия операторских услуг [2].

Рассматриваемая процессная модель управления парком порожних грузовых вагонов (ПМ УП-ПГВ) построена по принципу сквозного бизнес-процесса, охватывающего полный цикл управления вагонным парком – от формирования заявок на перевозку до анализа эффективности использования вагонного парка и корректировки плановых параметров. Модель включает три укрупнённых блока: входной, центральный и корректировки, каждый из которых детализирован до уровня конкретных операций и ответственных исполнителей.

Входной блок ПМ УППГВ. Исходными данными для функционирования модели служат заявки грузоотправителей на перевозку грузов железнодорожным транспортом. На этапе приёма и регистрации они проходят первичную обработку, включающую проверку корректности заполнения и идентификацию плательщика. После успешного прохождения первичного контроля информация передаётся в блоки планирования. Здесь на основе поступивших заявок и с учётом регламентирующих документов (нормативных актов, технологических ограничений) формируются планы работы парка порожних вагонов и осуществляется их распределение по направлениям.

Центральный блок ПМ УППГВ. Включает этапы мониторинга текущих показателей работы вагонного парка, планирования параметров эксплуатации (оборот вагона, погрузка-выгрузка, приём-сдача), анализа состояния порожнего парка и выявления отклонений от нормативов, а также принятия решений о перераспределении вагонопотоков. Каждый из этих этапов обеспечивается данными от операторов подвижного состава/владельцев вагонов, технологическими нормативами и аналитическими отчётами о фактическом использовании вагонов. В рамках центрального блока задействованы автоматизированные системы АС ЭТРАН НП и единая модель данных перевозочного процесса подсистема управления эксплуатационной работой (ЕМД ПП УЭР), которые обеспечивают информационную поддержку принятия решений и контроль за соблюдением установленных ограничений. Регулярный мониторинг позволяет оперативно обнаруживать «узкие» места, например, такие как превышение допустимого парка на станциях или задержки в продвижении вагонопотоков.

Блок корректировки ПМ УППГВ. На основе сопоставления плановых и фактических показателей формируются аналитические данные, которые служат основанием для корректировки нормативных показателей. Процедуры корректировки позволяют адаптировать плановые показатели к реальному состоянию транспортной сети. Корректировки могут быть инициированы как перевозчиком (при существенных отклонениях фактического парка от планового), так и операторами подвижного состава/владельцами вагонов (при изменении объема заявок). Решения о перерасчете принимаются не чаще одного раза в декаду и утверждаются руководителями ЦДУД и ЦФТО. Таким образом, модель реализует принцип непрерывного совершенствования, обеспечивая гибкость и обоснованность принимаемых решений.

Все операции в модели выполняются в строгом соответствии с нормативной базой, представленной в виде отдельных информационных элементов, задающих правила и ограничения на каждом этапе процесса. К числу таких документов относятся федеральные законы, приказы Минтранса России, распоряжения ОАО «РЖД», а также внутренние инструкции и технологические карты. Их интеграция в процессную модель обеспечивает единство методологической основы и снижает риски ошибок, связанных с несоблюдением установленных требований.

На рис. 1 представлен схематичный план существующей процессной модели управления парком порожних грузовых вагонов с обозначением документов, которые регламентируют каждый из блоков. Схема наглядно демонстрирует информационные потоки и последовательность этапов, что облегчает восприятие логики модели и её дальнейшее использование.

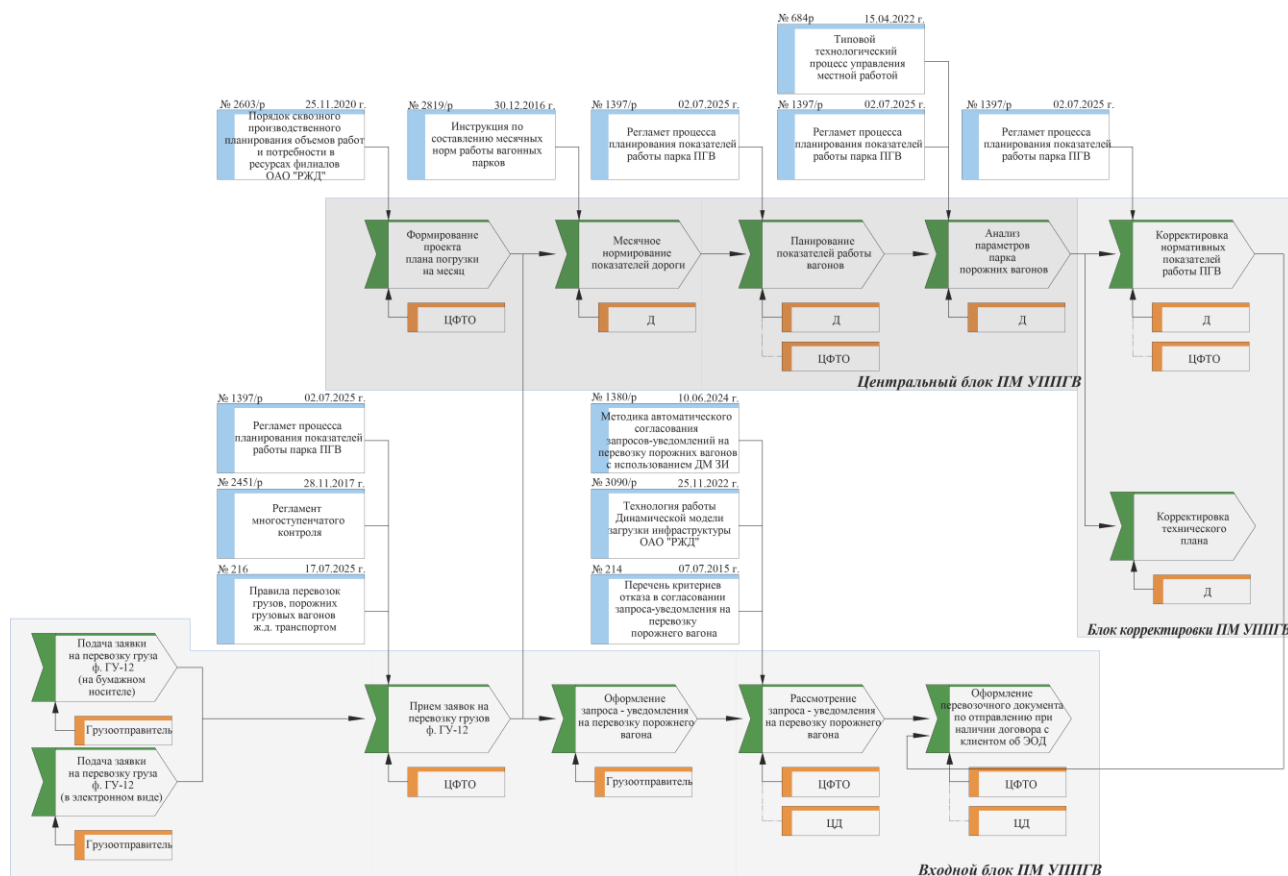


Рис. 1. Схематичный план существующей процессной модели управления порожним парком грузовых вагонов

Анализ блока «Прием заявок на перевозку грузов формы ГУ-12» и выявление барьерных мест в его функционировании

Исходными данными для описанной процессной модели являются заявки на перевозку грузов железнодорожным транспортом, поступающие от грузоотправителей. Именно от оперативности и качества обработки этих заявок на начальных этапах зависит достоверность последующего планирования работы парка порожних вагонов. Детальный анализ процедуры рассмотрения и приема заявок позволяет выявить существующие системные недостатки. В связи с этим далее представлено последовательное описание действующих этапов блока «Приём заявок на перевозку грузов ф. ГУ-12», по результатам которого будет обосновано предложение по оптимизации работы [3].

Этап 1. Первичный приём и регистрация. На данном этапе заявка принимается в работу либо на бумажном носителе, либо в электронном виде через автоматизированную систему (АС ЭТРАН НП). Выполняется проверка корректности заполнения, наличия обязательных реквизитов, а также идентификация плательщика. По итогам первичного рассмотрения заявка либо принимается к дальнейшей обработке (с присвоением регистрационного номера), либо возвращается клиенту на доработку, либо отклоняется. Результатом этапа является зарегистрированная заявка, готовая к детальному анализу.

Этап 2. Детальное рассмотрение. На втором этапе заявка поступает к специалистам перевозчика (ТЦФТО, АФТО), подключённым к информационной системе АС ЭТРАН НП. Производятся проверка статуса согласования заявок на перевозку грузов железнодорожным транспортом и согласование заявок с участниками перевозочного процесса. При необходимости направляются запросы, телеграммы, осуществляется рассылка массива заявок заинтересованным сторонам. Цель этапа – сформировать консолидированное мнение участников о возможности или невозможности удовлетворения заявки.

Этап 3. Принятие окончательного решения. На заключительном этапе обобщаются решения всех участников перевозочного процесса, после чего принимается окончательное решение о согласовании либо отклонении заявки. Клиент уведомляется о результате. В случае положительного решения данные заявки используются для дальнейшего планирования показателей работы вагонного парка и организации погрузки. В действующей Модели на этом этапе выполняется ввод информации о заявке

в динамическую модель загрузки инфраструктуры (ДМ ЗИ) путём переноса данных из автоматизированной системы централизованной подготовки и оформления перевозочных документов (АС ЭТРАН НП) для проверки пропускных и перерабатывающих способностей железнодорожной инфраструктуры. Если результаты проверки показывают, что загрузка не превышает установленных нормативов, то формируется реестр заявок на перевозку грузов железнодорожным транспортом, а клиент уведомляется о согласовании заявки. В случае превышения допустимых параметров производится перерасчёт графиков подачи вагонов с целью поиска альтернативного варианта организации перевозки. При наличии технической возможности реализации альтернативного графика заявка также включается в реестр, после чего оператор подвижного состава / владелец вагонов информируется о согласовании с учётом скорректированных сроков. Если же альтернативный график не может быть реализован по причине отсутствия необходимых пропускных или перерабатывающих мощностей, заявка отклоняется и возвращается оператору подвижного состава / владельцу вагонов для корректировки параметров перевозки либо повторного согласования в ином временном периоде.

Анализ существующей процессной модели позволил выявить, что внесение данных в ДМ ЗИ осуществляется лишь на завершающем этапе, после прохождения основных этапов согласований. При этом, по информации Территориального центра фирменного транспортного обслуживания (ТЦФТО), совокупное время приёма и рассмотрения заявки на перевозку грузов железнодорожным транспортом составляет не более двух суток, что полностью соответствует требованиям Приказа Министерства транспорта РФ от 17 июля 2025 г. № 216 и гарантирует соблюдение установленных 10–15-дневных сроков рассмотрения [4]. Однако ключевая проблема заключается не в продолжительности процесса, а в его логике и эффективности. Действующая последовательность операций предполагает проведение согласований с участниками перевозочного процесса (этап 2) до момента проверки возможности выполнения перевозки с точки зрения пропускных и перерабатывающих способностей инфраструктуры (этап 3). Это приводит к тому, что трудовые и временные ресурсы специалистов ТЦФТО, перевозчика и иных участников расходуются на согласование заявок, которые впоследствии могут быть отклонены по причине инфраструктурных ограничений. Согласно техническим решениям, реализованным в ДМ ЗИ, динамическая модель способна работать в непрерывном режиме и практически мгновенно реагировать на поступающие заявки на перевозку грузов железнодорожным транспортом, позволяя оценить загрузку инфраструктуры и принять решение о возможности или невозможности выполнения перевозки на самой ранней стадии.

В рамках совершенствования процессной модели предлагается перенести операцию ввода данных в ДМ ЗИ с третьего этапа на первый (ввод данных в ДМ ЗИ параллельно с вводом данных в АС ЭТРАН НП). Технически это означает, что уже на этапе приёма и форматного контроля заявка будет фиксироваться в динамической модели, что может обеспечить раннюю актуализацию данных о планируемой загрузке инфраструктуры, повысить прозрачность процесса для всех участников перевозочного процесса.

Предлагаемые концептуальные изменения блока «Прием и рассмотрение заявок на перевозку грузов железнодорожным транспортом» требуют внесения изменений в пункт 4.5.2 Регламента процесса планирования показателей работы парка порожних грузовых вагонов на железных дорогах ОАО «РЖД» (утвержденного распоряжением № 1397/р от 02.07.2025 г.). Предлагаемые изменения излагаются в следующей редакции: «На основании утвержденных нормативных показателей работы парка порожних грузовых вагонов уполномоченный работник ЦФТО производит параллельный ввод данных по операторам подвижного состава/собственникам вагонов и направленным на согласование заявкам на перевозку грузов железнодорожным транспортом в АС ЭТРАН НП и ДМ ЗИ, для принятия решений о согласовании заявок, после проверки пропускных и провозных способностей инфраструктуры ОАО «РЖД». Уполномоченный работник ЦФТО использует фактические показатели пропускной и провозной способности, загруженные в ДМ ЗИ, для согласования заявки и приема к перевозке порожнего грузового вагона».

На рис. 2 представлены концептуальные предложения по оптимизации 1 этапа приема и рассмотрения заявок на перевозку грузов железнодорожным транспортом процессной модели управления парком порожних грузовых вагонов.

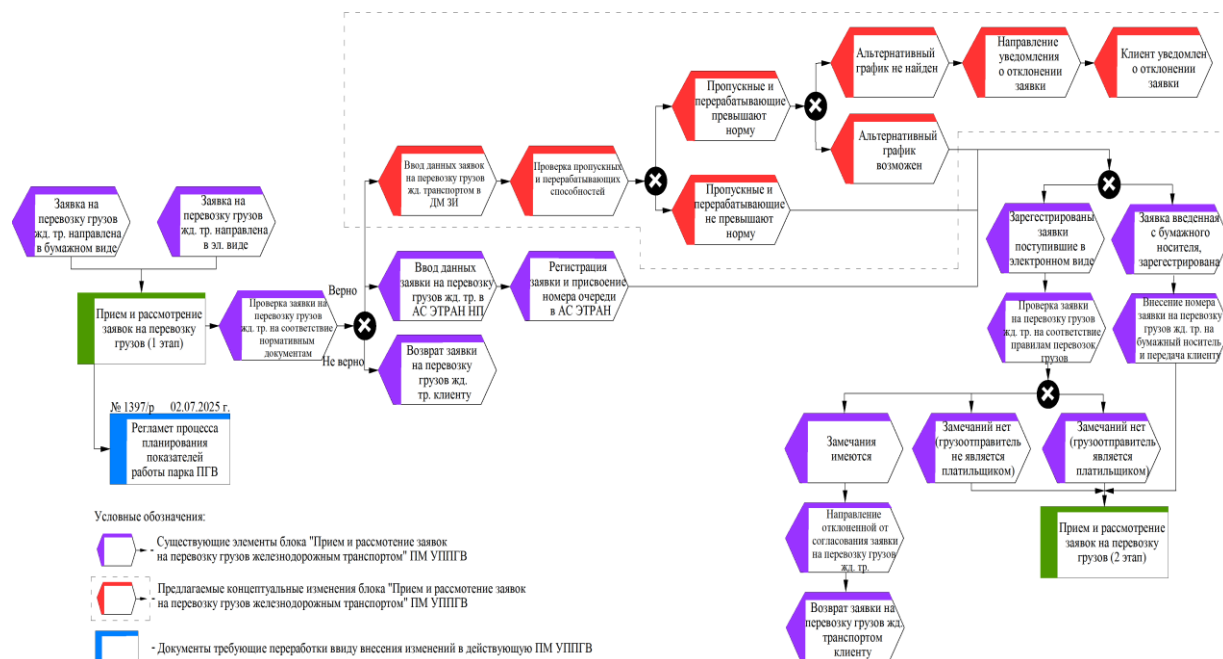


Рис. 2. Концептуальные предложения по оптимизации 1-го этапа приема и рассмотрения заявок на перевозку грузов железнодорожным транспортом процессной модели управления парком порожних грузовых вагонов

Анализ существующего порядка работы с порожними грузовыми вагонами после выгрузки и предложения, направленные на его оптимизацию

Ещё одним недостатком существующей ПМ УППГВ является отсутствие в существующей модели структурного элемента, отвечающего за размещение порожних вагонов после завершения грузовых операций. После окончания грузовых операций на путях общего и необщего пользования дальнейшее перемещение порожнего вагона регламентируется нормами статьи 44 Федерального закона от 10.01.2003 г. №18-ФЗ «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации» и осуществляется в несколько этапов.

После завершения грузовой операции в соответствии с требованиями частей первой, четвертой и пятой статьи 44, после выгрузки грузополучатель обязан очистить вагон внутри и снаружи. Только выполнение этих условий является основанием для дальнейших действий с вагоном. Согласно части двенадцатой статьи 44, подача порожнего грузового вагона с путей необщего пользования на пути общего пользования допускается при наличии оформленной в установленном порядке транспортной железнодорожной накладной. После оформления поездной документации владелец вагона обязан в течение двадцати четырех часов с момента выгрузки либо убрать порожний вагон с мест общего пользования, либо предъявить его к перевозке путем оформления заявки на перевозку грузов железнодорожным транспортом и запроса – уведомления на перевозку порожнего вагона (часть десятая статьи 44). В этот момент определяется дальнейший статус вагона, либо его предъявляют к новой перевозке, либо вагон переходит в разряд невостробованных. Если вагон не предъявлен к перевозке в установленный срок, он начинает находиться на путях общего пользования вне перевозочного процесса. В данном случае, как следует из частей четырнадцатой и семнадцатой статьи 44, владелец вагона обязан вносить плату за пользование инфраструктурой [5]. При этом перевозчик или владелец инфраструктуры вправе переместить такой вагон на иные, утвержденные для отстоя пути, чтобы не допустить скопления на станционных путях и снижения пропускной способности инфраструктуры из-за занятости путей невостробованным вагонным парком.

Рис. 3 демонстрирует существующий порядок работы с порожними вагонами после завершения грузовых операций.



Рис. 3. Существующий порядок работы с порожними вагонами после завершения грузовых операций

Выбор станций отстоя порожних вагонов после завершения грузовых операций в действующей практике производится без применения научно обоснованного подхода, учитывающего эксплуатационные ограничения и экономическую целесообразность, что приводит к нерациональному использованию путевого развития и увеличению порожнего пробега.

Для устранения данного недостатка предлагается дополнить блок «Утверждение нормативных показателей работы парка грузовых вагонов» новым структурным элементом – «Контроль за выгрузкой вагонов и дальнейшая работа с порожним вагонным парком». Предлагаемая структура и логика функционирования данного блока может выглядеть следующим образом:

Этап 1. Мониторинг состояния вагонного парка. На основе ежедневных данных автоматизированной системы организации управления перевозками (АСОУП) выявляются вагоны, не имеющие заявки на перевозку грузов железнодорожным транспортом в течение установленного периода (более 10 суток). Данные вагоны классифицируются по категориям:

- оперативный резерв (прогнозируемый простой до 1–2 месяцев);
- среднесрочный простой (до 6 месяцев);
- требующие ремонта (направляются в вагоноремонтные депо);
- по роду подвижного состава (полувагоны, цистерны, платформы и др.).

Этап 2. Анализ характеристик станций отстоя. Формируется база данных предполагаемых станций, располагающих путями для временного отстоя, с указанием следующих характеристик:

- вместимость;
- географическая привязка к полигону дороги.

Этап 3. Многокритериальный анализ предполагаемых станций отстоя. В существующей практике выбор станций для отстоя порожних грузовых вагонных парков в границах технологических полигонов управления перевозочным процессом в соответствии с Единым сетевым технологическим процессом железнодорожных грузовых перевозок (утвержденного распоряжением ОАО «РЖД» № 4/р от 09.01.2020 г.) осуществляется, исходя из недопущения роста дополнительных затрат, связанных с потерей «ниток» графика, привлечением дополнительных локомотивов и локомотивных бригад, а также исходя из принципов гарантированного обеспечения безопасности движения поездов и сохранности подвижного состава, технического оснащения станций и факторов, влияющих на их пропускную и перерабатывающую способность [7].

Однако, в ходе анализа работы ОАО «РЖД» с избыточным вагонным парком было установлено, что выбор станций для отстоя вагонов осуществляется строго в соответствии с утвержденными документами, в которых приведены перечни конкретных станций и путей, предназначенных для временного размещения подвижного состава. Так, распоряжением № КБШ Н31-75/р от 12.08.2025 г. утверждён перечень путей станций для размещения порожних грузовых вагонов в рамках оказания услуги по согласованному нахождению вагонов на путях общего пользования (отстой до 3 месяцев); а распоряжением № КБШ Н31-31/р от 18.03.2025 г. – перечень путей для отставления поездов (отстой до 1 месяца). Важно отметить, что станции, включенные в эти перечни, определены без применения единой методики и проведения расчетов по установленным критериям выбора, что подтверждает актуальность настоящего исследования. В связи с отсутствием такой методики авторами предлагается разработать и внедрить систему критериев, которая будет основополагающей для методической многокритериальной оценки пригодности станций для размещения невостребованного вагонного парка.

Одним из основных критериев предлагается принять *коэффициент загрузки элементов станционной инфраструктуры*, характеризующий степень использования путевого развития станции. Размещение невостребованного вагонного парка требует наличия свободного инфраструктурного ресурса,

достаточного для размещения вагонов без существенного ухудшения эксплуатационной работы станции. При высоком уровне загрузки инфраструктуры дополнительное занятие путей приводит к снижению резервов перерабатывающей способности, а также росту вероятности возникновения затруднений в работе станции. Для обеспечения эффективной работы станции при определении допустимых значений следует ориентироваться на среднюю загрузку элементов станционной инфраструктуры в размере не более 70 %, что соответствует распространённой в отрасли практике для сохранения 30 % резерва. Следовательно, предпочтение должно отдаваться станциям, обладающим наибольшим инфраструктурным резервом, что соответствует минимальному значению коэффициента загрузки элементов станционной инфраструктуры. Также при оценке станции должны учитываться не только среднемесячные показатели, но и сезонные колебания объёмов перевозок, а также оперативные факторы (ремонтные «окна», временные ограничения движения и пр.).

В качестве второго критерия предлагается использовать *пропускную способность участков следования порожних вагонопотоков к станции отстоя*. Данный показатель определяет возможность продвижения вагонов к месту размещения без создания дополнительной нагрузки на железнодорожную сеть. В соответствии с Методикой определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования, утверждённой Приказом Минтранса России от 18 июля 2019 г. № 266, для эффективной работы железнодорожной сети рекомендуется ориентироваться на загрузку участков не более 80 % от наличной пропускной способности для однопутных линий и не более 85 % для двухпутных (т.е. резерв порядка 15–20 %). Недостаточный резерв пропускной способности на подходах к станции может приводить к увеличению времени доставки вагонов. Использование данного критерия позволяет оценить не только характеристики станции отстоя, но и возможности прилегающих к ней участков для освоения дополнительных порожних вагонопотоков.

Наряду с инфраструктурными и технологическими характеристиками важное значение имеют эксплуатационные затраты, возникающие при перемещении вагонов на станции отстоя. Для их учета одним из критериев предлагается рассматривать *удаленность станции отправления порожнего вагона до станции отстоя*. Значение данного показателя непосредственно влияет на величину дополнительного порожнего пробега вагонов, потребность в тяговых ресурсах и загрузку инфраструктуры. В связи с этим критерием выбора станции отстоя также должно являться *недопущение дополнительных экономических затрат, связанных с перемещением порожнего вагона*, что достигается за счет минимизации расстояния его следования к месту размещения. Поэтому при прочих равных условиях более предпочтительными являются станции, расположенные на минимальном расстоянии от места нахождения порожнего вагонного парка требующего размещения.

Таким образом, в настоящее время для выбора станций отстоя порожних вагонов используются отдельные, разрозненные критерии, каждый из которых применяется изолированно, без их комплексного учёта. Отсутствует формализованная процедура выбора оптимального места размещения невостребованного вагонного парка, которая одновременно учитывала бы загрузку станционной инфраструктуры, пропускную способность прилегающих участков и эксплуатационные затраты на порожний пробег. Следовательно, разработка единой многокритериальной методики, объединяющей указанные показатели, является актуальной научно-практической задачей, решение которой позволит повысить обоснованность принимаемых решений и эффективность использования железнодорожной инфраструктуры.

Этап 4. Согласование и утверждение плана размещения. Ранжированные перечни оптимальных станций отстоя для каждой категории вагонов передаются в отделы породовой погрузки и выгрузки Дорожных центров управления перевозками (ДЦУП). Сменные инженеры отделов рассматривают предложенные варианты размещения невостребованного вагонного парка, корректирует их с учётом оперативной обстановки (ремонтные работы, закрытие участков) и утверждает план отстоя. При этом контролируется заполнение путей (не более 80 % вместимости для сохранения эффективной маневровой работы).

Этап 5. Маршрутизация и перемещение. На основе утверждённого плана формируются маршрутные составы или группы вагонов для отправки на выбранные станции отстоя. В случае срочного возникновения потребности в вагоне (появление заявки на перевозку грузов) предусмотрен механизм оперативного вывода из отстоя.

На рис. 4 изображен предлагаемый порядок работы с порожними вагонами после завершения грузовых операций.



Рис. 4. Предлагаемый порядок работы с порожними вагонами после завершения грузовых операций

Внедрение предлагаемого структурного элемента в процессную модель управления порожним парком вагонов позволит решить следующие задачи:

- сократить порожний пробег вагонов за счёт выбора ближайших предназначенных для отстоя станций и путей необщего пользования;
- повысить участковую скорость движения и, как следствие, общую скорость доставки грузов за счёт уменьшения нерациональных перемещений порожнего подвижного состава;
- увеличить пропускные и перерабатывающие способности станций путём исключения их загрузки избыточным парком, не задействованным в перевозочном процессе.

Выводы

Проведённый анализ существующей процессной модели управления парком порожних грузовых вагонов позволил выявить два ключевых системных недостатка, снижающих эффективность использования инфраструктуры и мероприятий по приему и рассмотрению заявок на перевозку грузов. Реализация предложенного мероприятия по переносу ввода данных в ДМ ЗИ из 3-го этапа в 1-й не требует значительного изменения существующей технологии работы и может быть осуществлена за счёт модернизации информационного взаимодействия между АС ЭТРАН НП и ДМ ЗИ.

Реализация предложенного мероприятия по введению дополнительного структурного элемента «Контроль за выгрузкой вагонов и дальнейшая работа с порожним вагонным парком» в процессную модель управления парком порожних вагонов, позволит перейти к научно обоснованному выбору и оценке возможных организационно-управляющих решений, связанных с временным размещением (отстоем) незадействованных в перевозках грузовых вагонов. В дальнейших исследованиях предполагается разработка методики оптимального размещения невостребованного вагонного парка на сети российских железных дорог, базирующейся на системе технико-технологических критериев и методах многокритериального анализа.

Ожидаемыми результатами от введения предложенных мероприятий являются сокращение дополнительных временных затрат на этапе приема и рассмотрения заявок на перевозку грузов железнодорожным транспортом, снижение порожнего пробега, повышение участковой скорости движения поездов, пропускной способности линий и перерабатывающей способности станций.

Список литературы

- 1 Свод правил моделирования процессов ОАО «РЖД» от 04.04.2024 г. № 859/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2024. – 138 с.

References

- 1 Code of practice for process modeling of JSC Russian Railways dated April 4, 2024 No. 859/r. – Moscow : JSC Russian Railways, 2024. – 138 p.

2 Регламент процесса планирования показателей работы парка порожних грузовых вагонов на железных дорогах ОАО «РЖД» № 1397/р от 07.07.2025 г. – Москва : ОАО «РЖД», 2025. – 20 с.

3 Порядок сквозного производственного планирования объемов работ и потребности в ресурсах филиалов ОАО «РЖД» № 2603/р от 25.11.2020 г. – Москва : ОАО «РЖД», 2020. – 84 с.

4 Федеральный закон от 10.01.2003 N 18-ФЗ «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40444/ (дата обращения: 24.06.2026).

5 Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 17 июля 2025 г. № 216 «Об утверждении Правил приема перевозчиком заявок грузоотправителей на перевозку грузов железнодорожным транспортом». – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/412557865/> (дата обращения: 24.06.2026).

6 **Москвичев, О. В.** Проблема профицита вагонного парка и механизмы его регулирования в практике ОАО «РЖД» / О. В. Москвичев, Е. А. Куприянова // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. – № 5 (113). – С. 90–95. – EDN TQUJXB.

7 Единый сетевой технологический процесс железнодорожных грузовых перевозок от 09.01.2020 г. № 4/р. – URL: <https://base.garant.ru/73666194/> (дата обращения: 24.06.2026).

8 **Иванков, А. Н.** Эффективное управление вагонными парками на основе развития железнодорожной сети и тарифного регулирования / А. Н. Иванков, П. К. Рыбин, М. В. Четчуев // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». – 2025. – № 10-1. – С. 56–58. – EDN MDLUUR.

9 **Бородин, А. Ф.** Емкость железных дорог и управление вагонными парками / А. Ф. Бородин // РЖД-Партнер. – 2011. – № 5. – С. 32–34. – ISSN 1607-3290.

10 Цифровые технологии в управлении перевозочным процессом : учебное пособие / О. В. Москвичев, А. Т. Осминин, Е. Е. Москвичева, А. В. Кабанов. – Самара, 2023. – 206 с. – ISBN 978-5-98941-372-0.

2 Regulations for the process of planning performance indicators for the empty freight wagon fleet on the railways of JSC Russian Railways No. 1397/r dated July 7, 2025. – Moscow : JSC Russian Railways, 2025. – 20 p.

3 Procedure for end-to-end production planning of work volumes and resource requirements for branches of JSC Russian Railways No. 2603/r dated November 25, 2020. – Moscow : JSC Russian Railways, 2020. – 84 p.

4 Federal Law of 01/10/2003 No. 18-FZ “Charter of Railway Transport of the Russian Federation”. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40444/ (date of access: 06/24/2026).

5 Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 216 of July 17, 2025 “On Approval of the Rules for the Carrier's Acceptance of Shippers' Requests for the Carriage of Goods by Rail” – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/412557865/> (date of access: 06/24/2026).

6 **Moskvichev, O. V.** The Problem of wagon fleet surplus and mechanisms for its regulation in the practice of JSC Russian Railways / O. V. Moskvichev, E. A. Kupriyanova // Vestnik Transporta Povolzhya. – 2025. – No. 5 (113). – P. 90–95. – EDN TQUJXB.

7 Unified network technological process for railway freight transportation, dated 01/09/2020, No. 4/r. – URL: <https://base.garant.ru/73666194/> (date of access: 06/24/2026).

8 **Ivankov, A. N.** Effective management of car fleets based on railway network development and tariff regulation / A. N. Ivankov, P. K. Rybin, M. V. Chetchuev // Bulletin of the Scientific Council of JSC “IERT”. – 2025. – No. 10-1. – P. 56–58. – EDN MDLUUR.

9 **Borodin, A. F.** Railway capacity and car fleet management / A. F. Borodin // RZD-Partner. – 2011. – No. 5. – P. 32–34. – ISSN 1607-3290.

10 Digital technologies in traffic management : a textbook / O. V. Moskvichev, A. T. Osminin, E. E. Moskvicheva, A. V. Kabanov. – Samara, 2023. – 206 p. – ISBN 978-5-98941-372-0.

O. V. Moskvichev, A. T. Osminin, E. E. Moskvicheva, E. A. Kupriyanova

CONCEPTUAL PROPOSALS FOR OPTIMIZING THE PROCESS MODEL FOR MANAGING A FLEET OF EMPTY FREIGHT CARS

Abstract. The article discusses the improvement of the process model for managing the fleet of empty freight cars in Russian Railways. An analysis of the current model, developed based on the Regulations for the process of planning the performance indicators of the fleet of empty freight cars on the railways of JSC Russian Railways No. 1397/r dated 02.07.2025, was conducted, which revealed two systemic shortcomings: the verification of the throughput and

processing capacities of the infrastructure using a dynamic model of infrastructure loading only at the final stage of reviewing applications for railway cargo transportation, as well as the lack of a formalized mechanism for selecting stations for empty car parking after unloading. To eliminate the identified shortcomings, the authors proposed measures to transfer the data input to the DM ZI to the first stage of processing applications and introduce a new structural element «Control over unloading and further work with empty car fleet» into the process model. Implementation of these measures will reduce application review times, decrease empty mileage, increase section speed, line throughput, and station handling capacity.

Keywords: process model, empty wagon fleet management, transportation planning, rolling stock operators, wagon owners, dynamic infrastructure load model, Russian Railways JSC.

For citation: Conceptual proposals for optimizing the process model for managing a fleet of empty freight cars / O. V. Moskvichev, A. T. Osminin, E. E. Moskvicheva, E. A. Kupriyanova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 165–174. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_165.

Сведения об авторах

Москвичев Олег Валерьевич

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Управление эксплуатационной работой», доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой, e-mail: moskvichev063@yandex.ru

Осьминин Александр Трофимович

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Управление эксплуатационной работой», доктор технических наук, профессор, e-mail: at@osminin.com

Москвичева Елена Евгеньевна

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы», кандидат технических наук, доцент, e-mail: e.moskvicheva@samgups.ru

Куприянова Елизавета Алексеевна

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Управление эксплуатационной работой», преподаватель, e-mail: e.kupriyanova@samgups.ru

Information about the authors

Moskvichev Oleg Valerievich

Volga State Transport University (VSTU), Chair “Operational Management”, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Chair, e-mail: moskvichev063@yandex.ru

Osminin Alexander Trofimovich

Volga State Transport University (VSTU), Chair “Operational Management”, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: at@osminin.com

Moskvicheva Elena Evgenievna

Volga State Transport University (VSTU), Chair “Freight and Commercial Operations Technology, Stations and Junctions”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: e.moskvicheva@samgups.ru

Kupriyanova Elizaveta Alekseevna

Volga State Transport University (VSTU), Chair “Operational Management”, Lecturer, e-mail: e.kupriyanova@samgups.ru

А. А. Муравьев, В. С. Колокольников

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ КОРРЕКТНОСТИ РАСЧЕТА ЗАГРУЗКИ СТРЕЛОЧНЫХ ГОРЛОВИН

Аннотация. Рассматривается актуальный вопрос, связанный с повышением точности расчета пропускной способности объектов железнодорожного транспорта. Для решения этой проблемы авторами предложен новый подход к определению загрузки стрелочных горловин – кроме занятости передвижениями и плановым техническим обслуживанием с помощью разработанного алгоритма будут учтены структурные (технологические) потери. Суть алгоритма заключается в поэлементном анализе занятости стрелочных групп: рассматриваются промежутки времени, когда стрелка фактически не была занята передвижениями, но могла бы, если бы не возникла враждебность. С использованием метода имитационного моделирования на реальных объектах выполнена верификация нового подхода. Приведено сравнение результатов, получаемых при использовании различных методов расчета: аналитического (по действующей Инструкции ОАО «РЖД» № 545/р), с использованием модели, с использованием модели и предлагаемого алгоритма.

Ключевые слова: стрелочная горловина, структурные потери, методика расчета пропускной способности, имитационное моделирование, сортировочная станция, угольный терминал, горно-обогатительный комбинат.

Для цитирования: Муравьев, А. А. К вопросу о повышении корректности расчета загрузки стрелочных горловин / А. А. Муравьев, В. С. Колокольников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 175–185. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_175.

Введение

Исследования стрелочных горловин напрямую связаны с определением пропускной способности железнодорожных станций, ликвидацией «узких мест» на грузонапряженных участках и направлениях с интенсивным движением поездов [1–3]. В научных публикациях неоднократно подчеркивалось, что *загрузка стрелок включает в себя не только непосредственно занятость передвижениями, но также структурные и функциональные потери*, которые, соответственно, возникают при наличии враждебности маршрутов и при отсутствии готовых технологических операций [4–6]. Однако вопрос о том, каким образом их можно учитывать, до сих пор остается открытым. Повышение мощности компьютерных программно-вычислительных комплексов в совокупности с постоянно совершенствующимся методом имитационного моделирования дают возможность получать объективную картину о пропускной и перерабатывающей способностях объектов железнодорожной инфраструктуры.

Результаты исследования стрелочных горловин, о которых пойдет речь в данной статье, получены с использованием разработанной коллективом научной школы УрГУПС системы имитационного моделирования ИСТРА-САПР, которая рекомендована к использованию в ОАО «РЖД» [7] и широко применяется при оценке пропускной и перерабатывающей способности железнодорожной инфраструктуры в рамках отечественных и зарубежных инвестиционных проектов [8–10].

Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» № 545/р от 04.03.2022 [11] содержит ряд допущений, которые оказывают весьма значимое влияние на результат. В то же время существующая методология имитационных расчетов учитывает лишь время занятия стрелочных переводов передвижениями, что зачастую приводит к заниженным показателям загрузки устройств, несмотря на наличие существенных задержек из-за элементов горловины при выполнении технологических операций.

Основная часть

С целью повышения корректности расчета загрузки стрелочных горловин авторами предлагается:

1 При определении загрузки стрелочных групп учитывать структурные потери элемента, возникающие из-за враждебности передвижений.

2 Использовать разработанный алгоритм учета структурных потерь при расчете загрузки элементов стрелочных групп. Инструкция ОАО «РЖД» № 545/р учитывает враждебность в горловине

лишь при определении результирующей пропускной способности с помощью одного коэффициента. Напротив, предлагаемый алгоритм позволяет определять долю структурных потерь для каждой стрелочной группы.

3 Определять загрузку стрелочных горловин и их пропускную способность с использованием метода имитационного моделирования. Он позволяет не только учитывать схему путевого развития, технологию работы объекта, но также, в отличие от аналитического подхода, случайные процессы и элементы диспетчерского управления.

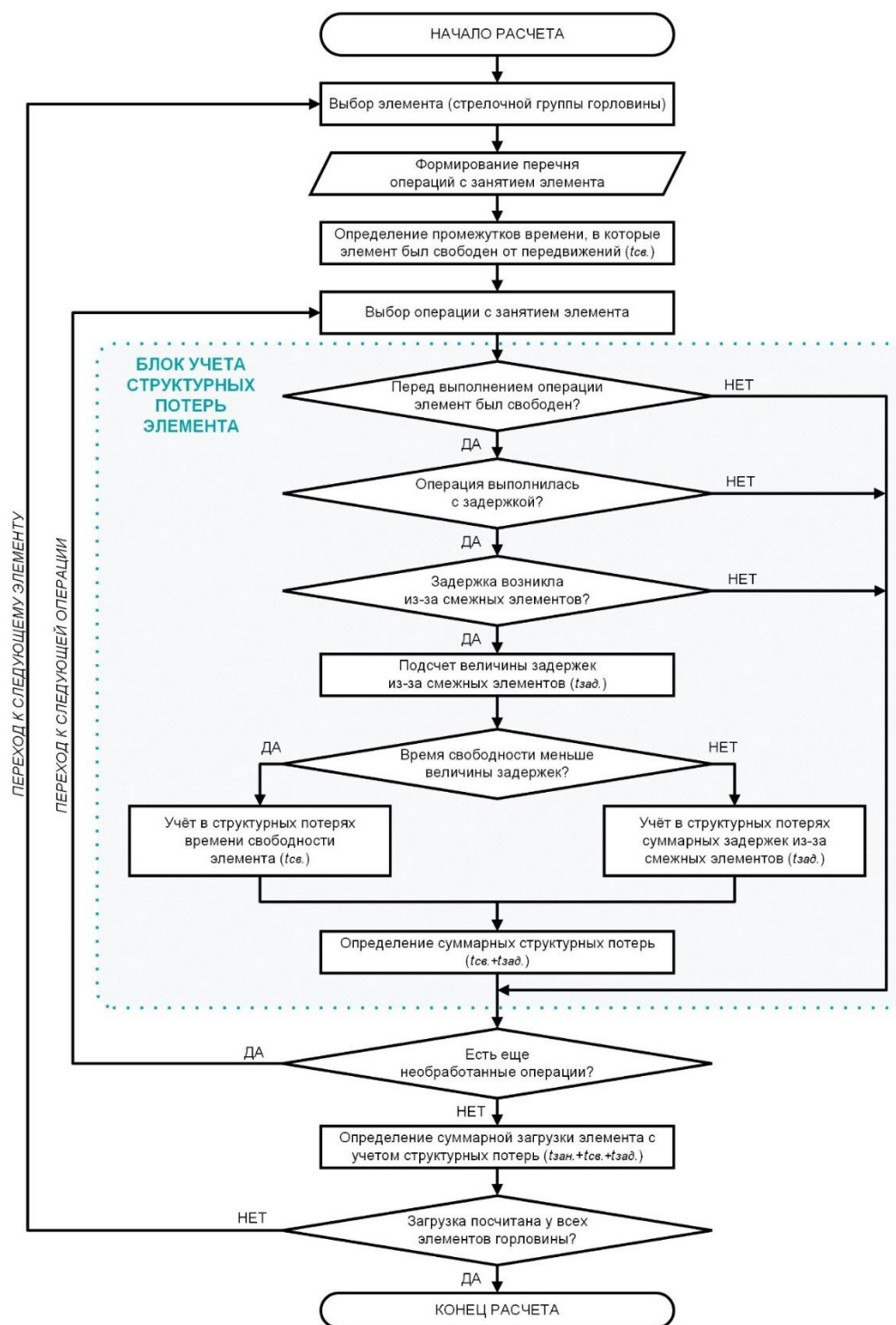


Рис. 1. Алгоритм расчета загрузки стрелочных групп горловин с учетом структурных потерь

Суть предлагаемого алгоритма учета структурных потерь заключается в поэлементном анализе занятости стрелочных групп в горловине (рис. 1). В частности, для отдельно взятой группы стрелочных

переводов рассматриваются промежутки времени, когда она фактически не была занята передвижениями, но могла бы, если не возникла враждебность. Это позволяет не выходить за рамки суток, принимаемых за предельное (100 %) теоретическое значение загрузки устройства. Перечень выполненных операций выдается в качестве результатов расчетов на модели, однако дальнейшие описываемые действия еще предстоит автоматизировать. На основании перечня определяются промежутки времени, в которые элемент был свободен от передвижений, а затем по суточному плану-графику выбирается операция с занятием рассматриваемой стрелочной группы горловины. В параметрах каждой операции представлена детализация о времени занятия элементов инфраструктуры и использованных ресурсах (рис. 4), а также указаны элементы, вызвавшие задержку (при ее наличии). Необходимо определить, почему занятости не было – либо из-за отсутствия готовой операции (функциональные потери), либо из-за занятости горловины враждебным маршрутом (структурные потери). При структурных потерях операция будет иметь задержки – производится подсчет их суммарной величины за период расчета, а также определяется среднесуточное значение. Как показывает практика, доля задержек из-за других элементов структуры уменьшается по мере отдаления от рассматриваемого элемента, поэтому для рассматриваемой стрелочной группы предлагается учитывать задержки из-за стрелочных групп этой же горловины, а также из-за примыкающих к ней путей.

Суммарная загрузка элемента с учетом структурных потерь, времени его занятия текущим обслуживанием, плановыми видами ремонта или снегоуборкой тогда будет определяться по формуле:

$$T = \frac{t_{\text{зан.}} + t_{\text{стр.}} + t_{\text{тех.}}}{1440},$$

где $t_{\text{зан.}}$ – время непосредственной занятости элемента передвижениями, мин;
 $t_{\text{стр.}}$ – структурные потери элемента, возникающие из-за враждебности передвижений, мин;
 $t_{\text{тех.}}$ – время занятия горловины текущим обслуживанием, плановыми видами ремонта или снегоуборкой, мин.

С целью верификации предлагаемого алгоритма рассмотрена горловина станции необщего пользования горно-обогатительного комбината с наибольшей интенсивностью передвижений (рис. 2). Основные маршруты, по которым выполняются передвижения, связаны с заездом/выездом маневрового локомотива, подачей порожних вагонов на пункты погрузки и уборкой с фронтов груженых вагонов, подачей и уборкой вагонов на взвешивание, расформированием поездов и др.

Основные категории прибывающих поездов следующие:

- 1) порожний маршрут из полувагонов;
- 2) порожний маршрут из вагонов-хопперов;
- 3) порожний маршрут из полувагонов и вагонов-хопперов;
- 4) порожний маршрут из полувагонов для перевозки окатышей;
- 5) сборный поезд.

Технология обработки каждого поезда может меняться в зависимости от наличия или отсутствия негодных под погрузку вагонов, необходимости подготовки под погрузку, выбора пункта погрузки и груза, необходимости взвешивания и дозировки и т.п. Для каждого поезда может быть предусмотрено от одного до восьми вариантов технологии обслуживания на пути необщего пользования. Количество сочетаний в данном случае превышает тысячу, что свидетельствует о громоздкости и сложности аналитического расчета. Тем не менее при одинаковом входящем потоке значение загрузки стрелочной горловины, рассчитанное аналитическим методом, может варьироваться от 54 до 77 % в зависимости от принятой технологии. На рис. 3 все возможные получаемые значения сведены в «диаграмму размаха». Здесь прямоугольник содержит 50 % данных, согласно которым загрузка составляет от 62 до 68 %, медианная линия (65 %) делит его пополам, что свидетельствует о симметричности распределения. При этом видно, что пограничные значения, не относящиеся к выбросам в выборке, составляют диапазон от 54 до 77 %. Проектирование станций с использованием такой методики неизбежно приведет к ошибочным решениям.

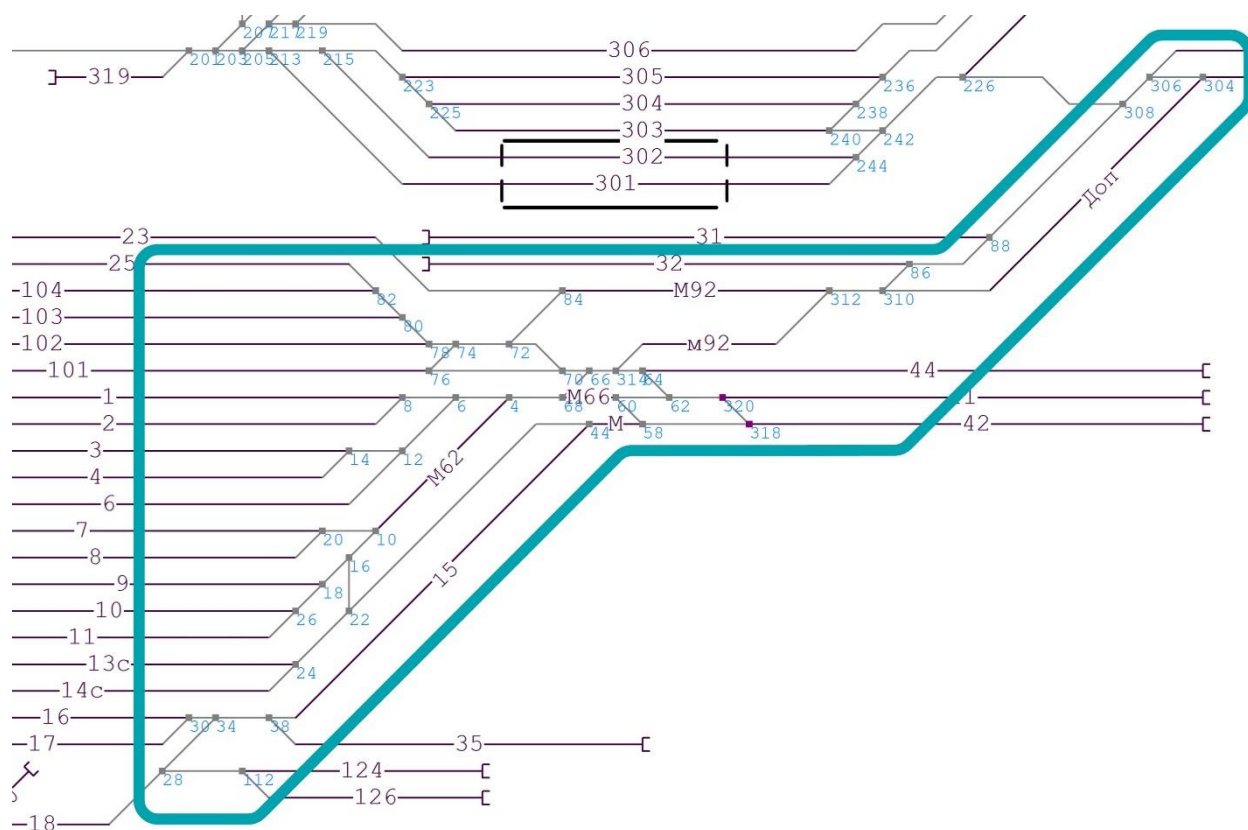


Рис. 2. Стрелочная горловина горно-обогатительного комбината

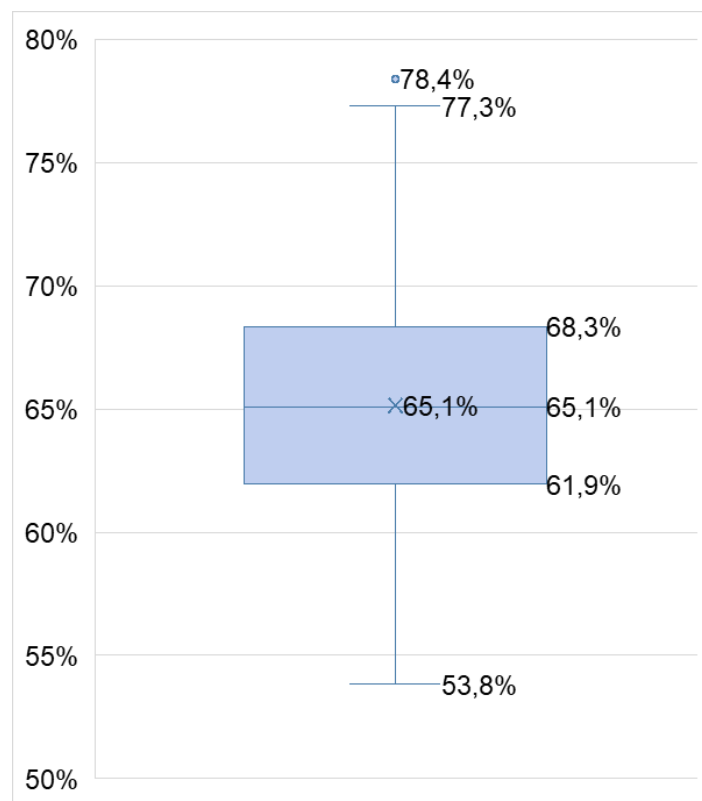


Рис. 3. Загрузка стрелочной горловины, получаемая аналитическим расчетом (> 1000 возможных вариантов технологии)

Для сравнения выполнен расчет загрузки той же горловины на имитационной модели с использованием программного комплекса ИСТРА-САПР. Согласно расчетам (табл. 1), одна из наиболее загруженных групп стрелочных переводов (№ 62, 320) занята передвижениями 10,8 ч в сутки (45 %), при этом вызывает на 1,5 ч больше задержек (в среднем в сутки), чем группа, включающая стрелки № 4, 6, 8, 12, 14, 68, и имеющая большую занятость передвижениями (62 %). При этом наиболее загруженный элемент и по аналитическому расчету, и по расчетам на имитационной модели совпадает, хотя и отличаются численные значения.

Таблица 1

Загрузка стрелочных групп в горловине и задержки из-за них

группа стрелок	граф. загрузка	загрузка	задержка из-за
Стр.4,6,8,12,14,68		62,2 %	12:58
Стр.60		45,7 %	2:15
Стр.62,320		45,1 %	14:25
Стр.10,16,18,20,26		44,7 %	4:36
Стр.86,88,306,308		35,1 %	5:53
Стр.64,66,70,314		30,0 %	8:49
Стр.72,74,78,80,82		20,3 %	1:50
Стр.58,318		19,3 %	0:35

Ни по аналитической методике, ни по результатам модели не удалось получить критических высоких значений, близких к 100 %. Однако модель показывает, что, несмотря на высокую загрузку других элементов (путей, локомотивов и др.), наблюдаются и высокие задержки из-за стрелочной горловины, а увеличение потока не осваивается.

Рассмотрим одну из выполненных операций подробнее. Согласно данным рис. 4, уборка груженых полувагонов с концентратом готова была выполняться в 6 ч 28 мин, однако из-за занятости стрелки № 60 начала выполняться на 5 мин позже.

Элемент	Название	Команда	Тнач	Занятость	ΔТиз-за	ΔТна	ΔVal
ЛОГ1	Фиктивный	БА(Ф)	[2] 06:28	00:00		00:00	
ВХОД6			[2] 06:28				
ЛОГ154	Маневровый	БА(Ф)	[2] 06:28	00:07		00:05	
ЛКМ1	Лок.Маневровый тепловоз	ЛКМ+	[2] 06:33				-1
БУ15	Лок.Маневровый тепловоз	БУ—	[2] 06:33				-1
ЛОГ135	Стр.62,320	ПР	[2] 06:33	00:02			
ЛОГ113	Стр.60	ПР	[2] 06:33	00:02	00:05		
ЛОГ35	М66 п. соединительный	ПР	[2] 06:33	00:02			
ЛОГ138	Стр.4,6,8,12,14,68	ПР	[2] 06:33	00:02			
ЛОГ88	М62 п. соединительный	ПР	[2] 06:33	00:02			
ЛОГ144	Стр.10,16,18,20,26	ПР	[2] 06:33	00:02			
ЛОГ100	9 п. парка Погрузка концентрата ПВ	ПР(Н)	[2] 06:33	00:02			
ЛОГ100	9 п. парка Погрузка концентрата ПВ	ПР(С)	[2] 06:35	00:00			
ЛКМ1	Лок.Маневровый тепловоз	ЛКМ=	[2] 06:35				100
			[2] 06:35				

Локомотив группы Лок.Маневровый тепловоз взят в Маневровый в 1833
 С пути Путь 9 ПВ парк Погрузка концентрата ПВ в 1849 переставлено 24(ГРУЖПВКОНЦ:24) вагонов
 На Путь 41 ВЫТ в 1849 переставлено 24(ГРУЖПВКОНЦ:24) вагонов
 Локомотив группы Лок.Маневровый тепловоз освобожден на Путь 41 ВЫТ в 1849

Рис. 4. Параметры выполнения операции с указанием времени и причины задержки

На суточном плане-графике видно, что в период с 6:28 до 6:33 стрелки № 62, 320 были свободны, но эта свобода вызвана наличием другого, враждебного передвижения (рис. 5). Операция задействует 4 группы стрелочных переводов, при этом в качестве структурных потерь необходимо учитывать 5 мин только для группы стрелок № 62, 320, потому что остальные группы были фактически заняты. Аналогичным образом определяются структурные потери для остальных стрелочных групп. Важно подчеркнуть, что имитационная модель позволяет учитывать совместное влияние маршрутов в горловине. Все элементы (пути, стрелки), входящие в заданный маршрут, имеют логическую занятость – это означает, что никакое другое передвижение с использованием тех же элементов будет невозможно до момента их освобождения. Продолжительность занятия маршрута зависит от его протяженности, скорости движения по элементам и учитывается при задании параметров операции. Технолог может задать время выполнения операции фиксированное или с учетом случайного разброса, а также с возможной или обязательной остановкой на промежуточных элементах.

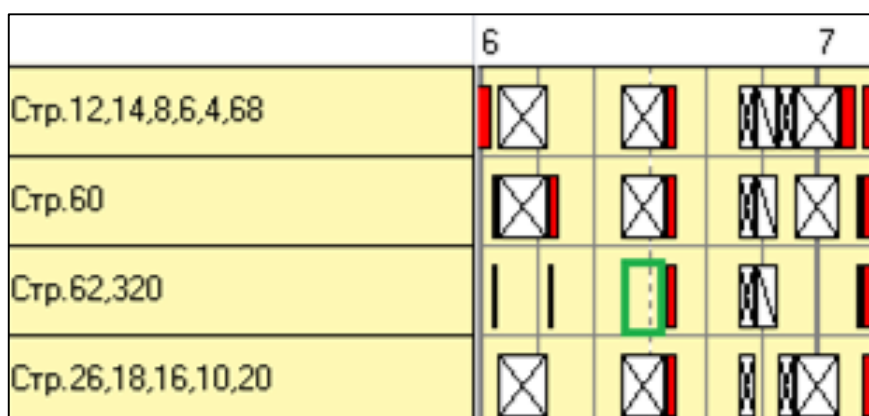


Рис. 5. Фрагмент суточного плана-графика (зеленым показаны структурные потери, которые необходимо учитывать при расчете загрузки стрелок № 62, 320)

В целом анализ данной горловины показал, что разница в занятости элементов при различных подходах к расчету может быть почти двукратной. Так, при учете только занятости передвижениями один из элементов с наибольшим числом передвижений загружен лишь на 45 %, а с учетом возникающих структурных потерь это значение возрастает до 74 % и фактически является предельным при действующей технологии работы. Доля структурных потерь при этом может быть существенна. В результате сложения ее с временем занятости передвижениями ранжирование стрелочных групп по значению загрузки может изменяться.

В качестве еще одного примера рассмотрена стрелочная горловина на территории станции одного из угольных перегрузочных терминалов (рис. 6). Здесь, так же как и на горно-обогатительном комбинате, возможно применение гибкой технологии работы в зависимости от эксплуатационной обстановки. Так, выгруженные на грузовом фронте вагоны накапливаются на путях № 18–23, 30–32, а затем переставляются преимущественно на приемоотправочные пути парка № 2, однако при их занятости состав может быть выставлен на любой свободный путь парка № 1. Аналитический расчет загрузки горловины по методике, описанной в Инструкции ОАО «РЖД» № 545/р, показал, что можно получить как результат, свидетельствующий о наличии резервов пропускной способности, так и противоположную картину, при которой фактически горловина будет требовать развития (см. рис. 6). Например, при выставлении всех составов под отправлением с путей накопления № 18–23, 30–32 в парк № 2 загрузка рассмотренной горловины составит 53 %. При выставлении пяти составов (15 % от общего количества) в парк № 1 загрузка возрастает до 64 %.

Проблема заключается в том, что технолог, выполняющему расчет горловин сложных с технологической точки зрения объектов, заранее достоверно неизвестно, откуда и куда будут выполняться передвижения. Количество маршрутов трудно оценить по причине того, что существует зависимость от эксплуатационной обстановки, сезонности спроса груза, и в целом оно может быть определено только в динамике. На практике это приводит к тому, что аналитический подход является инструментом для манипуляций: зачастую расчет «подгоняется» под уже принятые и утвержденные ранее основ-

ные технические решения, а методика позволяет в зависимости от объема рассмотренной вариативности технологии получать нужные значения по загрузке устройств. То есть в результате можно показать как наличие резерва пропускной способности, так и его нехватку.

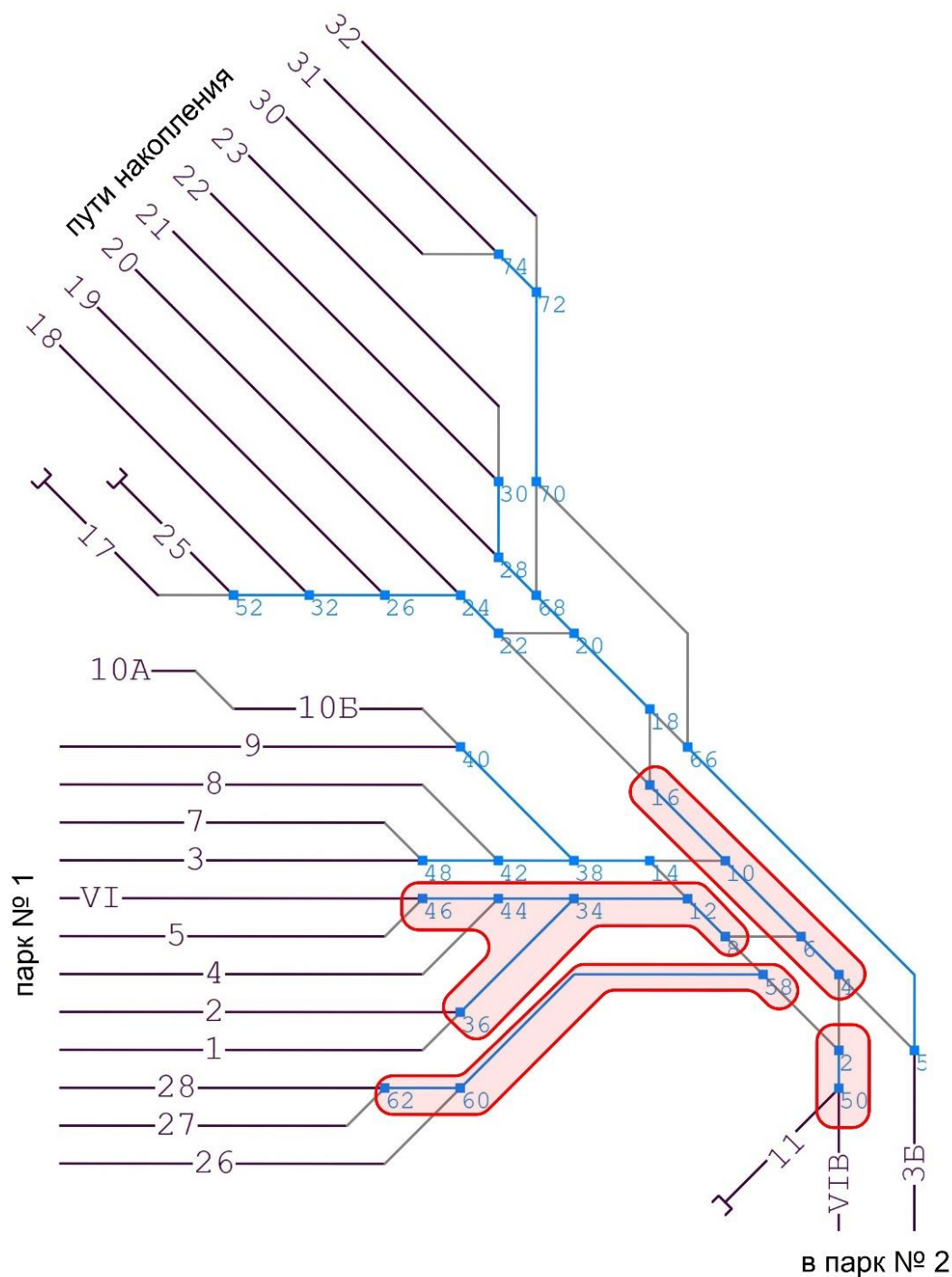


Рис. 6. Расчетные элементы стрелочной горловины угольного терминала

В качестве еще одного примера выбрана предгорочная горловина односторонней сортировочной станции. Красными столбцами показана загрузка стрелочных групп без учета, а зелеными – с учетом структурных потерь (рис. 7). Результаты расчетов по новой методике частично меняют общую картину. Видно, что для некоторых элементов учет структурных потерь приводит к кратному увеличению их загрузки. Изменяется также и наиболее загруженная стрелочная группа.

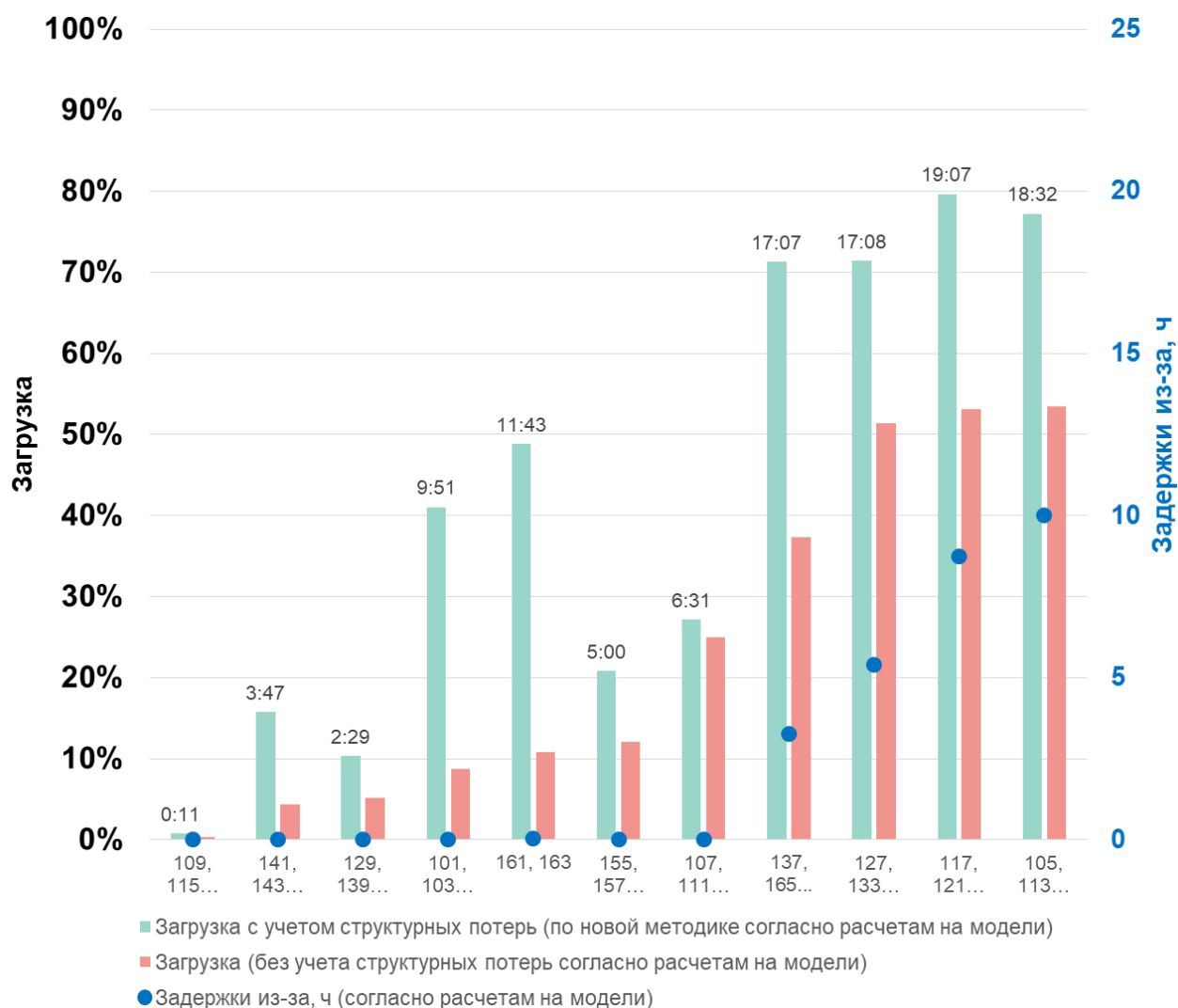


Рис. 7. Загрузка стрелочной горловины односторонней сортировочной станции

В табл. 2 представлена сводная информация по результатам расчетов стрелочных горловин на трех объектах – односторонней сортировочной станции, станции необщего пользования на горно-обогатительном комбинате и станции на угольном перевалочном терминале. Расчеты выполнялись аналитическим методом (по действующей Инструкции ОАО «РЖД» № 545/р) и на имитационной модели без учета и с учетом структурных потерь (согласно предлагаемой методике).

Таблица 2

Загрузка стрелочных горловин при различных подходах к расчету

Способ расчета	Загрузка расчетной стрелочной горловины на различных объектах		
	Односторонняя сортировочная станция	Горно-обогатительный комбинат	Угольный перегрузочный терминал
Аналитический по Инструкции ОАО «РЖД» № 545/р	55–57	54–77	53–79
Имитационное моделирование без учета структурных потерь	53	45	44
Имитационное моделирование с учетом структурных потерь	80	74	67

Важно заметить, что расчеты по Инструкции ОАО «РЖД» № 545/р для односторонней сортировочной станции общего пользования имеют сравнительно большую точность и меньший возможный разброс получаемых значений. Это связано с тем, что технология их работы, как правило, является постоянной на протяжении длительного времени. В случае с путями необщего пользования сравнительно больший диапазон значений загрузки стрелочной горловины объясняется обширным количеством возможных вариантов обработки поездов и вагонов по причине того, что между предприятиями и железнодорожной инфраструктурой возникают сильноуправляемые связи. В целом результаты расчетов по данным объектам показали, что наиболее точные значения загрузки стрелочной горловины могут быть получены только с использованием метода имитационного моделирования при дополнительном учете величины структурных потерь согласно предлагаемому алгоритму.

Выводы

Таким образом, в данной статье рассмотрен вопрос, связанный с повышением точности расчета пропускной способности объектов железнодорожного транспорта. Для решения данной задачи предложен универсальный алгоритм учета структурных (технологических) потерь при определении загрузки стрелочных горловин – он может быть применим для горловин станций общего и необщего пользования. С использованием метода имитационного моделирования на реальных объектах выполнена верификация нового подхода. Приведено сравнение результатов, получаемых при использовании различных методов расчета: аналитического (по действующей Инструкции ОАО «РЖД» № 545/р), с использованием модели, с использованием модели и предлагаемого алгоритма. Показано, что всеобъемлющая оценка загрузки стрелочных горловин на сложных с точки зрения технологии объектах должна определяться в динамике и в настоящее время может быть выполнена только с использованием имитационного моделирования и при проведении имитационной экспертизы. Дальнейшее развитие описанного алгоритма связано с автоматизацией подсчета величины структурных потерь, а также в формировании перечня рекомендаций для изменения положений в действующей в ОАО «РЖД» Инструкции по расчету пропускной способности стрелочных железнодорожных горловин № 545/р.

Список литературы

- 1 Макромоделирование транспортных узлов / П. А. Козлов, Н. А. Тушин, В. Ю. Пермикин, И. Г. Слободянюк // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 10. – С. 38–40. – ISSN 0044-4448.
- 2 **Слободянюк, И. Г.** Технология макромоделирования железнодорожных станций и узлов : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок (технические науки)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Слободянюк Инна Геннадьевна ; Уральский государственный университет путей сообщения. – Екатеринбург, 2018. – 184 с.
- 3 **Сайбатов, Р. Ф.** Методы устранения затруднений в работе полигонов железнодорожной сети : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок (технические науки)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сайбатов Рашид Фердаусович ; Уральский государственный университет путей сообщения. – Екатеринбург, 2020. – 231 с.
- 4 **Козлов, П. А.** О загрузке стрелок и пропускной способности горловин / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин // Транспорт Урала. – 2016. – № 4 (51). – С. 3–7. – DOI 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7.
- 5 **Козлов, П. А.** Определение параметров парков и горловин станции с учетом их взаимодействия /

References

- 1 Macromodeling of transport hubs / P. A. Kozlov, N. A. Tushin, V. J. Permikin, I. G. Slobodanyuk // Railway Transport. – 2015. – No. 10. – P. 38–40. – ISSN 0044-4448.
- 2 **Slobodanyuk, I. G.** Technology of macromodeling of railway stations and junctions : specialty 05.22.08 “Transportation Process Management (technical sciences)” : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Slobodanyuk Inna Gennadiyevna ; Ural State Transport University. – Ekaterinburg, 2018. – 184 p.
- 3 **Saibatalov, R. F.** Methods of eliminating difficulties in the operation of polygons of the railway network : specialty 05.22.08 “Transportation Process Management (technical sciences)” : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Saibatalov Rashid Ferdausovich ; Ural State Transport University. – Ekaterinburg, 2020. – 231 p.
- 4 **Kozlov, P. A.** On the loading of switches and station neck capacity / P. A. Kozlov, V. S. Kolokolnikov, N. A. Tushin // Transport of the Urals. – 2016. – No. 4 (51). – P. 3–7. – DOI 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7.
- 5 **Kozlov, P. A.** Defining the parameters of the tracks and of the station necks considering their

П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин // Транспорт Урала. – 2017. – № 1 (52). – С. 3–7. – DOI 10.20291/1815-9400-2017-1-3-7.

6 О технологии расчета систем железнодорожного транспорта / П. А. Козлов, В. П. Козлова, О. В. Осокин, Н. А. Тушин // Транспорт Урала. – 2022. – № 3 (74). – С. 3–9. – DOI 10.20291/1815-9400-2022-3-3-9.

7 Методика проведения исследований проектов развития железнодорожных станций и линий с определением «узких мест», влияния на пропускные и перерабатывающие способности, рациональной технологии и прогнозируемых эксплуатационных показателей с использованием аппарата математического моделирования / ОАО «РЖД»: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2р от 09.01.2018 г. – Москва, 2018. – 75 с.

8 Козлов, П. А. Исследование проектов развития железнодорожных станций и полигонов с помощью имитационного моделирования / П. А. Козлов, О. В. Осокин, В. С. Колокольников // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 6. – С. 12–16. – ISSN 0044-4448.

9 Осокин, О. В. Моделирование припортового транспортного узла / О. В. Осокин, В. С. Колокольников, А. А. Муравьев // Транспорт Урала. – 2025. – № 4 (87). – С. 3–9. – DOI 10.20291/1815-9400-2025-4-3-9.

10 Транспортный алгоритм: официальный сайт. – URL: <http://trans-expert.ru/> (дата обращения: 25.03.2026).

11 Распоряжение ОАО «РЖД» от 04.03.2022 N 545/р (с изм. от 14.02.2023) «Об утверждении Инструкции по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД»». – URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=798693#9BgoGLVLwtidx7UH> (дата обращения: 25.03.2026).

interaction / P. A. Kozlov, V. S. Kolokolnikov, N. A. Tushin // Transport of the Urals. – 2017. – No. 1 (52). – P. 3–7. – DOI 10.20291/1815-9400-2017-1-3-7.

6 On technology for calculation of railway transport systems / P. A. Kozlov, V. P. Kozlova, O. V. Osokin, N. A. Tushin // Transport of the Urals. – 2022. – No. 3 (74). – P. 3–9. – DOI 10.20291/1815-9400-2022-3-3-9.

7 Methodology for conducting research on projects for the development of railway stations and lines with the identification of “bottlenecks”, the impact on throughput and processing capacities, rational technology and predictable performance using the apparatus of mathematical modeling, approved by Order of JSC Russian Railways No. 2/r dated 01/09/2018. – Moscow, 2018. – 75 p.

8 Kozlov, P. A. Research of projects for the development of railway stations and polygons using simulation modeling / P. A. Kozlov, O. V. Osokin, V. S. Kolokolnikov // Railway transport. – 2018. – No. 6. – P. 12–16. – ISSN 0044-4448.

9 Osokin, O. V. Simulation of a portside transport hub / O. V. Osokin, V. S. Kolokolnikov, A. A. Muravyov // Transport of the Urals. – 2025. – No. 4 (87). – P. 3–9. – DOI 10.20291/1815-9400-2025-4-3-9.

10 Transport algorithm: official website. – URL: <http://trans-expert.ru/> (date of access: 03/25/2026).

11 The Order of JSC "Russian Railways" dated 03/04/2022 N 545/r (as amended on 02/14/2023) “On approval of the instructions for calculating the carrying capacity of railways of JSC Russian Railways. – URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=798693#9BgoGLVLwtidx7UH> (date of access: 03/25/2026).

A. A. Muravyov, V. S. Kolokolnikov

ON THE ISSUE OF IMPROVING THE ACCURACY OF CALCULATING THE CAPACITY OF THE SWITCH NECKS

Abstract. The article deals with an urgent issue related to improving the accuracy of calculating the capacity of railway transport facilities. To solve this problem, the authors have proposed a new approach to determining the loading of switch throat – in addition to the occupation of movement and scheduled maintenance, the developed algorithm will take into account structural (technological) losses. The essence of the algorithm is an element-by-element analysis of the occupation of switch groups – time intervals are considered when the switch was not actually occupied by movement, but could have been occupied if no incident had occurred. Using the method of simulation modeling on real objects, the verification of the new

approach was carried out. A new approach was verified using the simulation method on real objects. A comparison of the results obtained using various calculation methods is provided: analytical (according to the current Instruction of JSC Russian Railways No. 545/r), model-based, and model-based calculations using both the model and the proposed algorithm.

Keywords: switch neck, structural losses, capacity calculation methodology, simulation modeling, marshaling yard, coal terminal, mining and processing plant.

For citation: Muravyov, A. A. On the issue of improving the accuracy of calculating the capacity of the switch necks / A. A. Muravyov, V. S. Kolokolnikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 175–185. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_175.

Сведения об авторах

Муравьев Андрей Алексеевич

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной
работой»,
аспирант,
e-mail: murravjov@mail.ru

Колокольников Виталий Сергеевич

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной
работой»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: VKolokolnikov@usurt.ru

Information about the authors

Muravyov Andrey Alekseevich

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair “Operational Work Management”,
Postgraduate Student,
e-mail: murravjov@mail.ru

Kolokolnikov Vitaliy Sergeevich

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair “Operational Work Management”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: VKolokolnikov@usurt.ru

М. В. Четчуев, А. Н. Иванков, В. В. Костенко, С. С. Смирнов, Й. Р. Вадополас

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПЕРЕСМОТРА ДЕЙСТВУЮЩИХ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ЧАСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ НА ОБРАТНЫХ КРИВЫХ В ПЛАНЕ

Аннотация. Исследуется проблема запрета размещения железнодорожных станций на обратных кривых в плане в действующих нормах проектирования. Выполнен анализ ранее действовавших норм проектирования станций и узлов на железных дорогах нашей страны, а также мирового и отечественного опыта эксплуатации железнодорожных станций на обратных кривых. На основе сравнительного анализа нормативной документации установлена причинно-следственная связь между наличием обратных кривых и ухудшением условий видимости, а также выявлены условия, при которых допускалось использование обратных кривых.

Приведен краткий обзор современных технических средств, позволяющих компенсировать фактор ухудшения условий видимости.

Сделан вывод о целесообразности пересмотра действующих норм проектирования.

Ключевые слова: железнодорожная станция, обратные кривые, нормы проектирования, системы информирования, условия видимости, безопасность движения поездов, технические средства.

Для цитирования: О целесообразности пересмотра действующих норм проектирования в части размещения железнодорожных станций на обратных кривых в плане / М. В. Четчуев, А. Н. Иванков, В. В. Костенко [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 186–193. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_186.

Введение

При подготовке действующего в настоящее время СП 119.13330.2024 [1] особое и всестороннее внимание уделялось вопросам обеспечения безопасности в содержащихся в нем нормах. Проработка вопросов безопасности осуществлялась с позиций организации движения поездов, маневровой работы, производства работ на железнодорожных путях и сопутствующей им инфраструктуре, перевозок пассажиров и др. Одним из итогов этого стало появление запрета в [1] на размещение отдельных пунктов с путевым развитием, а также отдельных путей (вытяжных, надвига) железнодорожных станций на обратных кривых.

Введенный в [1] запрет является вполне обоснованным, так как наличие на отдельных пунктах с путевым развитием обратных кривых в плане во многих случаях неизбежно влечет за собой ухудшение условий видимости. С одной стороны, обратные кривые ухудшают видимость сигналов и путей машинистом локомотива поезда или маневрового состава, с другой стороны, происходит аналогичное снижение видимости приближающегося поезда (маневрового состава) работниками, находящимися на железнодорожных путях.

Вместе с этим, следует принимать во внимание и то, что на железнодорожной сети имеются станции, которые характеризуются особо трудными условиями проектирования (наличие рек, скал, искусственных сооружений, промышленной и городской застройки и др.). Реконструкция таких железнодорожных станций с отказом от обратных кривых в ряде случаев просто невозможна или будет приводить к значительному увеличению строительной стоимости, что в большинстве своем тождественно невозможности реализации проекта. Для некоторых проектных институтов, занимающихся развитием железнодорожных станций в особо трудных условиях, невозможность использования обратных кривых в плане является серьезной проблемой.

Таким образом, получается, что, с одной стороны, наличие обратных кривых в плане на железнодорожных станциях непосредственно ухудшает безопасность, а с другой стороны, отказ от их использования, приводит к невозможности разработки проектных решений по развитию или реконструкции существующих станций в особо трудных местных условиях. Исходя из этого, принципиальная возможность использования на железнодорожных станциях обратных кривых в плане требует дополнительного исследования и пересмотра.

1 Анализ ранее действовавших норм и правил проектирования

Не вызывает сомнения факт, что сама значимость хорошей видимости местности производства работ на железнодорожном транспорте достаточно длительный период была продиктована несовершенством применяемых систем автоматики, телемеханики и связи.

Вместе с этим, несмотря на указанные обстоятельства, уже с середины XX века в нормативных документах по проектированию железнодорожных станций встречаются послабления в части использования обратных кривых. Анализ положений Технических указаний на проектирование станций и узлов [2], утвержденных в 1947 году, показывает, что абсолютный запрет на использование обратных кривых в плане был установлен только для разъездов, обгонных пунктов и промежуточных станций на новых линиях. Для раздельных пунктов с последовательным расположением парков (без уточнения, на новых или существующих линиях) размещение на обратных кривых в плане допускалось, при этом имелось ограничение, что парк каждого из направлений могут быть размещены на кривых, обращенных только в одну сторону. Также в этом документе предусматривалась возможность обустройства отдельного парка на обратных кривых (в исключительных случаях) при реконструкции станции.

В 1954 году в действие вступил другой нормативный документ – Технические указания по проектированию станций и узлов на железных дорогах нормальной колеи [3]. В сравнении с предыдущим документом он содержал дополнительные послабления в части использования обратных кривых. Обновленными нормами допускалось размещение на обратных кривых железнодорожных станций, обгонных пунктов и разъездов продольного и полупродольного типа. Однако в них сохранилась оговорка, что пути каждого из направлений движения в пределах их полезной длины должны быть обращены только в одну сторону. Кроме этого, нормами [3] в исключительных случаях с разрешения Министра путей сообщения СССР допускалось размещение на обратных кривых разъездов поперечного типа на линиях II и III категорий. Что касается обустройства обратных кривых в парках железнодорожных станций при реконструкции, то нормы 1954 года не изменились по отношению к установленным в предыдущей редакции 1947 года.

Следующие нормативные послабления в части применения обратных кривых в плане на раздельных пунктах с путевым развитием появились в 1961 году с утверждением Технических указаний по проектированию станций и узлов на железных дорогах общей сети Союза ССР [4]. С вводом в действие этих норм не только разъезды, но и обгонные пункты с поперечным расположением путей на линиях II и III категорий могли быть обустроены на обратных кривых, при этом разрешение Министра путей сообщения СССР для реализации такого проектного решения уже не требовалось.

Очередное обновление норм проектирования произошло в 1978 году с вводом в действие Инструкции по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР [5]. В этом документе нормы, определяющие возможность использования обратных кривых в плане при разработке проектов по строительству новых и реконструкции существующих раздельных пунктов с путевым развитием, принципиальных изменений по отношению к нормам 1961 года не претерпели. Из формальных моментов можно отметить, что ввиду изменения категорирования линий разъезды и обгонные пункты поперечного типа на обратных кривых теперь допускалось устраивать на линиях II, III и IV категорий.

Отдельного внимания заслуживает последний абзац пункта 2.19 Инструкции [5]: «При наличии обратных кривых во всех случаях должна быть обеспечена видимость, достаточная для безопасности производства маневровой работы». Изложенный текст непосредственно подтверждает взаимосвязь ограничения применения обратных кривых в проектах железнодорожных станций с ухудшением условий видимости.

В 1980 году под редакцией А. М. Козлова и К. Г. Гусевой было издано справочное и методическое руководство «Проектирование железнодорожных станций и узлов» [6], содержащее материалы, детализирующие и развивающие положения Инструкции [5]. В соответствии с таблицей 3.6 этого руководства в особо трудных условиях на обратных кривых могли размещаться не только разъезды и обгонные пункты, но и железнодорожные станции поперечного типа, а также отдельные парки [6].

Небольшое ужесточение требований к обустройству на обратных кривых разъездов и обгонных пунктов поперечного типа при новом строительстве произошло в 1995 году с вводом в действие СТН Ц-01-95 [7]. Согласно требованиям указанного документа теперь на обратных кривых допускались такие решения только на линиях III и IV категорий. В части проектирования новых железнодорожных станций, разъездов и обгонных пунктов с полупродольным и продольным расположением приемоотправочных путей, а также реконструкции существующих железнодорожных станций любых типов нормы, определяющие возможность их размещения на обратных кривых, изменений в СТН Ц-01-95 не претерпели.

Правила и технические нормы проектирования станций и узлов на железных дорогах колеи 1520 мм [8], которые были введены в действие в 2000 г., в части требований по обустройству раздельных пунктов с путевым развитием на обратных кривых в плане полностью повторили нормы СТН Ц-01-95.

2 декабря 2014 года в действие был введен СП 225.1326000.2014 «Станционные здания, сооружения и устройства» [9]. В вопросе применения обратных кривых в плане на раздельных пунктах с путевым развитием этим документом предусматривались следующие нормы:

1 Разъезды и обгонные пункты допускается располагать на обратных кривых в трудных и особо трудных условиях на малоинтенсивных линиях и линиях со средней интенсивностью движения.

2 Для железнодорожных станций, обгонных пунктов и разъездов продольного и полупродольного типа в трудных условиях допускается использование обратных кривых в плане, с учетом ограничения по размещению приемоотправочных путей отдельных парков (в пределах их полезной длины) на кривых, обращенных в одну сторону.

3 В трудных и особо трудных условиях допускается устройство обратных кривых на железнодорожных станциях, обгонных пунктах и разъездах при их реконструкции.

Результаты исследования действовавших ранее нормативных документов показывают, что на отечественных железных дорогах ранее допускалась возможность обустройства раздельных пунктов с путевым развитием на обратных кривых в плане в определенных условиях. Также положения действовавших ранее норм подтверждают взаимосвязь наличия обратных кривых в плане и ухудшение условий видимости.

Предполагаемые значения радиусов обратных кривых в плане в зависимости от условий видимости приведены в таблице.

**Предполагаемые значения радиусов обратных кривых в плане
на раздельных пунктах с путевым развитием**

Категория линии	Минимальная величина радиуса круговой кривой, м	
	Трудные условия проектирования	Особо трудные условия проектирования
Скоростная	2000	900
Пассажирская	1500	
Особогрузонапряжённая	1200	600
I	1500	900
II		
III	1200	600
IV		

2 Анализ зарубежного и отечественного опыта обустройства и эксплуатации железнодорожных станций с размещением на обратных кривых в плане

На некоторых зарубежных железных дорогах обустройство и эксплуатация железнодорожных станций с обратными кривыми являются вполне приемлемой практикой. Такие станции есть на железных дорогах США, Канады и ряда европейских стран.

Для железных дорог Соединенных Штатов Америки в качестве примера можно привести станции Бейли-Ярд (рис. 1), Цинциннати (рис. 2), Дэвидсон Ярд (рис. 3) и Новый Орлеан.

Наличие обратных кривых в плане на железнодорожных станциях США во многом объясняется организацией движения длиннооставных поездов. Помимо этого, еще одной из причин появления в США железнодорожных станций на обратных кривых в ряде случаев является стесненность имеющейся территории. Это особенно хорошо видно на спутниковых картах портовой станции в городе Новый Орлеан (координаты: 29.915754096235037, -90.10620038875585).

Те же причины, что и в США, связаны и с появлением железнодорожных станций на обратных кривых железных дорог Канады. В качестве примера можно рассмотреть станцию Калгари. При детальном рассмотрении спутниковых карт (координаты: 51.022519, -114.017844) видно, что решение о применении обратных кривых при строительстве или переустройстве железнодорожной станции было принято ввиду занятости территории городской застройкой, а также наличия путепроводной развязки.



Рис. 1. Фрагмент железнодорожной станции Бейли-Ярд [10]



Рис. 2. Фрагмент железнодорожной станции Цинциннати [11]

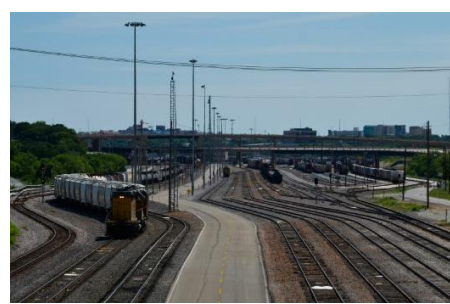


Рис. 3. Фрагмент железнодорожной станции Дэвидсон Ярд [12]

Европейский опыт применения обратных кривых предлагается рассмотреть на примере грузовой станции в итальянском городе Верона. Исходя из данных спутниковых карт (координаты: 45.441592, 10.973451) можно заключить, что решение о применении обратных кривых в данной ситуации, весьма вероятно, было принято из-за стесненных местных условий. Уход от обратных кривых в одном случае потребовал бы занятия значительной части территории, на которой сейчас расположен терминал хранения автомобилей. В другом случае потребовалось бы изменение положения главных путей с их искривлением, что тоже нельзя считать рациональным решением.

Еще одним примером европейского опыта использования обратных кривых на отдельных пунктах с путевым развитием является расположенная в Черногории станция Сутоморе. На спутниковых картах (координаты: 42.140639426900314, 19.04933190143794) видно, что площадка размещения железнодорожной станции с двух сторон зажата плотной городской застройкой, что с высокой вероятностью и повлияло на проектное решение с применением обратных кривых.

В настоящее время на железных дорогах России в эксплуатации имеется значительное количество станций с парками на обратных кривых. В качестве примеров можно привести железнодорожные станции Апатиты (грузовой парк), Мурманск, Медвежья Гора, Посыет, Суда. Указанные станции и ряд других существуют достаточно длительный период, и конфигурация их путевого развития сформировалась после нескольких переустройств. Безусловно, влияние на сложившуюся конфигурацию станций оказывали и местные условия, которые в большинстве своем изначально были трудными или особо трудными.

Отдельное внимание следует обратить на то, что относительно недавно некоторые российские железнодорожные станции были переустроены в связи с обращением поездов повышенной длины, двойной длины и двоянных поездов. При переустройстве этих станций в некоторых случаях имелась возможность удлинить пути в парках с размещением их на прямой или в кривых, направленных в одну сторону. Однако, несмотря на это, на практике были реализованы проектные решения, предусматривающие устройство обратных кривых, что можно обосновать, с одной стороны, рационализацией потребных объемов подготовительных и строительно-монтажных работ и, как следствие, существенной экономией капитальных вложений, с другой стороны, экономией эксплуатационных затрат при последующем содержании переустраиваемого объекта. Примером такой станцией может служить Орехово-Зуево (транзитный парк).

На основе анализа зарубежного и отечественного опыта обустройства и эксплуатации железнодорожных станций с размещением на обратных кривых в плане можно сделать выводы, что подобные решения допускались в следующих условиях:

- наличие трудных и особо трудных местных условий;
- обустройство путей для приема и отправления поездов с длиной, превышающей установленную на участке унифицированную величину.

3 Технические средства компенсации ухудшения условий видимости

В настоящее время для компенсации ухудшения условий видимости при наличии на железнодорожной станции обратных кривых в плане может быть использован широкий спектр различных технических средств, большая часть которых применяется и в обычных условиях эксплуатации железнодорожного транспорта.

При плохой видимости входных, маршрутных и выходных светофоров эффективным техническим средством обеспечения передачи их показаний локомотивной бригаде является использование

светофора, установленного в кабине локомотива. Также для компенсации ухудшения условий видимости могут быть установлены повторительные светофоры.

Организацию поездной и маневровой работы, а также проведение различных работ на железнодорожной инфраструктуре сейчас трудно представить без наличия надежных и удобных средств связи между причастными работниками. Одной из функций устройств связи является повышение личной безопасности работников, и она может быть реализована и в условиях наличия на железнодорожной станции обратных кривых.

В части устройств связи отдельно можно отметить системы, которые применяются для информирования работников и пользователей (пассажиров) железнодорожного транспорта о движении поездов и оповещении о приближении железнодорожного подвижного состава. Требования к применению указанных систем регламентированы межгосударственным стандартом [13]. В условиях плохой видимости для автоматического оповещения находящихся на железнодорожных путях работников наиболее широкое распространение получила система «Сирена» [14]. Эта система может быть использована на железнодорожных станциях, оборудованных электрической централизацией. Принцип ее работы основан на речевом и звуковом оповещении работников, что позволяет в случае возникновения опасной ситуации заблаговременно перейти в безопасную зону.

Для звукового информирования о приближении поезда могут применяться и простые технические средства, например подача свистка локомотивом. В условиях плохой видимости из-за наличия на железнодорожной станции обратных кривых места подачи этого свистка могут быть обозначены знаком «С» [15]. Установка знака «С» на железнодорожных станциях допускается действующими Правилами технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [16].

Приведенный краткий обзор позволяет сделать вывод, что ухудшение условий видимости, связанное с наличием на железнодорожной станции обратных кривых в плане, может быть существенно компенсировано за счет использования современных технических средств.

Заключение

Приведенные в статье материалы свидетельствуют о наличии влияния обратных кривых на железнодорожной станции в плане на ухудшение условий видимости в зоне их расположения. Однако, несмотря на это, размещение станций на обратных кривых ранее допускалось. Это подтверждается анализом ранее действовавших норм проектирования, а также мирового и отечественного опыта эксплуатации таких станций. Возможность использования обратных кривых в проектных решениях определялась трудными и особо трудными местными условиями, а также ситуациями, когда на станциях обустраивались пути для приема и отправления поездов с длиной, превышающей установленную на участке унифицированную длину.

Также следует принять во внимание, что существующие в настоящее время технические средства позволяют практически полностью нивелировать фактор ухудшения условий видимости.

Из изложенного можно заключить, что нормы действующего СП 119.13330.2024 целесообразно пересмотреть в части отмены либо ослабления запрета на использование обратных кривых в плане на железнодорожных станциях.

Список литературы

- 1 **СП 119.13330.2024.** Железные дороги колеи 1520 мм. СНиП 32-01-95 : утверждены Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 1 июля 2024 г. № 432/пр. – Минстрой России [сайт]. – URL: [https:// www.minstroyrf.gov.ru/docs/375821/](https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/375821/) (дата обращения: 08.04.2026).
- 2 Технические указания на проектирование станций и узлов : утверждены Министерством путей сообщения СССР 24 ноября 1947 г. № 8472. – Москва : Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1948. – 124 с.

References

- 1 **SP 119.13330.2024.** 1520 mm gauge railways. SNiP 32-01-95 : approved by Order of the Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation dated July 1, 2024 No. 432/pr. – Ministry of Construction of the Russian Federation [official website]. – URL: [https:// www.minstroyrf.gov.ru/docs/375821/](https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/375821/) (date of access: 04/08/2026).
- 2 Technical guidelines for the design of stations and junctions : approved by the Ministry of Railways of the USSR on November 24, 1947, No. 8472. – Moscow : State Transport Railway Publishing House, 1948. – 124 p.

3 Технические указания по проектированию станций и узлов на железных дорогах нормальной колеи : утверждены Государственным комитетом Совета Министров СССР по делам строительства 28 октября 1953 г., введены в действие с 15 января 1954 г. приказом Министерства путей сообщения от 18 ноября 1953 г. № 451/ЦЗ. – Москва : Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1954. – 119 с.

4 Технические указания по проектированию станций и узлов на железных дорогах общей сети Союза ССР (ВСН 56-61) : утверждены Министерством путей сообщения СССР и Министерством транспортного строительства СССР. – Москва : Всесоюзное издательско-полиграфическое объединение Министерства путей сообщения, 1961. – 151 с.

5 Инструкция по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР (ВСН 56-78) : утверждена Министерством транспортного строительства СССР 28 января 1978 г. и Министерством путей сообщения СССР 10 февраля 1978 г. – МЕГАНОРМ. Система нормативных документов [сайт]. – URL: <https://mega-norm.ru/Data2/1/4294851/4294851027.htm> (дата обращения: 08.04.2026).

6 Проектирование железнодорожных станций и узлов : справочное и методическое руководство / под редакцией А. М. Козлова, К. Г. Гусевой. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1980. – 592 с.

7 **СТН Ц-01-95.** Железные дороги колеи 1520 мм : утверждены Приказом Министерства путей сообщения Российской Федерации от 25 сентября 1995 г. № 14Ц. – Трудовой десант. Железнодорожное строительство. – URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/136> (дата обращения: 08.04.2026).

8 Правила и технические нормы проектирования станций и узлов на железных дорогах колеи 1520 мм ЦД-858 : утверждены заместителем Министра путей сообщения Российской Федерации С. А. Гришиным 28 июля 2000 г. – Москва : Техинформ, 2001. – 255 с.

9 **СП 225.1326000.2014.** Станционные здания, сооружения и устройства : утверждены приказом Минтранса России от 2 декабря 2014 г. № 331. – Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200120203> (дата обращения: 08.04.2026).

10 Bailey Yard / ColoradoRailfan. – URL: <https://www.flickr.com/photos/coloradorailfan/53968115192> (дата обращения: 08.04.2026).

11 Railyard behind the Cincinnati Union Terminal. – URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:>

3 Technical guidelines for the design of stations and junctions on normal-gauge railways : approved by the State Committee of the Council of Ministers of the USSR for Construction on October 28, 1953, put into effect on January 15, 1954 by order of the Ministry of Railways dated November 18, 1953, No. 451/TsZ. – Moscow : State Transport Railway Publishing House, 1954. – 119 p.

4 Technical guidelines for the design of stations and junctions on the railways of the common network of the USSR (VSN 56-61) : approved by the USSR Ministry of Railways and the USSR Ministry of Transport Construction. – Moscow : All-Union Publishing and Printing Association of the Ministry of Railways, 1961. – 151 p.

5 Instructions for the design of stations and junctions on railways of the USSR (VSN 56-78) : approved by the USSR Ministry of Transport Construction on January 28, 1978 and the USSR Ministry of Railways on February 10, 1978. – МЕГАНОРМ. Regulatory Documents System. – URL: <https://mega-norm.ru/Data2/1/4294851/4294851027.htm> (date of access: 04/08/2026).

6 Design of railway stations and junctions : reference and methodological manual / edited by A. M. Kozlov, K. G. Guseva. – 2nd ed., revised and enlarged. – Moscow : Transport, 1980. – 592 p.

7 **STN C-01-95.** 1520 mm gauge railways : approved by Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated September 25, 1995 No. 14C. – Trudovoy desant. Railway construction. – URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/136> (date of access: 04/08/2026).

8 Rules and technical standards for the design of stations and junctions on 1520 mm gauge railways CD-858 : approved by Deputy Minister of Railways of the Russian Federation S. A. Grishin on July 28, 2000. – Moscow : Tekhinform, 2001. – 255 p.

9 **SP 225.1326000.2014.** Station buildings, structures and devices : approved by order of the Ministry of Transport of Russia dated December 2, 2014 No. 331. – Electronic fund of legal and normative-technical documents. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200120203> (date of access: 04/08/2026).

10 Bailey Yard / ColoradoRailfan. – URL: <https://www.flickr.com/photos/coloradorailfan/53968115192> (date of access: 08.04.2026).

11 Railyard behind the Cincinnati Union Terminal. – URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:>

Railyard_behind_the_Cincinnati_Union_Terminal_(11259266795).jpg (дата обращения: 08.04.2026).

12 Davidson Yard или жизнь сортировочной станции. – URL: https://kak-eto-sdelano.livejournal.com/89176.html?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (дата обращения: 08.04.2026).

13 **ГОСТ 34079–2017.** Системы информирования о движении поездов и оповещения о приближении железнодорожного подвижного состава. Общие требования : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 июня 2017 г. № 608-ст. – МEGANORM. Система нормативных документов [сайт]. – URL: <https://mega-norm.ru/Data/646/64677.pdf> (дата обращения: 08.04.2026).

14 **Щелконогов, С. В.** Анализ современных и перспективных систем предупреждения путевых работников о приближении подвижного состава / С. В. Щелконогов // Молодой ученый. – 2012. – № 6 (41). – С. 61–63. – ISSN 2072-0297.

15 **Вадополас, Й. Р.** О проблеме разработки проектов реконструкции железнодорожных станций с размещением на обратных кривых в плане / Й. Р. Вадополас, М. В. Четчуев // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сборник трудов LXXXV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 14–21 апреля 2025 года : в 2 т. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2025. – С. 98–102. – ISBN 978-5-605-39078-7.

16 Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утверждены Приказом Минтранса России от 23 июня 2022 г. № 250. – Текст : электронный // Трудовой десант. Железнодорожное строительство [сайт]. – URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/316> (дата обращения: 08.04.2026).

org/wiki/File: Railyard_behind_the_Cincinnati_Union_Terminal_(11259266795).jpg (date of access: 04/08/2026).

12 Davidson Yard or the life of a marshalling yard. – URL: https://kak-eto-sdelano.livejournal.com/89176.html?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (date of access: 04/08/2026).

13 **GOST 34079-2017.** Train movement information systems and warning systems for approaching rolling stock. General requirements : put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated June 29, 2017 No. 608-st. – MEGANORM. Regulatory Documents System. – URL: <https://mega-norm.ru/Data/646/64677.pdf> (date of access: 04/08/2026).

14 **Shchelkonogov, S. V.** Analysis of modern and prospective systems for warning track workers about the approach of rolling stock / S. V. Shchelkonogov // Young scientist. – 2012. – No. 6 (41). – P. 61–63. – ISSN 2072-0297.

15 **Vadopolas, J. R.** On the problem of developing projects for the reconstruction of railway stations with placement on inverse curves in plan / J. R. Vadopolas, M. V. Chetchuev // Transport : problems, ideas, prospects : collection of works of the LXXXV All-Russian scientific and technical conference of students, postgraduates, and young scientists, Saint Petersburg, April 14–21, 2025 : in 2 vols. – Saint Petersburg : Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, 2025. – P. 98–102. – ISBN 978-5-605-39078-7.

16 Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation : approved by Order of the Ministry of Transport of Russia of June 23, 2022 No. 250. – Text : electronic // Trudovoy desant. Railway construction. – URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/316> (date of access: 04/08/2026).

M. V. Chetchuev, A. N. Ivankov, V. V. Kostenko, S. S. Smirnov, J. R. Vadopolas

ON THE FEASIBILITY OF REVISING CURRENT DESIGN STANDARDS REGARDING THE PLACEMENT OF RAILWAY STATIONS ON REVERSE CURVES IN THE PLAN

Abstract. This article examines the prohibition of placing railway stations on reverse curves in existing design standards. Previously applicable station and junction design standards on Russian railways, as well as international and domestic experience in operating railway stations on reverse curves, are analyzed. A comparative analysis of regulatory documentation establishes a cause-and-effect relationship between the presence of inverse curves and deterioration in visibility, and identifies the conditions under which the use of inverse curves was permitted.

A brief overview of modern technical means for compensating for reduced visibility is provided. A conclusion is reached regarding the advisability of revising current design standards.

Keywords: railway station, reverse curves, design standards, information systems, visibility conditions, train safety, technical means.

For citation: On the feasibility of revising current design standards regarding the placement of railway stations on reverse curves in the plan / M. V. Chetchuev, A. N. Ivankov, V. V. Kostenko [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 186–193. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_186.

Сведения об авторах

Четчуев Максим Владимирович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
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»),
главный инженер,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: aivankov@yandex.ru

Костенко Владимир Васильевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Железнодорожные станции и узлы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: docentkostenko@yandex.ru

Смирнов Сергей Сергеевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Железнодорожные станции и узлы»,
инженер,
e-mail: sss1999@inbox.ru

Вадополас Йонас Робертасович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Железнодорожные станции и узлы»,
аспирант,
e-mail : vadopolas02@bk.ru

Information about the authors

Chetchuev Maksim Vladimirovich

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair “Railway Stations and Junctions”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail : mts@pgups.ru

Ivankov Alexey Nikolaevich

Limited Liability Company “PSK TekhProekt” (LLC “PSK TekhProekt”),
Chief Engineer,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: aivankov@yandex.ru

Kostenko Vladimir Vasilyevich

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair “Railway Stations and Junctions”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: docentkostenko@yandex.ru

Smirnov Sergey Sergeevich

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair “Railway Stations and Junctions”,
Engineer,
e-mail: sss1999@inbox.ru

Vadopolas Jonas Robertasovich

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair “Railway Stations and Junctions”,
Postgraduate Student,
e-mail : vadopolas02@bk.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.169.1

DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_194

*А. В. Ерпалов, К. А. Хорошевский, И. В. Гадолина***ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ СЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ
НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНОЙ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ***

Аннотация. Предложена модель оценки остаточного ресурса элементов конструкций при случайном вибрационном нагружении на основе одномерной свёрточной нейронной сети (*1D-CNN*), на вход которой подаётся распределение максимумов процесса напряжений, а на выходе формируется относительная долговечность. Для обучения сети сформирован набор из 12 000 реализаций стационарных и нестационарных случайных процессов, включая процессы с ударными воздействиями и реальные эксплуатационные записи; эталонные значения долговечности получены методом «падающего дождя» с линейным суммированием повреждений, а гиперпараметры оптимизированы байесовским методом (минимальная ошибка $RMSE = 0,0403$). Экспериментальная верификация на образцах из лёгкого сплава МА-15, испытанных на электродинамическом вибростенде при трёх уровнях нагружения, показала погрешность прогноза от 6 до 25 %, возрастающую при высоких уровнях вследствие малоциклового усталости. С учётом разброса экспериментальных данных модель признана верифицированной.

Ключевые слова: остаточный ресурс; усталостная долговечность; случайное нагружение; одномерная свёрточная нейронная сеть; метод «падающего дождя».

Для цитирования: Ерпалов, А. В. Оценка остаточного ресурса конструкций при случайном нагружении на основе одномерной свёрточной нейронной сети / А. В. Ерпалов, К. А. Хорошевский, И. В. Гадолина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 194–209. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_194.

Введение

Обеспечение прочностной надёжности и прогнозирование остаточного ресурса элементов конструкций, работающих в условиях случайного вибрационного нагружения, – одна из ключевых задач машиноведения и механики конструкций [1, 2]. Накопление усталостных повреждений при случайном нагружении носит вероятностный характер и зависит как от статистических характеристик процесса напряжений, так и от усталостных свойств материала [3].

Традиционно для оценки усталостной долговечности применяют два подхода – временной и частотный. Временной подход рассматривает реализацию случайного процесса нагружения, выделяет циклы методом «падающего дождя» (*rainflow*) и суммирует повреждения по гипотезе Пальмгрена – Майнера [3]. Частотные (спектральные) методы оценивают повреждение непосредственно по спектральной плотности напряжений через её спектральные моменты [2, 4]; разработаны методы для различных форм спектра и новые частотные критерии оценки повреждения механических компонентов [5, 6].

Основное ограничение спектральных методов состоит в том, что они строго справедливы лишь для стационарных гауссовских центрированных процессов, тогда как в реальной эксплуатации преобладают нестационарные и негауссовские воздействия. Для их учёта развиваются квазистационарное гауссовское приближение [7], оценка долговечности на коротких интервалах с учётом структурной динамики [8], представление процесса совокупностью гауссовых составляющих [9] и анализ через спектры высших порядков [10]; исследуются нестационарность и негауссовость вибрационного нагружения [11], повреждение негауссовских бимодальных процессов [12], статистическая изменчивость и дисперсия повреждения [13–15], доверительные интервалы его оценки [16] и ресурс конструкций при нестационарном воздействии [17].

Перспективны методы эмпирической декомпозиции сигнала (EMD) [18, 19], их применение для фильтрации сигналов с датчиков [20, 21] и снижения смещения мод [22]; авторами настоящей работы ранее предложен метод на основе вариационной модовой декомпозиции [23]. Для учёта асимметрии

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20268. – URL: <https://rscf.ru/project/25-29-20268>.

цикла используют частотные модели коррекции среднего напряжения [24–27]. Вопросы цифровой обработки случайного сигнала, сопоставления подходов к заданию нагруженности и учёта демпфирования рассмотрены в работах авторов [28–30].

В последнее десятилетие для оценки усталостной долговечности и остаточного ресурса интенсивно применяют методы машинного обучения. Обзоры архитектур одномерных свёрточных сетей и нейросетевых моделей усталости приведены в [31, 32]. Глубокие свёрточные и рекуррентные сети используют для оценки остаточного ресурса [33], прогнозирования многоосевой долговечности [34], предела выносливости сталей [35] и оценки повреждения по нейросетевым моделям [36, 37]; развиваются модели для аддитивно изготовленных материалов [38, 39], гибридные архитектуры *CNN-LSTM* [40], физически информированные сети при малом объёме данных [41], методы распознавания образов для малоциклового усталости [42], трансформерные модели с графовым вниманием [43] и подходы, объединяющие физические знания и глубокое обучение [44]. Применительно к случайному и широкополосному нагружению предложены модели машинного обучения, прогнозирующие долговечность преимущественно по спектральным параметрам [45–48], в том числе для случайной вибрации деталей и конструкций [49, 50]. В отечественных работах нейросетевые и ансамблевые модели применяют для контроля характеристик случайных сигналов, предиктивной аналитики и диагностики технического состояния объектов [51–53].

В отличие от спектральных методов, требующих стационарности и гауссовости процесса, и от временных методов, требующих полной реализации нагружения и значительных вычислительных затрат, предлагаемый подход использует компактное входное представление – гистограмму распределения максимумов процесса – и применим как к стационарным, так и к нестационарным негауссовским процессам. В отличие от существующих нейросетевых моделей, ориентированных преимущественно на спектральные параметры или узкие классы нагружения [45–48], в настоящей работе на вход свёрточной сети подаётся непосредственно распределение максимумов, что не требует допущений о стационарности и виде спектра, а по точности модель сопоставима с эталонным методом «падающего дождя» при существенно меньших затратах на этапе прогноза. Вместе с тем вопрос использования распределения максимумов в качестве входных данных свёрточной сети для оценки остаточного ресурса остаётся недостаточно изученным.

Целью исследования является разработка и экспериментальная верификация модели оценки остаточного ресурса конструкций при случайном нагружении на основе одномерной свёрточной нейронной сети, использующей в качестве входных данных распределение максимумов процесса напряжений.

Постановка задачи

Рассматривается элемент конструкции, испытывающий случайное вибрационное нагружение, которое описывается случайным процессом напряжений $\sigma(t)$ [МПа]. Требуется по реализации процесса нагружения оценить относительную долговечность D в диапазоне от 0 до 1, где значение $D = 1$ соответствует разрушению (исчерпанию ресурса).

В отличие от временных методов, требующих полной схематизации реализации, и спектральных методов, ограниченных стационарными гауссовскими процессами, в работе ставится задача построения модели, которая: 1) принимает на вход компактное представление процесса – распределение максимумов; 2) обучается на эталонных значениях долговечности, полученных апробированным методом «падающего дождя» с линейным суммированием повреждений; 3) обеспечивает приемлемую точность как для стационарных, так и для нестационарных и негауссовских процессов. Для обучения и тестирования такой модели необходим представительный набор случайных процессов с известными значениями долговечности.

Исходные данные и формирование обучающей выборки

Для обучения нейросетевой модели использован набор случайных процессов напряжений $\sigma(t)$ [МПа], сформированный на основе методики синтеза, разработанной и опубликованной авторами ранее [23]. В указанной работе подробно приведены аналитические представления спектральных плотностей мощности, типы синтезируемых процессов и их статистические характеристики (среднеквадратическое значение, коэффициент нерегулярности, коэффициент эксцесса), поэтому ниже методика синтеза изложена кратко. Все реализации ограничены по уровню напряжений максимальными выбросами приблизительно до 300 МПа; частота дискретизации составляла 100 Гц. Параметры синтеза выбирались исходя из того, что наибольшие напряжения в конструкциях машиностроительных объектов возникают при низкочастотном воздействии.

Базовый набор включает стационарные гауссовские процессы (узкополосный, типа «белый шум», широкополосный одномодальный и бимодальный) и нестационарные процессы (комбинированный switching-процесс из сегментов стационарных процессов разной дисперсии и широкополосности, а также равномерно модулированные процессы двух типов). Краткий перечень базовых процессов приведён в табл. 1; аналитические зависимости спектральных плотностей мощности, параметры комбинирования сегментов и полные статистические характеристики процессов приведены в [23]. Процессы с изменяющимся математическим ожиданием не рассматривались, поскольку частотные методы оценки долговечности применимы только к центрированным процессам.

Таблица 1

Базовый набор синтезированных случайных процессов [23]

№, п/п	Тип случайного процесса	Характер процесса
1	Узкополосный гауссовский процесс	Стационарный
2	Процесс типа «белый шум»	Стационарный
3	Широкополосный одномодальный процесс	Стационарный
4	Бимодальный (двухпиковый) процесс	Стационарный
5	Сумма двух широкополосных процессов ($WB + WB$)	Нестационарный
6	Сумма двух бимодальных процессов ($BM + BM$)	Нестационарный
7	Сумма широкополосного и бимодального процессов ($WB + BM$)	Нестационарный
8	Равномерно модулированный процесс (нарастание амплитуды от нулевого значения)	Нестационарный
9	Равномерно модулированный процесс (нарастание амплитуды не от нулевого значения)	Нестационарный

В работе базовый набор дополнен двумя типами процессов, расширяющими обучающую выборку. Первый – нестационарный узкополосный гауссовский процесс (уровень спектральной плотности мощности $500 \text{ МПа}^2/\text{Гц}$ на частоте 1 Гц) с наложенными затухающими высокочастотными колебаниями, моделирующими ударные воздействия (рис. 1) и задаваемыми зависимостью

$$y(t) = Ae^{-\xi\omega t} \sin(\omega t + \varphi),$$

где A – амплитуда импульса [МПа]; ξ – коэффициент демпфирования;
 ω – частота колебаний [Гц]; t – время [с]; φ – фаза.

Значения выбирались случайно в диапазонах: A от 100 до 150 МПа , ξ от $0,03$ до $0,05$, ω от 20 до 30 Гц ; длительность затухающих колебаний – от 3 до 5 с , число ударных воздействий в реализации – 20 .

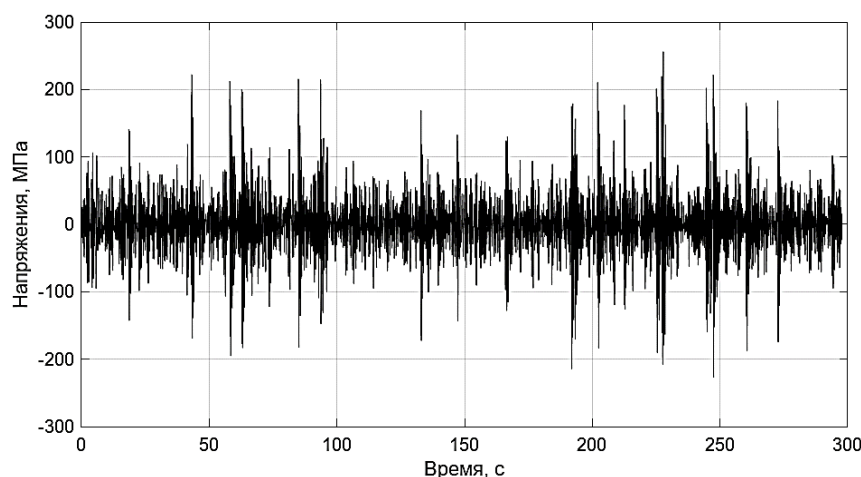


Рис. 1. Характерный узкополосный случайный процесс с ударными воздействиями

Второй – реальные эксплуатационные процессы, представляющие собой записи напряжений с тензодатчиков, установленных на транспортном средстве (рис. 2).

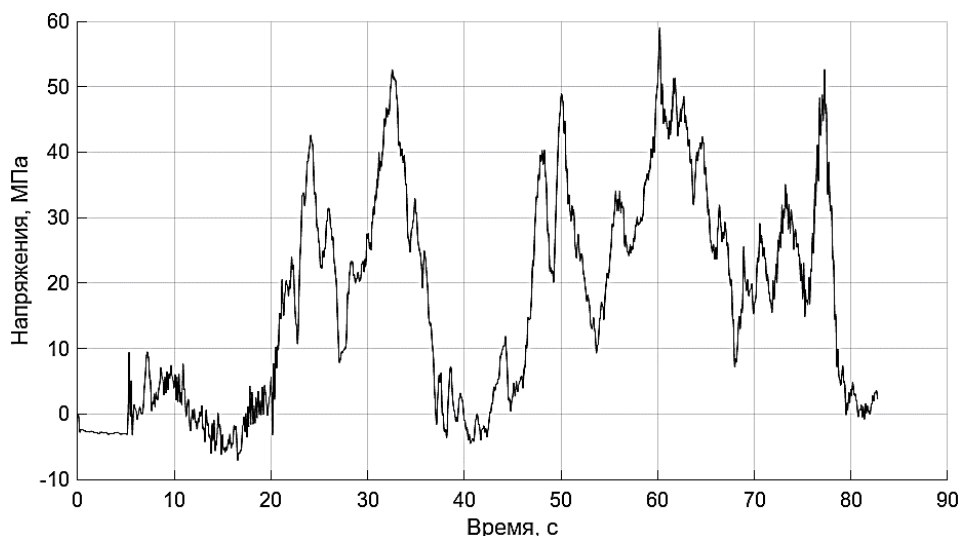


Рис. 2. Характерный эксплуатационный случайный процесс

На основе описанной методики синтеза при варьировании параметров спектральных плотностей мощности и статистических характеристик процессов сформирован расширенный набор из 12 000 реализаций случайных процессов, необходимый для обучения нейросетевой модели. Набор случайным образом разбит на обучающую, валидационную и тестовую выборки в соотношении 80 %/10 %/10 %; обучающая и валидационная выборки использовались в процессе обучения, тестовая – на заключительном этапе для проверки точности модели.

Формирование нейросетевой модели

Одномерные свёрточные нейронные сети предназначены для обработки числовых последовательностей. В задаче оценки долговечности в качестве такой последовательности использовано распределение максимумов случайного процесса напряжений (рис. 3). С точки зрения теории накопления повреждений рассмотрение последовательности максимумов процесса по существу соответствует подсчёту циклов нагружения.

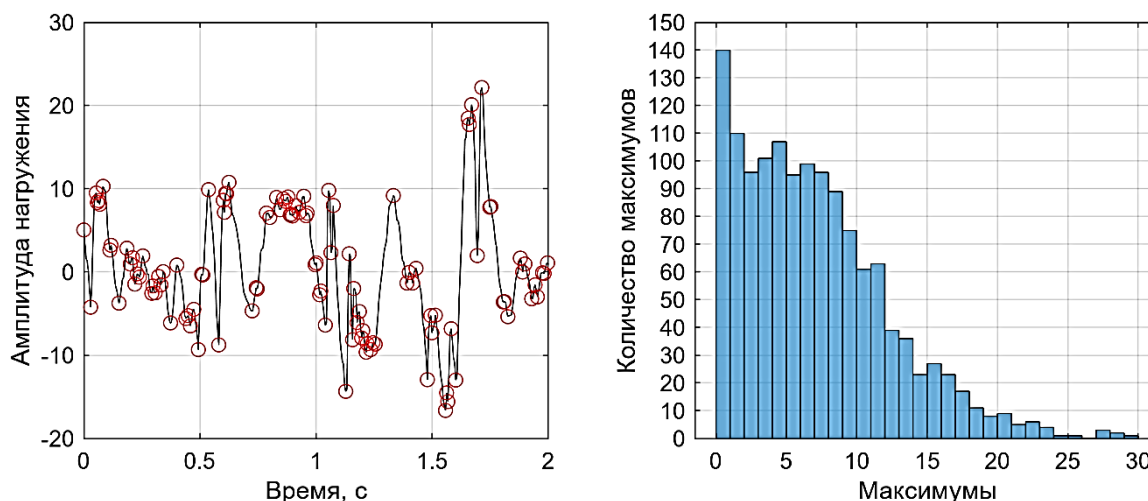


Рис. 3. Фрагмент случайного процесса с выделенными максимумами (слева) и гистограмма распределения максимумов процесса (справа)

Эталонные значения долговечности для обучения получены по методу «падающего дождя»: из исходного процесса выделяются максимумы, строится *rainflow*-распределение амплитуд, и по гипотезе линейного суммирования повреждений Пальмгрена – Майнера вычисляется накопленное повреждение:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i},$$

где n_i – число циклов с амплитудой i -го уровня; N_i – число циклов до разрушения при этой амплитуде, определяемое по кривой усталости; k – число уровней амплитуд (блоков нагружения); разрушению соответствует $D = 1$.

На рис. 4 сопоставлены три подхода к оценке долговечности. При временном подходе из исходного процесса выделяют максимумы, выполняют схематизацию (например, методом «падающего дождя») и по гипотезе линейного суммирования повреждений оценивают долговечность. При частотном подходе исходными данными служит спектральная плотность напряжений, по которой вычисляют спектральные моменты:

$$m_k = \int_0^{\infty} \omega^k G(\omega) d\omega,$$

где $G(\omega)$ – односторонняя спектральная плотность мощности процесса; k – порядок момента.

Далее по эмпирическим зависимостям переходят к распределению амплитуд и оценивают повреждение. В предлагаемом подходе максимумы процесса используются непосредственно в качестве входных данных свёрточной нейронной сети.

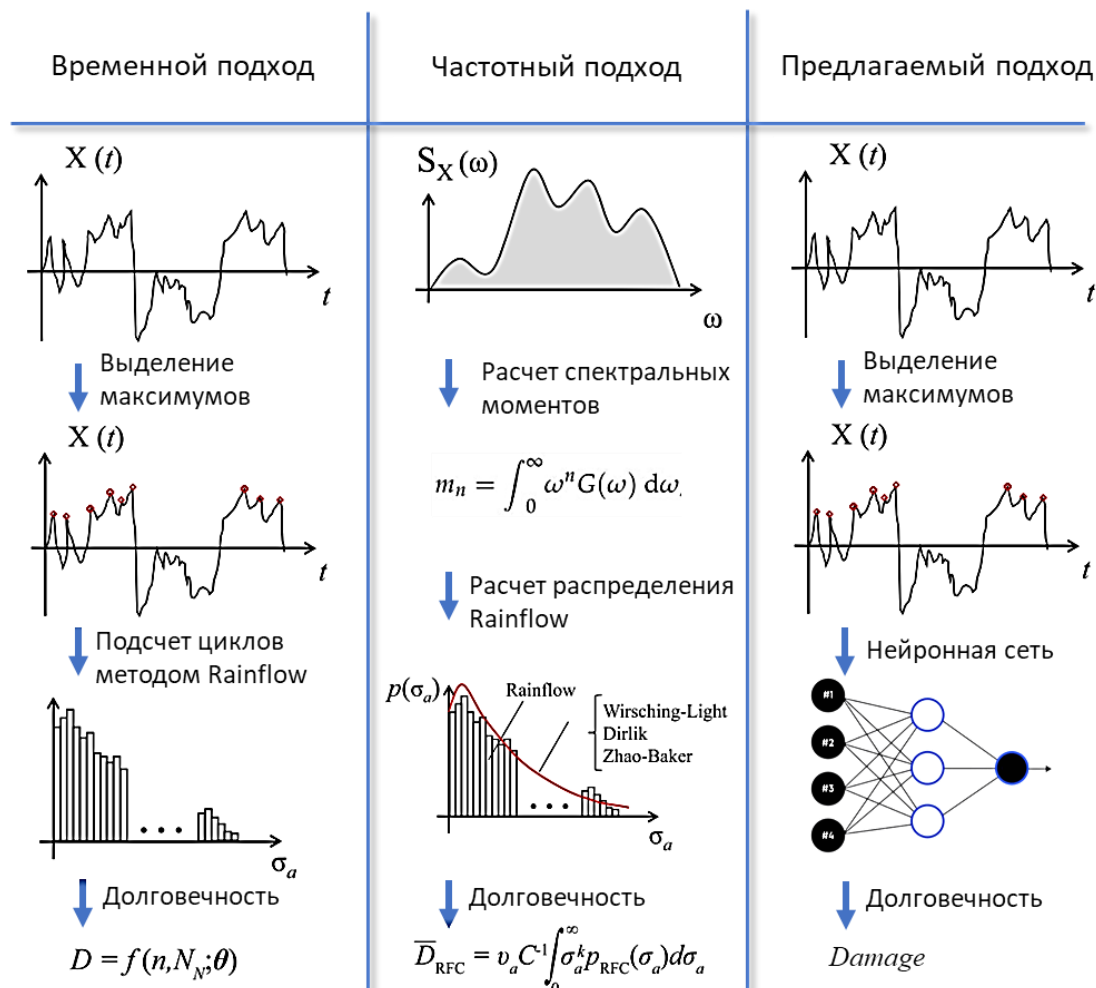


Рис. 4. Сопоставление временного, частотного и предлагаемого (нейросетевого) подходов к оценке долговечности

Структура свёрточной нейронной сети (рис. 5) выбрана по результатам анализа литературы и опыта работы с нейронными сетями. Она состоит из двух последовательно расположенных одномерных

свёрточных слоёв; после каждого свёрточного слоя применяются функция активации *ReLU* и слой нормализации данных. Далее следуют операция глобальной подвыборки по максимальному значению (*global max pooling*) и полносвязный слой, формирующий на выходе предсказанное значение относительной долговечности.

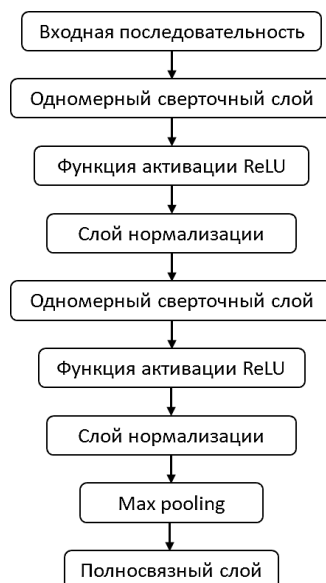


Рис. 5. Структура одномерной свёрточной нейронной сети

Выбор архитектуры обусловлен характером входных данных – распределением максимумов, представляющим собой одномерную последовательность фиксированной длины. Одномерные свёрточные слои выявляют локальные закономерности в распределении (положение максимумов, асимметрию и др.), при этом за счёт совместного использования весов число обучаемых параметров существенно меньше, чем у полносвязной сети сопоставимой ёмкости. Два последовательных свёрточных слоя обеспечивают иерархическое выделение признаков: первый слой формирует низкоуровневые локальные признаки, второй объединяет их в более сложные; увеличенная вдвое карта признаков второго слоя позволяет описать большее число комбинаций локальных особенностей без чрезмерного роста размерности модели.

Функция активации *ReLU* вводит нелинейность, обеспечивает разреженность активаций и снижает влияние затухания градиента при обучении. Слой нормализации стабилизирует и ускоряет обучение, уменьшая чувствительность к масштабу входных данных и распределению активаций. Операция глобальной подвыборки по максимальному значению (*global max pooling*) выделяет наиболее значимый признак вдоль всей последовательности и формирует представление фиксированной размерности, что сокращает число параметров и снижает риск переобучения по сравнению с полным разворачиванием карт признаков. Завершающий полносвязный слой отображает агрегированные признаки в скалярную оценку относительной долговечности. Поскольку входными данными является распределение фиксированной длины, а не длинная временная последовательность, применение более глубоких или рекуррентных архитектур признано избыточным: рассмотренная компактная сеть обеспечивает требуемую точность при умеренном числе параметров и устойчивости к переобучению на имеющемся объёме данных.

Оба свёрточных слоя использовали одинаковый размер фильтра, при этом карта признаков второго слоя выбиралась вдвое большей, чем первого. Оптимизация гиперпараметров выполнена байесовским методом средствами инструмента *Experiment Manager* пакета *MATLAB*; критерием оптимизации служила минимизация среднеквадратической ошибки на тестовой выборке:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2},$$

где d_i – эталонное значение относительной долговечности; y_i – значение, предсказанное моделью; n – объём выборки.

Диапазоны варьирования гиперпараметров: размер фильтра – от 4 до 80; карта признаков первого свёрточного слоя – от 5 до 80; скорость обучения (*learning rate*) – от 0,001 до 0,1. Максимальное число эпох обучения составляло до 100 с ранней остановкой по ошибке на валидационной выборке. Всего

средствами байесовской оптимизации оценено 28 конфигураций гиперпараметров; такое число испытаний обусловлено высокой выборочной эффективностью байесовского метода, обеспечивающего поиск близкого к оптимальному решения при существенно меньшем числе испытаний по сравнению с поиском по сетке или случайным поиском. Дальнейшее увеличение числа испытаний и эпох обучения не приводило к снижению ошибки на валидационной выборке.

Результаты обучения модели

Минимальная среднеквадратическая ошибка составила $RMSE = 0,0403$ при следующих значениях гиперпараметров: размер фильтра – 65, карта признаков первого свёрточного слоя – 39, скорость обучения – 0,0139. Зависимость фактических значений долговечности (полученных методом «падающего дождя») от предсказанных разработанной моделью приведена на рис. 6. Предсказанные значения группируются вдоль диагональной линии с коэффициентом корреляции Пирсона 0,96, что свидетельствует о хорошей сходимости модели во всём диапазоне долговечностей.

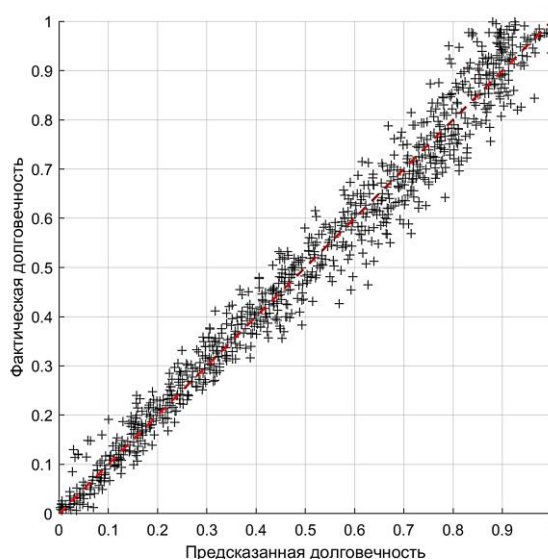


Рис. 6. Точность нейросетевой модели долговечности на тестовой выборке (фактические значения в сопоставлении с предсказанными)

Экспериментальная верификация модели

Для верификации модели проведены усталостные испытания конструктивно подобных образцов. Объектами испытаний служили плоские образцы III типа толщиной 2 мм с галтельным переходом по ГОСТ 25.502–79 с дополнительными грузами (рис. 7). Грузы – селективно подобранные шайбы и болты общей массой 47,6 г – подбирались из условия попадания первой изгибной частоты колебаний в диапазон частот случайного нагружения. Материал образцов – лёгкий сплав МА-15.

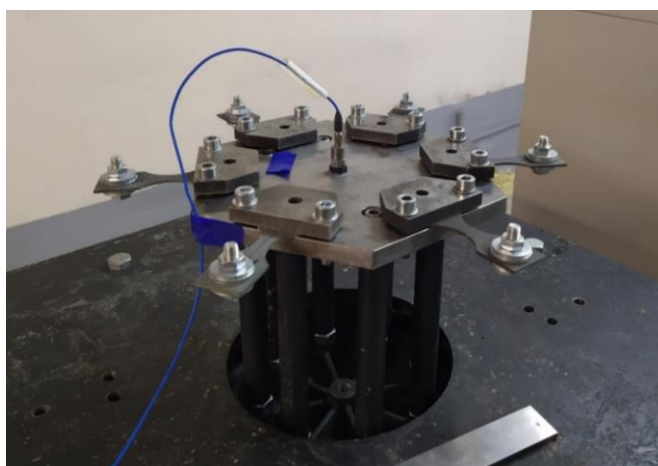


Рис. 7. Конструктивно подобные образцы в оснастке вибростенда

Нагружение осуществлялось в вертикальном направлении на электродинамическом вибростенде; на каждом уровне нагружения испытывалось по шесть образцов. Случайное нагружение задавалось в диапазоне частот от 15 до 80 Гц с постоянным уровнем спектральной плотности (спектр тапа «белый шум») при трёх значениях спектральной плотности виброускорения: 0,01245; 0,0153 и 0,018 $g^2/Гц$. Идентификация собственных частот и форм колебаний образца выполнена в модуле *ANSYS Modal*, спектральные плотности напряжений в наиболее опасной точке – в модуле *ANSYS Random Vibration*. Коэффициент демпфирования, определённый двумя экспериментальными методами, изменялся в диапазоне 0,0024–0,0036; в расчётах принято среднее значение 0,003. Подробно эксперимент описан в работе [30].

Для расчёта эталонных долговечностей использована кривая усталости материала МА-15, описываемая степенной зависимостью (уравнение Баскина):

$$\sigma_a^m N = \sigma_{-1}^m N_0,$$

где σ_a – амплитуда напряжений; N – число циклов до разрушения; σ_{-1} – предел выносливости; N_0 – базовое число циклов; m – показатель степени кривой усталости.

Для сплава МА-15 приняты: $\sigma_{вр} = 210$ МПа, $N_0 = 10^6$, $\sigma_{-1} = 81,52$ МПа, $m = 5,76$. Поскольку напряжения в образцах в ходе испытаний не контролировались, случайный процесс напряжений в опасном сечении генерировался по расчётной спектральной плотности напряжений; длина реализации принималась равной экспериментальной.

Полученные в результате испытаний значения времени до разрушения и результаты прогноза нейросетевой моделью приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Время до разрушения образцов (с) на разных уровнях случайного нагружения:
эксперимент и прогноз нейросетевой модели**

Образец	Уровень нагружения								
	0,01245 $g^2/Гц$			0,0153 $g^2/Гц$			0,018 $g^2/Гц$		
	эксперимент, с	модель, с	разница	эксперимент, с	модель, с	разница	эксперимент, с	модель, с	разница
1	17642	16587	6 %	8460	10283	18 %	8788	11489	24 %
2	12618	11903	6 %	14520	17245	16 %	13031	16873	23 %
3	18000	16932	6 %	16527	20271	18 %	12142	15946	24 %
4	18000	17474	3 %	18465	21924	16 %	13561	17266	21 %
5	–	–	–	18660	21923	15 %	13698	18085	24 %
6	–	–	–	22980	27238	16 %	16325	21670	25 %
7	–	–	–	14513	17303	16 %	12924	16270	21 %
8	–	–	–	14585	17140	15 %	–	–	–
9	–	–	–	14585	17469	17 %	–	–	–
10	–	–	–	16917	20155	16 %	–	–	–
11	–	–	–	18420	22083	17 %	–	–	–

Зависимость фактического (экспериментального) времени до разрушения от предсказанного нейросетевой моделью показана на рис. 8. С увеличением амплитуды нагружения погрешность прогноза в сравнении с экспериментом возрастает: для уровня 0,01245 $g^2/Гц$ расхождение не превышает 6 %, для 0,0153 $g^2/Гц$ – 18 %, для 0,018 $g^2/Гц$ – 25 %. Относительные долговечности, предсказанные нейронной сетью, изменяются от 0,94 до 1,32.

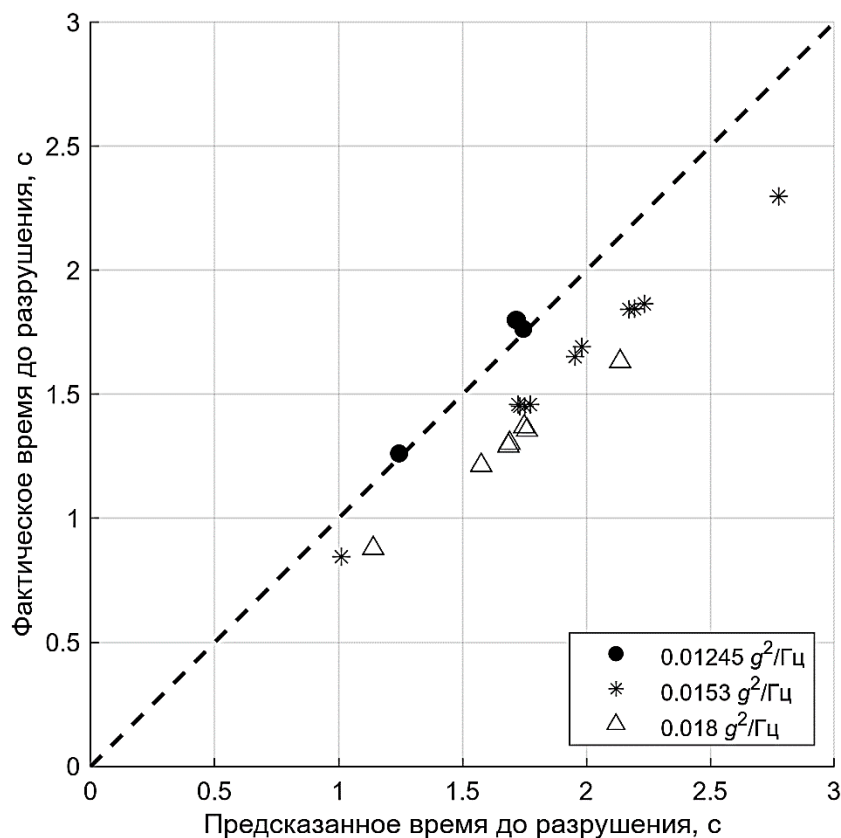


Рис. 8. Зависимость фактического времени до разрушения от предсказанного нейросетевой моделью

Рост погрешности прогноза при высоких уровнях нагружения связан с возникновением относительно высокого уровня напряжений – выше условного предела текучести материала. В этом случае механизм накопления повреждений необходимо описывать закономерностями малоциклового усталости, которые в настоящей работе не учитывались. С позиции усталости материала погрешность прогноза до 25 % можно считать удовлетворительной, в особенности с учётом значительного разброса экспериментальных данных – до 63 % для значений долговечности на одном и том же уровне нагружения (для уровня $0,0153 g^2/Гц$).

Достижение более высокой точности при разработке подобных интеллектуальных моделей затруднено по ряду причин. Во-первых, обучение по эталонным значениям, полученным расчётными методами, наследует их собственные погрешности: метод «падающего дождя» и гипотеза линейного суммирования повреждений [3] имеют известные ограничения, а кривая усталости материала обладает вероятностной природой и значительным разбросом, особенно на низких уровнях нагружения. Во-вторых, обучение непосредственно по экспериментальным данным более предпочтительно, однако требует большого объёма испытаний, получение которого затруднительно [41]. С учётом этих факторов нейросетевую модель оценки остаточного ресурса по совокупности результатов следует считать верифицированной.

Выводы

1 На основе ранее опубликованной авторами методики синтеза случайных процессов сформирован расширенный набор из 12 000 реализаций, дополненный нестационарным процессом с ударными воздействиями и реальной эксплуатационной записью с тензодатчиков; эталонные значения долговечности для обучения получены методом «падающего дождя» с линейным суммированием повреждений.

2 Разработана модель оценки остаточного ресурса конструкции при случайном нагружении на основе одномерной свёрточной нейронной сети, использующая в качестве входных данных распределение максимумов процесса и формирующая на выходе относительную долговечность в диапазоне от 0 до 1. Гиперпараметры модели оптимизированы байесовским методом; на тестовой выборке достигнута среднеквадратическая ошибка $RMSE = 0,0403$.

3 Выполнена экспериментальная верификация модели по результатам усталостных испытаний конструктивно подобных образцов из сплава МА-15 на электродинамическом вибростенде. Погрешность прогноза долговечности изменяется от 6 до 25 % и возрастает при высоких уровнях нагружения

вследствие перехода к малоцикловой усталости, не учитываемой моделью; с учётом разброса экспериментальных данных (до 63 %) модель признана верифицированной.

Список литературы

- 1 A comparative review of time- and frequency-domain methods for fatigue damage assessment / M. Muñiz-Calvente [et al.] // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Vol. 163. – Art. 107069. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.107069.
- 2 **Dirlik, T.** Dirlik and Tovo-Benasciutti spectral methods in vibration fatigue: a review with a historical perspective / T. Dirlik, D. Benasciutti // *Metals*. – 2021. – Vol. 11, No. 9. – Art. 1333. – DOI 10.3390/met11091333.
- 3 **Miner, M. A.** Cumulative damage in fatigue / M. A. Miner // *Journal of Applied Mechanics*. – 1945. – Vol. 12, No. 3. – P. A159–A164. – DOI 10.1115/1.4009458.
- 4 Vibration fatigue by spectral methods: from structural dynamics to fatigue damage – theory and experiments / J. Slavic, M. Boltezar, M. Mrsnik [et al.]. – Amsterdam : Elsevier, 2021. – 300 p. – DOI 10.1016/C2019-0-04580-3.
- 5 **Park, J. B.** Fatigue damage model comparison with formulated tri-modal spectrum loadings under stationary Gaussian random processes / J. B. Park, C. Y. Song // *Ocean Engineering*. – 2015. – Vol. 105. – P. 72–82. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2015.05.039.
- 6 **Braccesi, C.** Random fatigue. A new frequency domain criterion for the damage evaluation of mechanical components / C. Braccesi, F. Cianetti, L. Tomassini // *International Journal of Fatigue*. – 2015. – Vol. 70. – P. 417–427. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2014.07.005.
- 7 **Trapp, A.** Fatigue assessment of non-stationary random loading in the frequency domain by a quasi-stationary Gaussian approximation / A. Trapp, P. Wolfsteiner // *International Journal of Fatigue*. – 2021. – Vol. 148. – Art. 106214. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106214.
- 8 **Zorman, A.** Short-time fatigue-life estimation for non-stationary processes considering structural dynamics / A. Zorman, J. Slavič, M. Boltežar // *International Journal of Fatigue*. – 2021. – Vol. 147. – Art. 106178. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106178.
- 9 **Wolfsteiner, P.** Fatigue assessment of non-stationary random vibrations by using decomposition in Gaussian portions / P. Wolfsteiner // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2017. – Vol. 127. – P. 10–22. – DOI 10.1016/j.ijmecsci.2016.05.024.
- 10 **Wolfsteiner, P.** Fatigue life due to non-Gaussian excitation – an analysis of the fatigue damage spectrum using higher order spectra / P. Wolfsteiner, A. Trapp // *International Journal of*

References

- 1 A comparative review of time- and frequency-domain methods for fatigue damage assessment / M. Muñiz-Calvente [et al.] // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Vol. 163. – Art. 107069. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.107069.
- 2 **Dirlik, T.** Dirlik and Tovo-Benasciutti spectral methods in vibration fatigue: a review with a historical perspective / T. Dirlik, D. Benasciutti // *Metals*. – 2021. – Vol. 11, No. 9. – Art. 1333. – DOI 10.3390/met11091333.
- 3 **Miner, M. A.** Cumulative damage in fatigue / M. A. Miner // *Journal of Applied Mechanics*. – 1945. – Vol. 12, No. 3. – P. A159–A164. – DOI 10.1115/1.4009458.
- 4 Vibration fatigue by spectral methods : from structural dynamics to fatigue damage – theory and experiments / J. Slavic, M. Boltezar, M. Mrsnik [et al.]. – Amsterdam : Elsevier, 2021. – 300 p. – DOI 10.1016/C2019-0-04580-3.
- 5 **Park, J. B.** Fatigue damage model comparison with formulated tri-modal spectrum loadings under stationary Gaussian random processes / J. B. Park, C. Y. Song // *Ocean Engineering*. – 2015. – Vol. 105. – P. 72–82. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2015.05.039.
- 6 **Braccesi, C.** Random fatigue. A new frequency domain criterion for the damage evaluation of mechanical components / C. Braccesi, F. Cianetti, L. Tomassini // *International Journal of Fatigue*. – 2015. – Vol. 70. – P. 417–427. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2014.07.005.
- 7 **Trapp, A.** Fatigue assessment of non-stationary random loading in the frequency domain by a quasi-stationary Gaussian approximation / A. Trapp, P. Wolfsteiner // *International Journal of Fatigue*. – 2021. – Vol. 148. – Art. 106214. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106214.
- 8 **Zorman, A.** Short-time fatigue-life estimation for non-stationary processes considering structural dynamics / A. Zorman, J. Slavič, M. Boltežar // *International Journal of Fatigue*. – 2021. – Vol. 147. – Art. 106178. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106178.
- 9 **Wolfsteiner, P.** Fatigue assessment of non-stationary random vibrations by using decomposition in Gaussian portions / P. Wolfsteiner // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2017. – Vol. 127. – P. 10–22. – DOI 10.1016/j.ijmecsci.2016.05.024.
- 10 **Wolfsteiner, P.** Fatigue life due to non-Gaussian excitation – an analysis of the fatigue damage spectrum using higher order spectra / P. Wolfsteiner, A. Trapp // *International Journal of*

Fatigue. – 2019. – Vol. 127. – P. 203–216. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.005.

11 Non-stationarity and non-Gaussianity in vibration fatigue / J. Slavič [et al.] // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. – 2020. – Vol. 97. – P. 73–76. – DOI 10.1007/978-3-030-12676-6_7.

12 Assessment of fatigue damage induced by non-Gaussian bimodal processes with emphasis on spectral methods / S. Gao [et al.] // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 220. – Art. 108489. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2020.108489.

13 **Marques, J. M. E.** Variance of the fatigue damage in non-Gaussian stochastic processes with narrow-band power spectrum / J. M. E. Marques, D. Benasciutti // Structural Safety. – 2021. – Vol. 93. – Art. 102131. – DOI 10.1016/j.strusafe.2021.102131.

14 **Marques, J. M. E.** More on variance of fatigue damage in non-Gaussian random loadings – effect of skewness and kurtosis / J. M. E. Marques, D. Benasciutti // Procedia Structural Integrity. – 2020. – Vol. 25. – P. 101–111. – DOI 10.1016/j.prostr.2020.04.014.

15 **Marques, J. M. E.** Variability of the fatigue damage due to the randomness of a stationary vibration load / J. M. E. Marques, D. Benasciutti, R. Tovo // International Journal of Fatigue. – 2020. – Vol. 141. – Art. 105891. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2020.105891.

16 **Benasciutti, D.** The use of fractional order statistics for estimating nonparametric confidence intervals for quantiles of the fatigue damage computed in service random loadings / D. Benasciutti, J. M. E. Marques // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2023. – Vol. 1275, No. 1. – Art. 012020. – DOI 10.1088/1757-899X/1275/1/012020.

17 **Orlando, A.** Structural response and fatigue assessment of a small vertical axis wind turbine under stationary and non-stationary excitation / A. Orlando, L. Pagnini, M. P. Repetto // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 170. – P. 251–266. – DOI 10.1016/j.renene.2021.01.123.

18 **Niu, Q.** An empirical mode decomposition-based frequency-domain approach for the fatigue analysis of nonstationary processes / Q. Niu, S. Yang, X. Li // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2018. – Vol. 41, No. 9. – P. 1980–1996. – DOI 10.1111/ffe.12836.

19 A novel approach for stress cycle analysis based on empirical mode decomposition / R. Li [et al.] // MFPT 2018 : Intelligent Technologies and Equipment for Human Performance Monitoring. – 2018. – P. 4–12.

Fatigue. – 2019. – Vol. 127. – P. 203–216. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.005.

11 Non-stationarity and non-Gaussianity in vibration fatigue / J. Slavič [et al.] // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. – 2020. – Vol. 97. – P. 73–76. – DOI 10.1007/978-3-030-12676-6_7.

12 Assessment of fatigue damage induced by non-Gaussian bimodal processes with emphasis on spectral methods / S. Gao [et al.] // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 220. – Art. 108489. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2020.108489.

13 **Marques, J. M. E.** Variance of the fatigue damage in non-Gaussian stochastic processes with narrow-band power spectrum / J. M. E. Marques, D. Benasciutti // Structural Safety. – 2021. – Vol. 93. – Art. 102131. – DOI 10.1016/j.strusafe.2021.102131.

14 **Marques, J. M. E.** More on variance of fatigue damage in non-Gaussian random loadings – effect of skewness and kurtosis / J. M. E. Marques, D. Benasciutti // Procedia Structural Integrity. – 2020. – Vol. 25. – P. 101–111. – DOI 10.1016/j.prostr.2020.04.014.

15 **Marques, J. M. E.** Variability of the fatigue damage due to the randomness of a stationary vibration load / J. M. E. Marques, D. Benasciutti, R. Tovo // International Journal of Fatigue. – 2020. – Vol. 141. – Art. 105891. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2020.105891.

16 **Benasciutti, D.** The use of fractional order statistics for estimating nonparametric confidence intervals for quantiles of the fatigue damage computed in service random loadings / D. Benasciutti, J. M. E. Marques // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2023. – Vol. 1275, No. 1. – Art. 012020. – DOI 10.1088/1757-899X/1275/1/012020.

17 **Orlando, A.** Structural response and fatigue assessment of a small vertical axis wind turbine under stationary and non-stationary excitation / A. Orlando, L. Pagnini, M. P. Repetto // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 170. – P. 251–266. – DOI 10.1016/j.renene.2021.01.123.

18 **Niu, Q.** An empirical mode decomposition-based frequency-domain approach for the fatigue analysis of nonstationary processes / Q. Niu, S. Yang, X. Li // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2018. – Vol. 41, No. 9. – P. 1980–1996. – DOI 10.1111/ffe.12836.

19 A novel approach for stress cycle analysis based on empirical mode decomposition / R. Li [et al.] // MFPT 2018 : Intelligent Technologies and Equipment for Human Performance Monitoring. – 2018. – P. 4–12.

20 An improved VMD-based denoising method for time domain load signal combining wavelet with singular spectrum analysis / J. Fu [et al.] // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2020. – Vol. 2020. – Art. 1485937. – DOI 10.1155/2020/1485937.

21 **Soman, R.** Semi-automated methodology for damage assessment of a scaled wind turbine tripod using enhanced empirical mode decomposition and statistical analysis / R. Soman // *International Journal of Fatigue*. – 2020. – Vol. 134. – Art. 105475. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2020.105475.

22 Median ensemble empirical mode decomposition / X. Lang [et al.] // *Signal Processing*. – 2020. – Vol. 176. – Art. 107686. – DOI 10.1016/j.sigpro.2020.107686.

23 Метод оценки долговечности конструкций при стационарном и нестационарном случайных нагружениях с применением вариационной модовой декомпозиции / А. В. Ерпалов, К. А. Хоросhevskii, Е. А. Румянцева, И. В. Гадолина // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2024. – Т. 90, № 9. – С. 63–74. – DOI 10.26896/1028-6861-2024-90-9-63-74.

24 **Niesłony, A.** Mean stress effect correction in frequency-domain methods for fatigue life assessment / A. Niesłony, M. Böhm // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 101. – P. 347–354. – DOI 10.1016/j.proeng.2015.02.042.

25 **Niesłony, A.** Frequency-domain fatigue life estimation with mean stress correction / A. Niesłony, M. Böhm // *International Journal of Fatigue*. – 2016. – Vol. 91. – P. 373–381. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2016.02.031.

26 A unified mean stress correction model for fatigue thresholds prediction of metals / Y. Liu [et al.] // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – Vol. 223. – Art. 106787. – DOI 10.1016/j.engfracmech.2019.106787.

27 **Oh, G.** Effective stress and fatigue life prediction with mean stress correction models on a ferritic stainless steel sheet / G. Oh // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Vol. 157. – Art. 106707. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106707.

28 Выбор частоты дискретизации и оптимального метода цифровой обработки сигнала в задачах, учитывающих случайный процесс нагружения, для оценки долговечности / И. В. Гадолина, Н. Г. Лисаченко, Ю. А. Свирский, Д. А. Дубин // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2019. – Т. 85, № 7. – С. 64–72. – DOI 10.26896/1028-6861-2019-85-7-64-72.

29 **Gadolina, I. V.** Varied approaches to loading assessment in fatigue studies / I. V. Gadolina, N. A. Ma-

20 An improved VMD-based denoising method for time domain load signal combining wavelet with singular spectrum analysis / J. Fu [et al.] // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2020. – Vol. 2020. – Art. 1485937. – DOI 10.1155/2020/1485937.

21 **Soman, R.** Semi-automated methodology for damage assessment of a scaled wind turbine tripod using enhanced empirical mode decomposition and statistical analysis / R. Soman // *International Journal of Fatigue*. – 2020. – Vol. 134. – Art. 105475. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2020.105475.

22 Median ensemble empirical mode decomposition / X. Lang [et al.] // *Signal Processing*. – 2020. – Vol. 176. – Art. 107686. – DOI 10.1016/j.sigpro.2020.107686.

23 Method for assessing the durability of structures under stationary and non-stationary random loading using variational mode decomposition (VMD) / A. V. Erpalov, K. A. Khoroshevskii, E. A. Rumyanceva, I. V. Gadolina // *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. – 2024. – Vol. 90, No. 9. – P. 63–74. – DOI 10.26896/1028-6861-2024-90-9-63-74.

24 **Niesłony, A.** Mean stress effect correction in frequency-domain methods for fatigue life assessment / A. Niesłony, M. Böhm // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 101. – P. 347–354. – DOI 10.1016/j.proeng.2015.02.042.

25 **Niesłony, A.** Frequency-domain fatigue life estimation with mean stress correction / A. Niesłony, M. Böhm // *International Journal of Fatigue*. – 2016. – Vol. 91. – P. 373–381. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2016.02.031.

26 A unified mean stress correction model for fatigue thresholds prediction of metals / Y. Liu [et al.] // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – Vol. 223. – Art. 106787. – DOI 10.1016/j.engfracmech.2019.106787.

27 **Oh, G.** Effective stress and fatigue life prediction with mean stress correction models on a ferritic stainless steel sheet / G. Oh // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Vol. 157. – Art. 106707. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106707.

28 The choice of the sampling frequency and optimal method of signal digital processing in the problems considering a random loading process for assessing durability / I. V. Gadolina, N. G. Lisachenko, Yu. A. Svirskiy, D. A. Dubin // *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. – 2019. – Vol. 85, No. 7. – P. 64–72. – DOI 10.26896/1028-6861-2019-85-7-64-72.

29 **Gadolina, I. V.** Varied approaches to loading assessment in fatigue studies / I. V. Gadolina, N. A. Makhutov, A. V. Erpalov // *International*

khutov, A. V. Erpalov // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 144. – Art. 106035. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2020.106035.

30 **Хорошевский, К. А.** Расчётно-экспериментальное исследование влияния демпфирования конструкции на её долговечность при случайном нагружении / К. А. Хорошевский, А. В. Ерпалов, И. В. Гадолина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 47–57. – DOI 10.14529/mmph230406.

31 1D convolutional neural networks and applications: a survey / S. Kiranyaz, O. Avci, O. Abdeljaber [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 151. – Art. 107398. – DOI 10.1016/j.ymssp.2020.107398.

32 **Chen, J.** Fatigue modeling using neural networks : a comprehensive review / J. Chen, Y. Liu // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2022. – Vol. 45, No. 4. – P. 945–979. – DOI 10.1111/ffe.13640.

33 **Li, X.** Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks / X. Li, Q. Ding, J.-Q. Sun // Reliability Engineering & System Safety. – 2018. – Vol. 172. – P. 1–11. – DOI 10.1016/j.res.2017.11.021.

34 A novel method of multiaxial fatigue life prediction based on deep learning / J. Yang, G. Kang, Y. Liu, Q. Kan // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 151. – Art. 106356. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106356.

35 Machine learning-based predictions of fatigue life and fatigue limit for steels / L. He, Z. Wang, H. Akebono, A. Sugeta // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 90. – P. 9–19.

36 **Jimenez-Martinez, M.** Fatigue damage effect approach by artificial neural network / M. Jimenez-Martinez, M. Alfaro-Ponce // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 124. – P. 42–47.

37 **Zhang, X.-C.** A deep learning based life prediction method for components under creep, fatigue and creep-fatigue conditions / X.-C. Zhang, J.-G. Gong, F.-Z. Xuan // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 148. – Art. 106236. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106236.

38 Modelling fatigue life prediction of additively manufactured Ti-6Al-4V samples using machine learning approach / J. Horňas, J. Běhal, P. Homola [et al.] // International Journal of Fatigue. – 2023. – Vol. 169. – Art. 107483. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.107483.

39 Graphical feature construction-based deep learning model for fatigue life prediction of AM alloys / H. Wu, A. Wang, Z. Gan, L. Gan // Materials. – 2024. – Vol. 18, No. 1. – Art. 11. – DOI 10.3390/ma18010011.

Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 144. – Art. 106035. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2020.106035.

30 **Khoroshevsky, K. A.** A computational and experimental study of the influence of structural damping on a structure's durability under random loading / K. A. Khoroshevsky, A. V. Erpalov, I. V. Gadolina // Bulletin of the South Ural State University. Series «Mathematics, Mechanics, Physics». – 2023. – Vol. 15, No. 4. – P. 47–57. – DOI 10.14529/mmph230406.

31 1D convolutional neural networks and applications: a survey / S. Kiranyaz, O. Avci, O. Abdeljaber [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 151. – Art. 107398. – DOI 10.1016/j.ymssp.2020.107398.

32 **Chen, J.** Fatigue modeling using neural networks : a comprehensive review / J. Chen, Y. Liu // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2022. – Vol. 45, No. 4. – P. 945–979. – DOI 10.1111/ffe.13640.

33 **Li, X.** Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks / X. Li, Q. Ding, J.-Q. Sun // Reliability Engineering & System Safety. – 2018. – Vol. 172. – P. 1–11. – DOI 10.1016/j.res.2017.11.021.

34 A novel method of multiaxial fatigue life prediction based on deep learning / J. Yang, G. Kang, Y. Liu, Q. Kan // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 151. – Art. 106356. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106356.

35 Machine learning-based predictions of fatigue life and fatigue limit for steels / L. He, Z. Wang, H. Akebono, A. Sugeta // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 90. – P. 9–19.

36 **Jimenez-Martinez, M.** Fatigue damage effect approach by artificial neural network / M. Jimenez-Martinez, M. Alfaro-Ponce // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 124. – P. 42–47.

37 **Zhang, X.-C.** A deep learning based life prediction method for components under creep, fatigue and creep-fatigue conditions / X.-C. Zhang, J.-G. Gong, F.-Z. Xuan // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 148. – Art. 106236. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106236.

38 Modelling fatigue life prediction of additively manufactured Ti-6Al-4V samples using machine learning approach / J. Horňas, J. Běhal, P. Homola [et al.] // International Journal of Fatigue. – 2023. – Vol. 169. – Art. 107483. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.107483.

39 Graphical feature construction-based deep learning model for fatigue life prediction of AM alloys / H. Wu, A. Wang, Z. Gan, L. Gan // Materials. – 2024. – Vol. 18, No. 1. – Art. 11. – DOI 10.3390/ma18010011.

40 Multiaxial fatigue life prediction for various metallic materials based on the hybrid CNN-LSTM neural network / F. Heng, J. Gao, R. Xu [et al.] // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2023. – Vol. 46, No. 5. – P. 1979–1996. – DOI 10.1111/ffe.13977.

41 A physics-informed neural network approach to fatigue life prediction using small quantity of samples / D. Chen, Y. Li, K. Liu, Y. Li // *International Journal of Fatigue*. – 2023. – Vol. 166. – Art. 107270. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.107270.

42 An image recognition based multi-axial low-cycle fatigue life prediction method with CNN model / X. Sun, T. Zhou, K. Song, X. Chen // *International Journal of Fatigue*. – 2023. – Vol. 167. – Art. 107324. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.107324.

43 Remaining useful life prediction via a deep adaptive transformer framework enhanced by graph attention network / P. Liang, Y. Li, B. Wang, X. Yuan, L. Zhang // *International Journal of Fatigue*. – 2023. – Vol. 174. – Art. 107722.

44 Remaining useful life prediction of aero-engine enabled by fusing knowledge and deep learning models / Y. Li, Y. Chen, Z. Hu, H. Zhang // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2023. – Vol. 229. – Art. 108869.

45 **Sun, H.** A novel artificial neural network model for wide-band random fatigue life prediction / H. Sun, Y. Qiu, J. Li // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Vol. 157. – Art. 106701. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106701.

46 Novel models for fatigue life prediction under wideband random loads based on machine learning / H. Sun, Y. Qiu, J. Li [et al.] // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2024. – Vol. 47. – No. 9. – P. 3342–3360. – DOI 10.1111/ffe.14371.

47 Fatigue life prediction based on modified narrowband method under broadband random vibration loading / S.-D. Wu, D.-G. Shang, P.-C. Liu [et al.] // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Vol. 159. – Art. 106832. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.106832.

48 A new frequency-domain method for fatigue prediction of offshore structures under wideband random loadings / B. Wu, W. Lu, X. Li [et al.] // *Ocean Engineering*. – 2023. – Vol. 281. – Art. 114812. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2023.114812.

49 Random vibration fatigue behavior of directionally solidified superalloy: experiments and evaluation of life prediction methods / H. Lu, J. Wang, Y. Lian [et al.] // *International Journal of Fatigue*. – 2023. – Vol. 175. – Art. 107746. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2023.107746.

50 **Zhang, H.** Data-based deep learning for random vibration fatigue life prediction of car seat frame /

40 Multiaxial fatigue life prediction for various metallic materials based on the hybrid CNN-LSTM neural network / F. Heng, J. Gao, R. Xu [et al.] // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2023. – Vol. 46, No. 5. – P. 1979–1996. – DOI 10.1111/ffe.13977.

41 A physics-informed neural network approach to fatigue life prediction using small quantity of samples / D. Chen, Y. Li, K. Liu, Y. Li // *International Journal of Fatigue*. – 2023. – Vol. 166. – Art. 107270. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.107270.

42 An image recognition based multi-axial low-cycle fatigue life prediction method with CNN model / X. Sun, T. Zhou, K. Song, X. Chen // *International Journal of Fatigue*. – 2023. – Vol. 167. – Art. 107324. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.107324.

43 Remaining useful life prediction via a deep adaptive transformer framework enhanced by graph attention network / P. Liang, Y. Li, B. Wang, X. Yuan, L. Zhang // *International Journal of Fatigue*. – 2023. – Vol. 174. – Art. 107722.

44 Remaining useful life prediction of aero-engine enabled by fusing knowledge and deep learning models / Y. Li, Y. Chen, Z. Hu, H. Zhang // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2023. – Vol. 229. – Art. 108869.

45 **Sun, H.** A novel artificial neural network model for wide-band random fatigue life prediction / H. Sun, Y. Qiu, J. Li // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Vol. 157. – Art. 106701. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106701.

46 Novel models for fatigue life prediction under wideband random loads based on machine learning / H. Sun, Y. Qiu, J. Li [et al.] // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2024. – Vol. 47. – No. 9. – P. 3342–3360. – DOI 10.1111/ffe.14371.

47 Fatigue life prediction based on modified narrowband method under broadband random vibration loading / S.-D. Wu, D.-G. Shang, P.-C. Liu [et al.] // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Vol. 159. – Art. 106832. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.106832.

48 A new frequency-domain method for fatigue prediction of offshore structures under wideband random loadings / B. Wu, W. Lu, X. Li [et al.] // *Ocean Engineering*. – 2023. – Vol. 281. – Art. 114812. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2023.114812.

49 Random vibration fatigue behavior of directionally solidified superalloy: experiments and evaluation of life prediction methods / H. Lu, J. Wang, Y. Lian [et al.] // *International Journal of Fatigue*. – 2023. – Vol. 175. – Art. 107746. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2023.107746.

50 **Zhang, H.** Data-based deep learning for random vibration fatigue life prediction of car seat frame /

H. Zhang, S. Wang // Nonlinear Dynamics. – 2025. – Vol. 113, No. 5. – P. 4121–4145. – DOI 10.1007/s11071-024-09972-3.

51 **Алюнов, Д. Ю.** Рекуррентная нейронная сеть для контроля ширины спектра нестационарного случайного сигнала / Д. Ю. Алюнов // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 2. – С. 5–17. – DOI 10.47026/1810-1909-2023-2-5-17.

52 **Федотов, М. В.** Предиктивная аналитика технического состояния систем тепловозов с использованием нейросетевых прогнозных моделей / М. В. Федотов, В. В. Грачев // Бюллетень результатов научных исследований. – 2021. – № 3. – С. 102–114. – DOI 10.20295/2223-9987-2021-3-102-114.

53 **Ломакина, Л. С.** Диагностирование и прогнозирование состояний технических и технологических объектов на основе ансамблевых технологий машинного обучения / Л. С. Ломакина, А. Н. Двитовская, К. А. Корелин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2025. – № 4 (40). – С. 26–37. – DOI 10.25729/ESI.2025.40.4.003.

H. Zhang, S. Wang // Nonlinear Dynamics. – 2025. – Vol. 113, No. 5. – P. 4121–4145. – DOI 10.1007/s11071-024-09972-3.

51 **Alyunov, D. Yu.** Recurrent neural network for controlling the spectrum width of a non-stationary random signal / D. Yu. Alyunov // Bulletin of the Chuvash University. – 2023. – No. 2. – P. 5–17. – DOI 10.47026/1810-1909-2023-2-5-17.

52 **Fedotov, M. V.** Predictive analytics of the technical condition of diesel locomotive systems using neural network predictive models / M. V. Fedotov, V. V. Grachev // Bulletin of Scientific Research Results. – 2021. – No. 3. – P. 102–114. – DOI 10.20295/2223-9987-2021-3-102-114.

53 **Lomakina, L. S.** Diagnostics and forecasting of technical and technological object states based on ensemble machine learning technologies / L. S. Lomakina, A. N. Dvitovskaya, K. A. Korelin // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. – 2025. – No. 4 (40). – P. 26–37. – DOI 10.25729/ESI.2025.40.4.003.

A. V. Erpalov, K. A. Khoroshevsky, I. V. Gadolina

RESIDUAL LIFE ASSESSMENT OF STRUCTURES UNDER RANDOM LOADING BASED ON A ONE-DIMENSIONAL CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

Abstract. A model is proposed for assessing the residual life of structural elements under random vibration loading, based on a one-dimensional convolutional neural network (1D-CNN) that takes the stress-process maxima distribution as input and outputs the relative durability. A training set of 12,000 realizations of stationary and non-stationary random processes – including processes with shock impacts and real operational records – was generated; the reference durability values were obtained by the rainflow method with linear damage summation, and the hyperparameters were tuned by Bayesian optimization (minimum error $RMSE = 0.0403$). Experimental verification on MA-15 light-alloy specimens tested on an electrodynamic shaker at three loading levels yielded a prediction error of 6 to 25 %, increasing at high levels owing to low-cycle fatigue. Taking the scatter of the experimental data into account, the model is considered verified.

Keywords: residual life; fatigue life; random loading; one-dimensional convolutional neural network; rainflow method.

For citation: Erpalov, A. V. Residual life assessment of structures under random loading based on a one-dimensional convolutional neural network / A. V. Erpalov, K. A. Khoroshevsky, I. V. Gadolina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 194–209. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_194.

Сведения об авторах

Ерпалов Алексей Викторович
Южно-Уральский государственный
университет (национальный
исследовательский университет)
(ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»),
старший научный сотрудник,
кандидат технических наук,
e-mail: erpalovav@susu.ru

Information about the authors

Erpalov Aleksey Victorovich
South Ural State University
(National Research University)
(FSAEIHE SUSU (NRU)),
Senior Researcher,
Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: erpalovav@susu.ru

Хорошевский Кирилл Антонович
Южно-Уральский государственный
университет (национальный
исследовательский университет)
(ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»),
инженер,
e-mail: khoroshevskiika@susu.ru

Гадолина Ирина Викторовна
Институт машиноведения
им. А. А. Благонравова
Российской академии наук,
старший научный сотрудник,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: gadolina@mail.ru

Khoroshevsky Kirill Antonovich
South Ural State University
(National Research University)
(FSAEIHE SUSU (NRU)),
Engineer,
e-mail: khoroshevskiika@susu.ru

Gadolina Irina Victorovna
Institute of Machines Science named
after A. A. Blagonravov of the Russian
Academy of Sciences (IMASH RAS),
Senior Researcher,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: gadolina@mail.ru

И. В. Колесников, К. Н. Политыко, А. И. Азоян, М. М. Четверик

СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ CrAlSiN/Cr *

Аннотация. Исследованы структурные особенности, механические и трибологические свойства многослойного металлокерамического покрытия CrAlSiN/Cr, нанесенного методом физического осаждения из паровой фазы (PVD) на подложки из стали 40ХН. Архитектура покрытия сочетает адгезионный слой Cr, наноструктурный функциональный слой CrAlSiN, промежуточный слой Cr с чередованием до 12 слоев и завершающий слой CrAlSiN, предназначенные для повышения несущей способности и снижения распространения трещин при скользящем контакте. Методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии и наноиндентирования исследованы микроструктура, элементный состав, твердость, модуль упругости. Трибологические испытания проводились по схеме «шар – диск», где контертелом являлся шар из Al_2O_3 , которые позволили установить коэффициент трения и скорость износа при сухом трении.

Трибологические испытания подтвердили стабильность коэффициента трения и высокую износостойкость, что обусловлено многослойной архитектурой и оптимальными механическими свойствами материала. Чередование жестких керамических слоев CrAlSiN с пластичными прослойками Cr создает эффективную систему внутренних барьеров, препятствующих распространению трещин и локализирующих пластическую деформацию. Такое сочетание структурных особенностей и механических характеристик делает покрытие CrAlSiN/Cr эффективным решением для деталей, работающих в условиях высоких нагрузок и ограниченного смазывания.

Ключевые слова: многослойные покрытия, PVD-технология, металлокерамические композиты, CrAlSiN/Cr, трибологические испытания, износостойкость, микротвердость, коэффициент трения, нанокompозитные структуры

Для цитирования: Структура, свойства и износостойкость многослойных металлокерамических покрытий CrAlSiN/Cr / И. В. Колесников, К. Н. Политыко, А. И. Азоян, М. М. Четверик // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 210–218. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_210.

Введение

Развитие современного машиностроения сопровождается ужесточением требований к ресурсу и надежности деталей трения, работающих при повышенных контактных напряжениях, скоростях скольжения и ограниченном объеме смазки [1, 2]. Традиционные нитридные покрытия типа TiN и CrN позволили существенно повысить износостойкость и коррозионную стойкость стальных деталей, однако многослойные системы часто ограничены по сочетанию твердости, трещиностойкости и сопротивления усталостному разрушению при циклическом нагружении, но с большим функциональным ресурсом, который необходимо реализовывать [3, 4].

Одним из наиболее эффективных подходов к повышению ресурса деталей машин является формирование многослойных и градиентных нитридных PVD-покрытий с контролируемой архитектурой слоя [5, 6]. Наноламинированная структура, чередование высокотвердых и более вязких слоев, а также изменение химического состава по толщине позволяют одновременно повышать твердость, вязкость, сопротивление трещинообразованию и критическую нагрузку разрушения. В работе [7] показано, что многослойные TiN/CrN, CrN/Cr₂N, CrTiN/CrCN и аналогичные системы демонстрируют сниженный коэффициент трения и меньший износ по сравнению с однослойными покрытиями за счет эффективного рассеяния энергии трещин и подавления локальной концентрации напряжений на интерфейсах.

Особый интерес для машиностроения представляют многослойные нитридные покрытия на основе систем MeN/Me, в которых введение Al и Si формирует нанокompозитную структуру и способствует образованию термостойких оксидных слоев в условиях трения [8, 9]. В работе [10] показано, что

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-30007-П. – URL: <https://rscf.ru/project/21-79-30007/> в Ростовском государственном университете путей сообщения.

комбинированные покрытия MeN/DLC (в частности, CrAlSiN/DLC) позволяют снизить коэффициент и адаптировать свойства слоя к различным режимам нагружения. Такие многослойные покрытия имеют перспективу использования в режущем инструменте благодаря устойчивости к окислительному и абразивному износу за счет сочетания высокой твердости и низкого коэффициента трения [11, 12]. В работе [13] показано, что оптимизация архитектурного слоя, например, градиентное распределение Al и Si, а также наличие слоев Cr или CrN позволяет расширить диапазон циклических нагрузок и снизить риск образования внутренних дефектов (межслойное отслаивание, образование трещин).

Из проведенного обзора литературных источников можно сделать вывод, что влияние структуры многослойных покрытий, полученных PVD-методом, на трибологические и механические свойства недостаточно изучено. Это особенно актуально для условий сухого скольжения, характерных для элементов подвижных соединений, направляющих и уплотняющих поверхностей, где переход к многослойным нитридным покрытиям способен обеспечить снижение износа и стабилизацию работы узлов при ограниченной смазке. В этой связи целью настоящей работы является комплексное исследование структуры, механических и трибологических свойств многослойного нитридного PVD-покрытия CrAlSiN/Cr, а также оценка влияния многослойной архитектуры на ресурс и надежность узлов трения машиностроения.

Методика исследований

Синтез металлокерамических композиционных покрытий CrAlSiN/Cr осуществлялся методом физического осаждения в вакуумной камере BRV600 [14]. Задача технологии нанесения этих покрытий может быть решена путем катодно-дугового испарения, когда используется согласованная работа катодов Cr и силумина Al-Si. У данных покрытий значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) соседних металлических и керамических слоев отличаются незначительно. При этом металлические слои Cr, в отличие от керамики CrAlSiN, обладают высокой пластичностью, что априори способствует релаксационным процессам. Эти свойства рассматриваемых покрытий обеспечивают их более высокую технологичность при вакуумном ионно-плазменном напылении на установке BRV600.

Архитектура покрытий CrAlSiN/Cr регулируется небольшим числом технологических параметров: временем напыления каждого слоя, которое определяет их толщину, и частотой перемещения (открытия-закрытия) заслонки, с помощью которой регулируются толщина и число слоев. Вольт-амперные характеристики режима напыления подбирались при оптимизации состава слоя CrAlSiN и в дальнейшем, в процессе формирования многослойного покрытия, как правило, оставались неизменными. Целевым направлением при получении многослойного покрытия было формирование заданного элементного состава слоев CrAlSiN в композиционном покрытии, которое ориентировалось на примерно эквивалентный состав Cr (~25 ат. %) и Al (~25 ат. %) и на содержание Si как аморфизирующего элемента в пределах 4–8 %. Концентрация N, как основного элемента при формировании нитридных фаз покрытия и определяющего его керамическую природу, должно быть в пределах (~45–50 ат. % N).

Реализация многослойной системы осуществлялась по схеме: Cr (подслой) + CrAlSiN + Cr + CrAlSiN + Cr... с общим количеством слоев 12 и завершающим слоем CrAlSiN на поверхности. Для увеличения адгезии между подложкой из стали 40XH и нитридным слоем катодно-дуговым методом осаждался подслей Cr в течение 1 ч. Нитридный слой CrAlSiN осаждался катодно-дуговым методом с двух катодов в среде N (% N – 11 %) и Ar (% Ar – 6 %) в течение 45 мин. Металлический слой Cr осаждался в течение 1 ч в среде Ar (% Ar – 7 %). Для исследования влияния толщины на механические свойства была проведена серия экспериментов, в которой время осаждения нитридного слоя CrAlSiN составляло 1,5 ч, а промежуточного слоя Cr – до 2 ч.

Определение толщины, структуры, состава покрытия осуществлялось методами растровой электронной микроскопии (РЭМ, SEM) с использованием однолучевого микроскопа ZEISS EVO MA 18, оснащенного энергодисперсионным анализатором X-Max 50.

Исследование твердости H и модуля упругости E проводили на приборе NanoTest 600. Посредством изменения нагрузки в широких пределах платформа позволяет проводить измерения в нано- и микромасштабе по методу непрерывного индентирования [15]. Процедура состояла из 10 уколов в различных точках поверхности покрытия с установленным ограничением максимальной глубины проникновения индентора, с контролем максимальной глубины внедрения индентора не более 10 % от толщины покрытия. Были получены значения микротвердости H и приведенного модуля упругости E_r , а также подсчитаны значения H/E_r и H^3/E_r^2 . Эксперимент реализован при соблюдении ГОСТ 8.748–2011 и рекомендаций по статистической обработке данных, изложенных в ГОСТ Р 50779.25–2005 и ГОСТ Р ИСО 16269-4–2017.

Определение трибологических свойств покрытия было выполнено в соответствии с методиками DIN 50324 и ASTM G99 [16, 17] на трибометре TRB по схеме испытаний «шар – диск» (контртелло Al_2O_3

диаметром 6 мм), профиль лунки износа определяли при помощи оптического профилометра Zygo NewView 600. Такой подход позволил определить коэффициент трения μ , интенсивность объемного износа образца I. Параметры исследования: радиус 2,2 мм; линейная скорость 1 мм/с; вертикальная нагрузка 10 Н; длина пути 1,8 м; время испытания 1800 с. Расчет интенсивности износа производился по формуле

$$I = \frac{V}{N \cdot L}, \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м},$$

где V – объем изношенного материала; N – нормальная нагрузка, Н; L – общий путь трения, м.

Результаты исследований

На рис. 1 представлена кросс-секция, специально выполненная в зоне случайно образовавшегося скола покрытия.

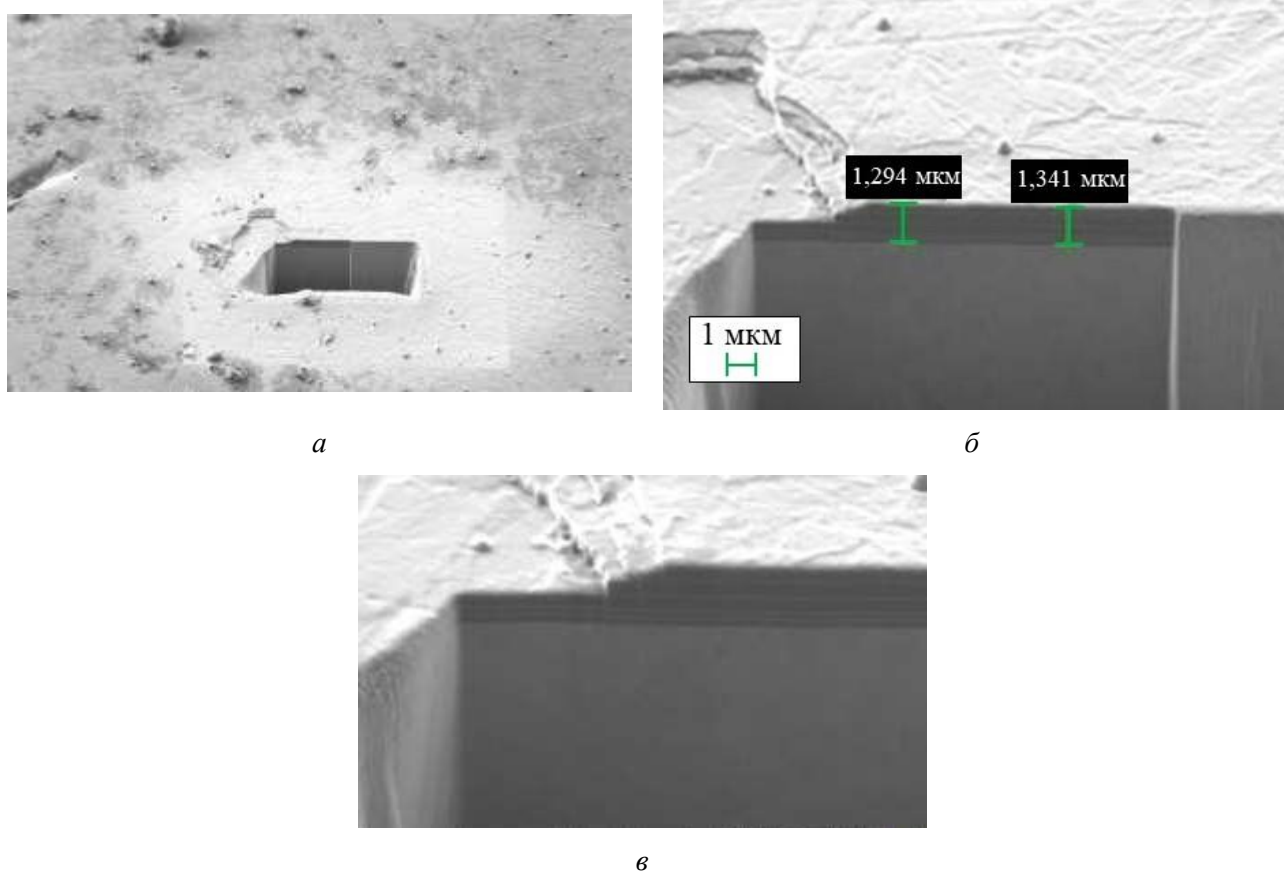


Рис. 1. Многослойное композиционное металлокерамическое покрытие CrAlSiN/Cr, кросс-секция СЭМ:

а – общий вид кросс-секции; *б* – поперечное сечение покрытия в зоне скола;
в – микроструктура покрытия в поперечном сечении при максимальном увеличении микроскопа

На рис. 1, *б* хорошо видно, что разрушение покрытия происходит по границам тонких металлических слоев Cr путем обламывания отдельных слоев CrAlSiN. По-видимому, механизм деградации подобных металлокерамических покрытий начинается с пластической деформации металлического слоя (Cr), которая превысила критическое значение. Если это значение не превышено, то в пределах докритической деформации высокая пластичность металлических слоев покрытия должна обеспечивать процессы релаксации внутренних напряжений при эксплуатации покрытий в условиях трения и износа.

На рис. 2 приведены несколько типовых вариантов структуры исследуемых покрытий CrAlSiN/Cr: относительно тонкое покрытие с соизмеримыми по толщине металлокерамическими слоями (рис. 2, *а, б*); типичный вид поверхности покрытия системы CrAlSiN/Cr (рис. 2, *в*).

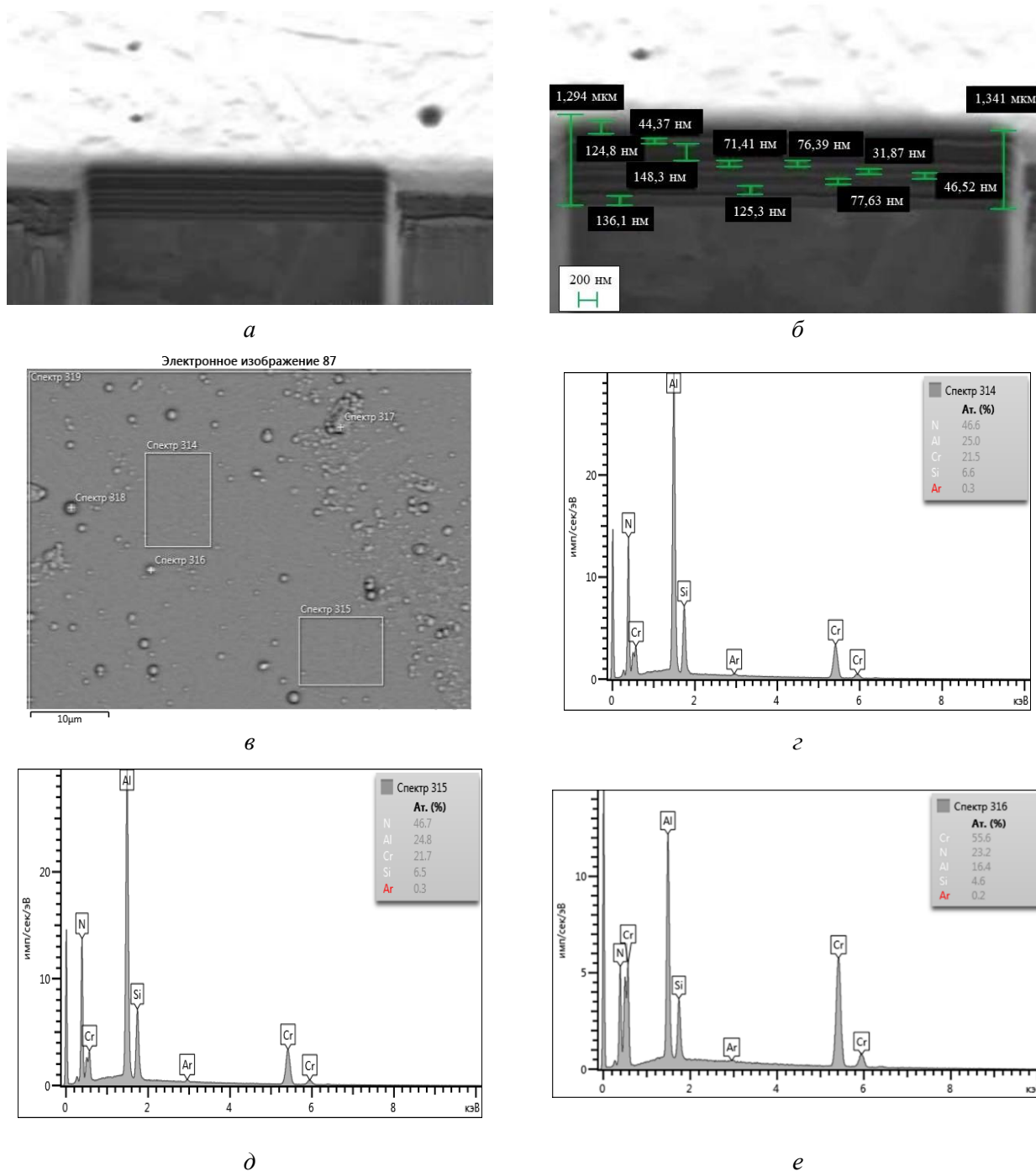


Рис. 2. Многослойные композиционные металлокерамические покрытия CrAlSiN/Cr, СЭМ:

а, б – поперечное сечение тонкого (1,13 мкм) покрытия, кросс-секция СЭМ;
 в – электронное изображение с областями сканирования, кросс-секция СЭМ;
 г – распределение элементов в зоне покрытия («Спектр 314»); д – распределение элементов в зоне покрытия («Спектр 315»); е – распределение элементов в зоне капельной фазы («Спектр 316»)

Представленные микроснимки показывают, что полученные покрытия имеют однородную структуру, плотное прилегание слоев друг к другу и к подложке. Внутренних дефектов, способных повлиять на свойства покрытий при механических или трибологических испытаниях, не обнаружено. На поверхности покрытий имеется капельная фаза Cr (рис. 2, в, е), однако размеры капель незначительны ($d_k \sim 1,5$ мкм, рис. 2, е), и распределены они на расстояниях, значительно превышающих их размеры (рис. 2, в).

Аналогичная поверхность часто наблюдается у вакуумных ионно-плазменных покрытий при отсутствии или недостаточной эффективности магнитной сепарации. Подобное распределение капельной

фазы не оказывает влияния на трибологические характеристики покрытий при испытаниях на трение скольжения. При механических испытаниях по методу непрерывного индентирования влияние капельной фазы сказывается только на некоторых статистических показателях и не влияет на усредненные значения твердости H и модуля упругости E покрытия.

Очевидно, что в многослойных покрытиях CrAlSiN/Cr механические свойства H и E , определенные методом непрерывного индентирования, будут зависеть от толщины и взаиморасположения металлических и керамических слоев в покрытии. Для исследования влияния толщины металлокерамических 2D-композиционных покрытий CrAlSiN/Cr на механические свойства нами получены покрытия с толщиной 1,3 мкм и 3,6 мкм. Механические характеристики покрытий CrAlSiN/Cr с разной толщиной представлены в таблице.

Механические характеристики композиционного покрытия CrAlSiN/Cr с различной толщиной

Покрытие	Толщина покрытий	Микротвердость H , ГПа	Приведенный модуль упругости E_r , ГПа	H/E_r	H^3/E_r^2
CrAlSiN/Cr	1,3 мкм	$31,56 \pm 5,55$	$310,84 \pm 19,99$	$0,101 \pm 0,015$	$0,341 \pm 0,119$
CrAlSiN/Cr	3,6 мкм	$29,57 \pm 7,53$	$306,13 \pm 56,99$	$0,096 \pm 0,012$	$0,289 \pm 0,149$

Результаты сравнения данных в таблице показали, что при увеличении толщины покрытия значение микротвердости снизилось на ~6 %, а значение приведенного модуля упругости практически не изменилось. Это, в свою очередь, привело к некоторому снижению значений H/E_r и H^3/E_r^2 . Следует отметить, что существенно возросла неоднородность характеристик покрытия. Отношение величины среднеквадратического отклонения к величине среднего значения для микротвердости выросло с 17,5 % у тонкого покрытия до 25 % у толстого покрытия, для приведенного модуля упругости – с 6 до 19 %. Кроме того, у металлокерамических покрытий CrAlSiN/Cr (см. таблицу) механические характеристики H и E в целом оказываются выше, чем у нитридуглеродных покрытий TiN/DLC [18]. В какой-то степени это может быть связано с наличием релаксационных прослоек Ti между нитридными (TiN) и углеродными (DLC) слоями покрытия TiN/DLC.

Таким образом, результаты индентирования не дают ясных корреляций со структурой покрытий CrAlSiN/Cr. Так, вопреки логике, увеличение толщины покрытия с уменьшением относительной толщины металлических слоев привело к снижению среднестатистических значений механических свойств покрытия.

В течение проведения всего цикла трибологических испытаний шла непрерывная запись изменения коэффициента трения в зависимости от пройденного пути. Интерпретация изменения коэффициента трения представлена на рис. 3.

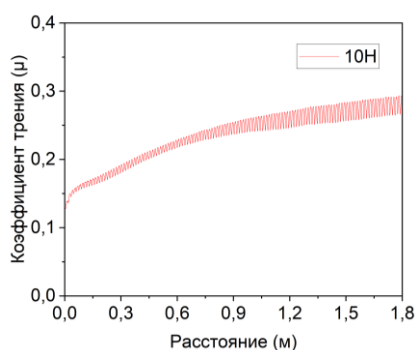


Рис. 3. Графики коэффициентов трения μ в зависимости от пройденного пути L образца при нагрузке 10 Н

После испытаний была исследована морфология поверхности на профилометре NewView 600s для оценки износа нанесенного слоя. Исследования поверхности показали отсутствие износа у образца после трибоиспытаний при вертикальной нагрузке 10 Н (рис. 4).

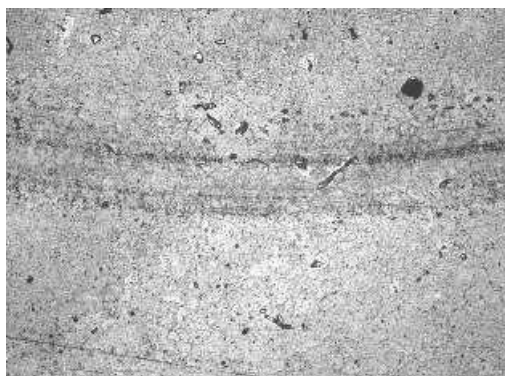


Рис. 4. Поверхность покрытия CrAlSiN/Cr после испытания при нагрузке 10 Н

Проведенное исследование трибологических свойств позволило установить, что многослойное покрытие CrAlSiN/Cr имеет низкий и стабильный коэффициент трения, монотонно увеличивающийся в течение всего пути трения от 0,14 до 0,25. Данное поведение коэффициента трения объясняется сочетанием высокой твердости и упругой деформации керамического слоя CrAlSiN (см. таблицу). Также данные факты подтверждаются снимком дорожки трения после испытания (см. рис. 4). Дорожка трения выглядит гладкой, без явных следов износа, поверхностных дефектов. Наблюдаются следы приработки контртела (Al_2O_3) без явно выраженного износа покрытия, реализуется мягкий режим трения без потери объема материала покрытия. Именно поэтому интенсивность износа для покрытия CrAlSiN/Cr при 10 Н не рассчитывается. Важным фактором, обеспечившим отсутствие износа при данных параметрах исследования, является наличие промежуточных слоев Cr и многослойной архитектуры поверхности. Чередование металлических слоев с керамическими формирует систему внутренних барьеров, локализуя деформацию и препятствующую трещинообразованию. Полученное значение коэффициента трения $\mu = 0,25$ типично для многослойных наноструктурированных нитридных покрытий с высокой твердостью и износостойкостью [5, 8, 12].

Анализ экспериментальных результатов (см. рис. 3, 4) позволяет предположить, что при данных условиях испытания (скорость 1 мм/с; вертикальная нагрузка 10 Н; длина пути 1,8 м) реализуется режим приработки контртела с поверхностью покрытия, поэтому для получения значения интенсивности износа требуется провести дополнительные исследования с увеличением параметров испытания.

Таким образом, при нагрузке 10 Н у многослойного покрытия CrAlSiN/Cr наблюдается практически нулевой износ покрытия, не фиксируемый профилометром. Вклад многослойной структуры состоит в том, что она сочетает высокую твердость керамического слоя CrAlSiN с повышенной трещиностойкостью промежуточного слоя Cr покрытия CrAlSiN/Cr.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что многослойное металлокерамическое покрытие CrAlSiN/Cr обладает высокими трибологическими характеристиками и формирует стабильную, плотную структуру с хорошей адгезией к подложке, без выраженных внутренних дефектов.

Механические испытания показали, что микротвердость покрытий составляет около 30 ГПа при приведенном модуле упругости порядка 300 ГПа, что превосходит показатели аналогичных TiN/DLC систем. При увеличении толщины покрытия наблюдается незначительное снижение твердости на 6 %.

Трибологические испытания позволили установить, что многослойное покрытие CrAlSiN/Cr обладает стабильным коэффициентом трения на уровне 0,25 с высокой износостойкостью. При данных условиях испытания наблюдается приработка контртела с покрытием при отсутствии износа.

Многослойная структура покрытия CrAlSiN/Cr сочетает высокую твердость керамического слоя CrAlSiN с повышенной трещиностойкостью промежуточного слоя Cr, которые эффективно препятствуют образованию внутренних дефектов. Это стабилизирует коэффициент трения и существенно снижает износ, делая такие покрытия перспективными для применения в узлах трения с повышенными требованиями к износостойкости.

Список литературы

1 Повышение износостойкости металлических и металлополимерных трибосистем путём формирования структуры и свойств их поверхностного

References

1 Enhancing the wear resistance of metallic and metal-polymer tribosystems by forming the structure

слоя / И. В. Колесников, П. Д. Мотренко, В. И. Колесников, Д. С. Мантуров. – Москва : ВИНТИ РАН, 2021. – 168 с. – ISBN 978-5-902928-92-8.

2 **Колесников, И. В.** Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения / И. В. Колесников. – Москва : ВИНТИ РАН, 2017. – 384 с. – ISBN 978-5-902928-72-0.

3 Multilayer coatings for tribology : A mini review / Y. Liu, S. Yu, Q. Shi, X. Ge, W. Wang // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, No. 9. – Article no. 1388. – DOI 10.3390/nano12091388.

4 Fatigue life of TiN and CrN coatings in rolling contact / E. Vera, M. Vite, E. Gallardo, J. Laguna-Camacho // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology*. – 2013. – Vol. 227, No. 4. – P. 339–348. – DOI 10.1177/1350650112463844.

5 Microstructure, mechanical and tribological properties of gradient CrAlSiN coatings deposited by magnetron sputtering and arc ion plating technology / Q. Fan, S. Zhang, J. Lin [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2022. – Vol. 760. – Article no. 139490. – DOI 10.1016/j.tsf.2022.139490.

6 Influence of Al and Si content on structure and mechanical properties of arc evaporated Al–Cr–Si–N thin films / C. Tritremmel, R. Daniel, M. Lechthaler, P. Polcik, C. Mitterer // *Thin Solid Films*. – 2013. – Vol. 534. – P. 403–409. – DOI 10.1016/j.tsf.2013.03.017.

7 Structural features and tribological properties of multilayer coatings based on refractory metals / A. D. Pogrebnjak, Y. O. Kravchenko, O. V. Bondar [et al.] // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2018. – Vol. 54, No. 2. – P. 240–258. – DOI 10.1134/S2070205118020107.

8 Effect of interlayer design on friction and wear behaviors of CrAlSiN coating under high load in seawater / Y. Ye, Z. Liu, W. Liu [et al.] // *RSC Advances*. – 2018. – Vol. 8. – P. 5596–5607. – DOI 10.1039/C7RA12409K.

9 Исследование свойств покрытий CrAlSiN спектроскопическими методами / А. В. Сидашов, М. В. Бойко, А. Т. Козаков, Д. С. Мантуров // *Вестник машиностроения*. – 2022. – № 2. – С. 60–64. – DOI 10.36652/0042-4633-2022-2-60-64.

10 Покрытия DLC, стабилизированные азотом : оптимизация свойств и режимов нанесения с использованием алгоритмов рандомизированных деревьев и нейронных сетей / А. И. Воропаев, В. И. Колесников, О. В. Кудряков [и др.] // *Физическая мезомеханика*. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 16–32. – DOI 10.55652/1683-805X_2024_27_2_16-32.

and properties of their surface layer. / I. V. Kolesnikov, P. D. Motrenko, V. I. Kolesnikov, D. S. Manturov. – Moscow : VINITI RAS, 2021. – 168 p. – ISBN 978-5-902928-92-8.

2 **Kolesnikov, I. V.** System analysis and synthesis of processes occurring in metal-polymer friction units for friction and antifriction purposes / I. V. Kolesnikov. – Moscow : VINITI RAS, 2017. – 384 p. – ISBN 978-5-902928-72-0.

3 Multilayer coatings for tribology : A mini review / Y. Liu, S. Yu, Q. Shi, X. Ge, W. Wang // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, No. 9. – Article no. 1388. – DOI 10.3390/nano12091388.

4 Fatigue life of TiN and CrN coatings in rolling contact / E. Vera, M. Vite, E. Gallardo, J. Laguna-Camacho // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology*. – 2013. – Vol. 227, No. 4. – P. 339–348. – DOI 10.1177/1350650112463844.

5 Microstructure, mechanical and tribological properties of gradient CrAlSiN coatings deposited by magnetron sputtering and arc ion plating technology / Q. Fan, S. Zhang, J. Lin [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2022. – Vol. 760. – Article no. 139490. – DOI 10.1016/j.tsf.2022.139490.

6 Influence of Al and Si content on structure and mechanical properties of arc evaporated Al–Cr–Si–N thin films / C. Tritremmel, R. Daniel, M. Lechthaler, P. Polcik, C. Mitterer // *Thin Solid Films*. – 2013. – Vol. 534. – P. 403–409. – DOI 10.1016/j.tsf.2013.03.017.

7 Structural features and tribological properties of multilayer coatings based on refractory metals / A. D. Pogrebnjak, Y. O. Kravchenko, O. V. Bondar [et al.] // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2018. – Vol. 54, No. 2. – P. 240–258. – DOI 10.1134/S2070205118020107.

8 Effect of interlayer design on friction and wear behaviors of CrAlSiN coating under high load in seawater / Y. Ye, Z. Liu, W. Liu [et al.] // *RSC Advances*. – 2018. – Vol. 8. – P. 5596–5607. – DOI 10.1039/C7RA12409K.

9 Investigation of the properties of CrAlSiN coatings by spectroscopic methods. / A. V. Sidashov, M. V. Boyko, A. T. Kozakov, D. S. Manturov // *Vestnik Mashinostroeniya*. – 2022. – No. 2. – P. 60–64. – DOI 10.36652/0042-4633-2022-2-60-64.

10 Nitrogen-stabilized DLC coatings : optimization of properties and deposition parameters using randomized tree algorithms and neural networks / A. I. Voropaev, V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov [et al.] // *Physical Mesomechanics*. – 2024. – Vol. 27, No. 2. – P. 16–32. – DOI 10.55652/1683-805X_2024_27_2_16-32.

11 Advanced PVD coatings for highly loaded components in powertrain applications / K. Bobzin, T. Brögelmann, N. Kruppe, C. Kalscheuer // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 388. – Article no. 125575.

12 Structural-phase state and properties of Cr–Al–Si–N coatings obtained by vacuum arc plasma deposition / V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov, V. N. Varavka [et al.] // Physical Mesomechanics. – 2023. – Vol. 26, No. 2. – P. 126–136. – DOI 10.1134/S1029959923020029.

13 **Teles, V. C.** Abrasive wear of multilayered/gradient CrAlSiN PVD coatings: Effect of interface roughness and of superficial flaws / V. C. Teles, J. D. B. de Mello, W. M. da Silva // Wear. – 2017. – Vols. 376–377. – Part B. – P. 1691–1701. – DOI 10.1016/j.wear.2017.01.116.

14 **Политыко, К. Н.** Вакуумная установка для получения ионно-плазменных покрытий трибологического назначения / К. Н. Политыко, А. И. Ворopaев, Д. С. Мантуров // Труды 31-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии-2024», Санкт-Петербург, 25–27 июня 2024 г. – Санкт-Петербург : СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2024. – С. 141–144.

15 **Головин, Ю. И.** Наноиндентирование и его возможности / Ю. И. Головин. – Москва : Машиностроение, 2009. – 312 с.

16 **DIN 50324-1992.** Tribology ; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system). – 6 p. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (date of access: 06/12/2026).

17 **ASTM G99-17.** Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (date of access: 12.06.2026).

18 Structural and mechanical properties of DLC/TiN coatings on carbide for wood-cutting applications / V. Hayeuski, V. Zhyllinski, V. Kazachenko [et al.] // Coatings. – 2023. – Vol. 13. – Article no. 1192. – DOI 10.3390/coatings13071192.

11 Advanced PVD coatings for highly loaded components in powertrain applications / K. Bobzin, T. Brögelmann, N. Kruppe, C. Kalscheuer // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 388. – Article no. 125575.

12 Structural-phase state and properties of Cr–Al–Si–N coatings obtained by vacuum arc plasma deposition / V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov, V. N. Varavka [et al.] // Physical Mesomechanics. – 2023. – Vol. 26, No. 2. – P. 126–136. – DOI 10.1134/S1029959923020029.

13 **Teles, V. C.** Abrasive wear of multilayered/gradient CrAlSiN PVD coatings: Effect of interface roughness and of superficial flaws / V. C. Teles, J. D. B. de Mello, W. M. da Silva // Wear. – 2017. – Vols. 376–377. – Part B. – P. 1691–1701. – DOI 10.1016/j.wear.2017.01.116..

14 **Polityko, K. N.** Vacuum installation for obtaining ion-plasma coatings for tribological applications / K. N. Polityko, A. I. Voropaev, D. S. Manturov // Vacuum Technology and Equipment – 2024 : proceedings of the 31st All-Russian scientific and technical conference with international participation, Saint Petersburg, June 25–27, 2024. – Saint Petersburg : Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» – 2024. – P. 141–144.

15 **Golovin, Yu. I.** Nanoindentation and its capabilities / Yu. I. Golovin. – Moscow : Mashinostroenie, 2009. – 312 p.

16 **DIN 50324-1992.** Tribology ; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system). – 6 p. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (date of access: 06/12/2026).

17 **ASTM G99-17.** Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (date of access: 06/12/2026).

18 Structural and mechanical properties of DLC/TiN coatings on carbide for wood-cutting applications / V. Hayeuski, V. Zhyllinski, V. Kazachenko [et al.] // Coatings. – 2023. – Vol. 13. – Article no. 1192. – DOI 10.3390/coatings13071192.

I. V. Kolesnikov, K. N. Polityko, A. I. Azoyan, M. M. Chetverik

STRUCTURE, PROPERTIES, AND WEAR RESISTANCE OF MULTILAYER CrAlSiN CERMET COATINGS

Abstract. This study investigates the structural features, mechanical, and tribological properties of a multilayer metal-ceramic coating (CrAlSiN/Cr) deposited by physical vapor deposition (PVD) onto 40XH steel substrates. The coating's architecture comprises a Cr adhesive layer, a nanostructured functional CrAlSiN layer, an intermediate Cr layer with up to 12 alternating layers, and a final CrAlSiN layer. These layers are designed to increase load-bearing capacity and reduce crack propagation under sliding contact. The microstructure, elemental composition, hardness, and elastic modulus were investigated using scanning electron microscopy, energy-dispersive spectroscopy, and nanoindentation. Tribological tests were conducted using a ball-

on-disk setup, with an Al_2O_3 ball serving as the counterweight. These tests allowed us to determine the friction coefficient and wear rate under dry friction.

Preliminary tribological tests have confirmed the stability of the friction coefficient and high wear resistance, which is due to the multilayer architecture and optimal mechanical properties of the material. The alternation of hard CrAlSiN ceramic layers with ductile Cr interlayers creates an effective system of internal barriers that prevent crack propagation and localize plastic deformation. The combination of structural features and mechanical properties of the CrAlSiN/Cr coating renders it an exceptionally effective solution for components operating under high loads and limited lubrication.

Keywords: multilayer coatings, PVD technology, metal-ceramic composites, CrAlSiN/Cr, tribological testing, wear resistance, microhardness, coefficient of friction, nanocomposite structures.

For citation: Structure, properties, and wear resistance of multilayer CrAlSiN cermet coatings / I. V. Kolesnikov, K. N. Polityko, A. I. Azoyan, M. M. Chetverik // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 210–218. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_210.

Сведения об авторах

Колесников Игорь Владимирович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
доктор технических наук,
член-корреспондент РАН,
ведущий научный сотрудник НИЧ,
e-mail: oooedt@rambler.ru

Политыко Кирилл Николаевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
младший научный сотрудник НИЧ,

Федеральный исследовательский центр
Южный научный центр
Российской академии наук (ЮНЦ РАН),
лаборатория
транспорта, композиционных материалов
и конструкций ЮНЦ РАН,
младший научный сотрудник,
e-mail: politykokirill@yandex.ru

Азоян Анаид Иосиповна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
кандидат технических наук, доцент,
научный сотрудник НИЧ,
e-mail: azojan.anaid@mail.ru

Четверик Максим Максимович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
аспирант,
e-mail: chetverikm@mail.ru

Information about the authors

Kolesnikov Igor Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Doctor of Engineering Sciences,
Corresponding Member of the RAS,
Leading Researcher of the Research Department,
e-mail: oooedt@rambler.ru

Polityko Kirill Nikolaevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Junior Researcher of the Research Department,

Federal Research Center of Southern Scientific
Center of the Russian Academy of Sciences
(SSC RAS),
Laboratory of Transport, Composite Materials
and Structures of SSC RAS,
Junior Researcher,
e-mail: politykokirill@yandex.ru

Azoyan Anaid Iosipovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Researcher of the Research Department,
e-mail: azojan.anaid@mail.ru

Chetverik Maksim Maksimovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Postgraduate Student,
e-mail: chetverikm@mail.ru

В. А. Крутова, Д. С. Фролова, Е. А. Тимофеев

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ И ПЕРЕДАВАЕМОГО МОМЕНТА НА РАЗМЫКАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ЗУБЬЕВ В МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ПЕРЕДАЧАХ

Аннотация. Рассмотрен процесс колебаний мелко модульной зубчатой передачи, работающей в режиме размыкания профилей зубьев. Проанализированы основные группы факторов, определяющих характер колебаний: источники возбуждения (погрешности изготовления и сборки, кинематический эксцентриситет, неравномерность вращения вала, износ) и инерционно-жесткостные параметры с демпфированием. Построена динамическая модель зубчатой пары и составлена система дифференциальных уравнений, учитывающая переменное демпфирование, боковой зазор и многозначную функцию кинематической погрешности. Выполнено упрощение системы для инженерных расчётов и получено выражение для усилия в зацеплении с выделением динамической добавки. Показано, что вероятность перехода передачи в режим размыкания профилей возрастает при увеличении частоты вращения и снижении передаваемого крутящего момента.

Ключевые слова: зубчатая передача, колебания, размыкание профилей зубьев, боковой зазор, кинематическая погрешность, демпфирование, динамические нагрузки, мелко модульный редуктор, математическое моделирование.

Для цитирования: Крутова, В. А. Влияние частоты вращения и передаваемого момента на размыкание профилей зубьев в мелко модульных передачах / В. А. Крутова, Д. С. Фролова, Е. А. Тимофеев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 219–225. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_219.

Введение

Процесс колебаний зубчатой передачи, работающей в режиме размыкания профилей зубьев, определяется двумя основными группами факторов: источниками возбуждения колебаний и параметрами, влияющими на их характер. К первой группе относятся погрешности изготовления, искажающие профиль зуба и вызывающие кинематический эксцентриситет. Сюда же входят погрешности сборки, которые изменяют боковой зазор и жесткость сцепляющихся зубьев. Важными источниками возбуждения также выступают неравномерность вращения вала электродвигателя и искажения профилей зубьев вследствие изнашивания [1, 2].

Вторая группа включает инерционно-жесткостные параметры, определяющие собственные частоты системы, и демпфирование. Особую сложность для моделирования представляет оценка демпфирования. В отличие от демпфирования валов, которое можно принимать постоянным, коэффициент демпфирования колебаний зубьев является переменной величиной. Он зависит от толщины пленки пластичного смазочного материала, течение которого при ударном нагружении подчиняется сложным законам (закону Гершеля – Балкли) [3].

При совпадении вынужденных частот с собственными наступает резонанс, ведущий к резкому росту динамических нагрузок. При ударном взаимодействии зубчатых пар усилие в зацеплении может во много раз превышать передаваемые номинальные нагрузки [2]. Такие короткие интенсивные удары вызывают дополнительные угловые ускорения и проскальзывание в шариковых подшипниках. При консольном расположении шестерни на валу это приводит к быстрому разрушению передней опоры электродвигателя.

Для детального теоретического исследования всех описанных процессов колебаний с учетом многообразия влияющих факторов необходима разработка комплексной расчетной модели зубчатой пары.

Целью работы является разработка расчетной модели колебаний мелко модульной зубчатой пары и установление условий перехода передачи в режим размыкания профилей зубьев.

Основная часть

При выборе расчетной схемы необходимо учитывать сложившуюся практику конструктивного выполнения мелко модульных зубчатых приводов, так как отражение особенностей конструкции позволит исключить ряд существенных ошибок при моделировании. Современным конструкциям таких при-

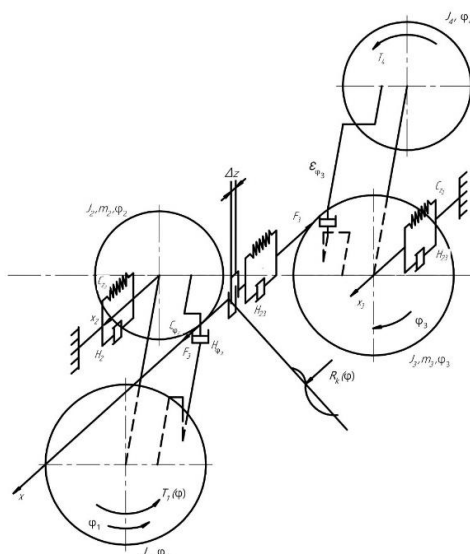
водов присущи следующие основные черты: корпус электродвигателя и входная шестерня привода консоли крепятся соответственно к корпусу редуктора и на вал двигателя. Колесо входной ступени располагается, как правило, на двух разнесенных опорах, а последующие ступени приводятся во вращение от шестерни второй ступени, расположенной на одном валу с колесом первой ступени [4].

На основе изложенного формируется динамическая модель колебаний зубчатой пары. Ротор электродвигателя условно представляется диском с моментом инерции J_1 . Вследствие переменного крутящего момента $T_1(\varphi)$, создаваемого магнитными силами, ротор может иметь неравномерную частоту вращения. Вал ротора обладает жесткостью кручения и демпфирует крутильные колебания с коэффициентом $H_{\varphi 2}$. В поперечном направлении этот вал, закрепленный в подшипниках, имеет жесткость C_{r2} и коэффициент демпфирования H_{r2} . На валу ротора жестко закреплена шестерня с моментом инерции J_2 и массой m_2 . Она сцепляется с колесом, характеризующимся моментом инерции J_3 и массой m_3 . Сами зубья пары обладают жесткостью C_{23} и способны демпфировать колебания с коэффициентом H_{23} . Значение H_{23} определяется эффективной толщиной масляной пленки в зацеплении, зависящей от режимов работы и параметров смазочного материала. В зацеплении присутствует боковой зазор Δr , величина которого изменяется в зависимости от угла поворота, качества изготовления и сборки передачи [5].

В процессе работы передачи всегда наблюдается расхождение между фактическим и теоретическим передаточным отношением из-за погрешностей и износа [6]. Эти отклонения приводят к многозначной функции кинематической погрешности $R_K(\varphi)$. Зубчатое колесо закреплено на валу с крутильной жесткостью $C_{\varphi 3}$ и коэффициентом демпфирования $H_{\varphi 3}$. В поперечном направлении вал колеса имеет жесткость C_{r3} и коэффициент демпфирования H_{r3} . К этому валу также присоединен диск с моментом инерции J_4 , имитирующий инерцию всех последующих ступеней редуктора, к которому приложен крутящий момент сопротивления T_4 . В принятой модели валы, опоры и зубья принимаются абсолютно невесомыми упругими элементами.

В соответствии с описанной расчетной схемой (рисунок) система дифференциальных уравнений, описывающая колебания зубчатой пары, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 + H_{\varphi 2}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + C_{\varphi 2}(\varphi_1 - \varphi_2) &= T_1(\varphi), \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 + H_{\varphi 2}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + C_{\varphi 2}(\varphi_2 - \varphi_1) + (H_{23}\dot{\delta}_{23} + C_{23}\delta_{23}) \frac{d_{b2}}{2} &= 0, \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 + H_{\varphi 3}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) + C_{\varphi 3}(\varphi_3 - \varphi_4) - (H_{23}\dot{\delta}_{23} + C_{23}\delta_{23}) \frac{d_{b3}}{2} &= 0, \\ J_4 \ddot{\varphi}_4 + H_{\varphi 3}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_3) + C_{\varphi 3}(\varphi_4 - \varphi_3) &= -T_4, \\ m_2 \ddot{X}_2 + H_{r2}\dot{X}_2 + C_{r2}X_2 - (H_{23}\dot{\delta}_{23} + C_{23}\delta_{23}) &= 0, \\ m_3 \ddot{X}_3 + H_{r3}\dot{X}_3 + C_{r3}X_3 - (H_{23}\dot{\delta}_{23} + C_{23}\delta_{23}) &= 0, \\ \delta_{23} &= \varphi_2 \frac{d_{b2}}{2} - \varphi_3 \frac{d_{b3}}{2} - X_2 + X_3 - R_K(\varphi). \end{aligned}$$



Модель колебаний зубчатой пары

Процесс колебаний может сопровождаться размыканием профилей зубьев [7]. Если амплитуда колебаний не превышает величину бокового зазора $\Delta r(\varphi)$, то есть выполняется условие

$$-\Delta r(\varphi) < \delta_{23} \leq 0,$$

то контакт между зубьями теряется, и параметры зацепления обнуляются:

$$\begin{aligned} C_{23} &= 0; \\ H_{23} &= 0. \end{aligned}$$

В случае если амплитуда колебаний превышает боковой зазор, происходит соударение нерабочих профилей зубьев [8]. При условии:

$$\delta_{23} \leq -\Delta r$$

усилие контактирования определяется зависимостью:

$$F_3 = H_{23}\dot{\delta}_{23} + C_{23}(\Delta r + \delta_{23}).$$

Вследствие соударений зубьев процесс носит явно нелинейный характер, поэтому решение данной системы уравнений целесообразно производить методом пошагового интегрирования (например, методом Рунге – Кутты) [9], предварительно приведя её к системе дифференциальных уравнений первого порядка (задаче Коши).

Для инженерных расчетов и получения качественных зависимостей о влиянии погрешностей на динамические нагрузки систему можно упростить [10]. В связи со слабой загруженностью мелко модульных передач деформациями опор и зубьев можно пренебречь, считая валы абсолютно жесткими. В этом случае исходная система примет вид:

$$\begin{aligned} (J_1 + J_2)\ddot{\varphi}_2 + F_3 \frac{d_{b2}}{2} &= T_1, \\ (J_3 + J_4)\ddot{\varphi}_3 + F_3 \frac{d_{b3}}{2} &= -T_4, \\ \varphi_2 \frac{d_{b2}}{2} + \varphi_3 \frac{d_{b3}}{2} &= R_K. \end{aligned}$$

Учитывая кинематическое соотношение крутящих моментов $T_4 = \frac{d_{b3}}{d_{b2}} T_1$ и полагая $T_1 = \text{const}$, решение упрощенной системы относительно усилия в зацеплении запишем в виде:

$$F_3 = \frac{2T_1}{d_{b2}} + \frac{4(J_1 + J_2)(J_3 + J_4)}{db_2^2(J_3 + J_4) + (J_1 + J_2)U^2} \ddot{R}_K.$$

Второе слагаемое в данном уравнении представляет собой динамическую добавку к статической нагрузке. Поскольку многозначная функция кинематической погрешности R_K носит периодический характер, эта добавка может принимать как положительные, так и отрицательные значения. В случае когда расчетное значение F_3 становится нулевым или отрицательным, происходит размыкание профилей зубьев в процессе пересопряжения.

Для часто встречающегося на практике случая проектирования мелко модульных редукторов, когда сумма моментов инерции двигателя и шестерни значительно превышает инерцию ведомых элементов $((J_1 + J_2) \gg (J_2 + J_3))$, формула упрощается:

$$F_3 = \frac{2T_1}{db_2} + \frac{4(J_3 + J_4)}{db_3^2} \ddot{R}_K.$$

Из выражения следует, что динамическая добавка в этом случае зависит от суммы моментов инерции колеса и приведенных моментов последующих ступеней. Для качественной оценки влияния режимов на условия размыкания, функцию кинематической погрешности можно представить в виде тригонометрического ряда:

$$R_K(\varphi) = \sum K f_K \sin(KZ\varphi_2 + \gamma_K),$$

где f_K – амплитуды частотных составляющих;

$K \setminus Z$ – номер гармоники;

φ_2 – угол поворота шестерни;

γ_K – фаза спектра.

Дважды дифференцируя это уравнение по времени, получаем:

$$\ddot{R}_K = - \left(\frac{2\varphi_2}{dt} \right)^2 \sum_K K_Z^2 \cdot f_K \cdot \sin(K_Z \varphi_2 + \gamma_K) = -\omega_2^2 \Phi(\varphi),$$

где Φ – функция, зависящая от погрешности передачи.

Аналитическое выражение многозначной функции кинематической погрешности для мелко-модульной зубчатой передачи будет иметь вид:

$$R_{K_j}(\varphi_1) = e_{г.к.1} \sin \varphi_1 + e_{г.к.2} \sin \left(\varphi_1 \frac{db_2}{db_3} + \psi_{12} \right) + F(\varphi_1),$$

где $F(\varphi_1)$ – функция, зависящая от сочетания погрешностей профиля и шага зубьев шестерни и колеса.

$$\left\{ \begin{array}{l} F(\varphi_1) = -\frac{db_2}{2} \sin(2\alpha \cdot t \cdot w) \cdot \frac{\Phi_{e_2}}{\Phi_{i_1}(U+1)} (\varphi_{H_j} - \varphi_1)^2, \\ \quad \varphi_{H_j} - 0,1 \leq \varphi_1 < \varphi_{H_j}; \\ F(\varphi_1) = f_{f_{r_1}} (\Phi_{i_1} + \varphi_1 - \varphi_{H_j}) + f_{f_{r_2}} (\Phi_{e_2} + \varphi_1 - \varphi_{H_j}), \\ \quad \varphi_{H_j} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{H_j} + \Phi_{e_1} - \Phi_{i_1}; \\ F(\varphi_1) = -\frac{db_1}{2} \sin(2\alpha \cdot t \cdot w) \cdot \frac{\Phi_{e_1} U}{\Phi_{i_2}(U+1)} (\varphi_1 - \varphi_{H_j} - \Phi_{e_1} + \Phi_{i_1})^2, \\ \quad (\varphi_{H_j} + \Phi_{e_1} - \Phi_{i_1}) < \varphi_1 \leq (\varphi_{H_j} + \Phi_{e_1} - \Phi_{i_1} + 0,1). \end{array} \right.$$

где Φ_{e_2}, Φ_{i_2} – углы развернутости эвольвенты профиля зуба колеса для момента выхода и входа зуба в зацепление соответственно;

Φ_{e_1}, Φ_{i_1} – углы развернутости эвольвенты профиля зуба шестерни для момента выхода и входа зуба в зацепление соответственно;

$\varphi_{H_j} = \xi + (j-1) \cdot \frac{2\pi}{Z_1}$ – углы, соответствующие началу взаимодействия зубьев шестерни и колеса после окончания фазы кромоного контакта;

ξ – фаза;

j – порядковый номер пары зубьев;

$e_{г.к.1}, e_{г.к.2}$ – суммарные значения геометрического и кинематического эксцентриситетов шестерни и колеса соответственно;

ψ_{12} – угол, определяющий рассогласованные между эксцентриситетами $e_{г.к.1}$ и $e_{г.к.2}$;

$f_{f_{r_1}}(\varphi), f_{f_{r_2}}(\varphi)$ – погрешности профиля зубьев шестерни и колеса соответственно.

Как известно, в процессе приработки зубья передачи подвержены интенсивному изнашиванию, при этом происходит искажение профилей зубьев и линия зацепления, имеющая первоначально вид прямой линии, становится кривой.

При взаимодействии левых и правых профилей зубьев боковой зазор в зацеплении зубьев носит переменный характер. Причем в пределах одного пересопряжения можно считать его величиной неизменной, однако при контактировании разных зубьев боковой зазор может иметь существенно различную величину. Значение минимального бокового зазора определяется по ГОСТ 9178-81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические мелко-модульные. Допуски» в зависимости от вида сопряжения зубчатых колес и величины межосевого расстояния. Наибольший же боковой зазор, который может получиться между зубьями передачи не ограничивается стандартом. Это вызвано тем, что боковой зазор является замыкающим звеном размерной цепи, в которой допусками ограничены отклонения всех составляющих размеров. Наибольший боковой зазор может быть рассчитан по приближенной формуле Б. А. Тайца. Принимая синусоидальный закон изменения бокового зазора в зацеплении зубьев по обороту и задаваясь вероятностью для определения границ доверительного интервала $P = 0,95$, получаем формулу:

$$r(\varphi_1) = \frac{(j_{n.\min} + j_{n.\max})}{2} + \frac{(j_{n.\max} + j_{n.\min})}{3} \sin \varphi_1.$$

Для оценки зависимости, определяющей величину переменного момента $T_1(\varphi_1)$ входящего в систему уравнений, воспользуемся системой уравнений, полученной при допущении о том, что опоры, валы и зубья колес принимаются абсолютно жесткими. Решая её относительно $T_1(\varphi_1)$ получаем уравнение:

$$T_1(\varphi_1) = \frac{db_2}{db_3} T_4 + \left[(J_1 + J_2) + \left(\frac{db_2}{db_3} \right)^2 (J_3 + J_4) \right] \cdot \frac{\delta_H \cdot K}{2} \omega_1^2 \cdot \sin(K \cdot \varphi_1).$$

Здесь предполагается, что неравномерное вращение ротора электродвигателя можно описать синусоидальной зависимостью, включающей K периодов за один оборот вала.

Переменной величиной является также и коэффициент демпфирования колебаний зубьев H_{23} . Причем величина этого коэффициента не зависит от угла поворота вала, а определяется толщиной смазочной пленки в зацеплении зубьев и теплофизическими характеристиками смазочного материала. Таким образом величина этого коэффициента связана с режимами эксплуатации привода и свойствами смазочного материала, которые, как известно, изменяются в процессе отработки ресурса.

Для мелко модульных зубчатых передач, в связи с их слабой загруженностью, оказывается переменной величиной и жесткость зубьев. Анализируя уравнения, описывающие деформации зубьев при воздействии значительных напряжений изгиба и сдвига, а также оценивая контактные деформации по Герцу, можно прийти к выводу, что они носят линейный характер. Однако при действии малых нагрузок в наибольшей степени начинают проявляться деформации микронеровностей шероховатых поверхностей. Основываясь на допущениях о том, что площадка контакта, на которой контактируют микронеровности, плоская за счет деформации по Герцу и что контакт шероховатых поверхностей упругий, получили зависимость:

$$C_{23} = C_{23}(q_H),$$

из которой видно, что суммарная жесткость зубьев, находящихся в контакте, зависит от погонной нагрузки, действующей в зацеплении.

Остальные коэффициенты системы уравнений принимаются постоянными и определяются расчетным путем исходя из конструктивного выполнения привода и эксплуатационных режимов его работы.

Выводы

Из полученных зависимостей следует, что чем выше частота вращения и чем ниже передаваемый передачей крутящий момент, тем ближе условия работы передачи с размыканиями профилей зубьев. Работа зубчатой передачи с размыканиями профилей зубьев изменяет все процессы, сопровождающие эксплуатацию и, в большинстве приводит к быстрому выходу передачи из строя. Исследование ударных процессов в мелко модульных зубчатых передачах с помощью аналитических инженерных зависимостей представляется весьма сложной задачей. Это связано, с одной стороны, с тем, что, предполагая наличие ударов в зацеплении зубьев нельзя считать зубья абсолютно жесткими и пренебрегать деформациями опор и валов. С другой стороны, весьма трудоемкими оказываются уравнения, оценивающие устойчивость колебательных процессов.

Многочленная функция кинематической погрешности в определении характера колебаний зубчатых передач имеет важную роль, поэтому для вывода зависимости этой функции от угла поворота шестерни было проведено исследование образуемого в зубчатой передаче геометрического и кинематического эксцентриситетов, проведен анализ погрешностей профиля и погрешностей шагов, а также было оценено влияние кромочного взаимодействия зубьев на входе в зацепление и выходе из него. Влияние нагрузки на значение функции кинематической погрешности не оценивалось в связи со слабой загруженностью мелко модульных зубчатых передач. В этом случае, как известно, деформации зубьев очень малы и зазоры в передаче не выбираются, следовательно, значения многочленной функции кинематической погрешности будут определяться лишь соотношением величин основных шагов зубьев у шестерни и у колеса.

Список литературы

1 Айрапетов, Э. Л. Деформативность планетарных механизмов / Э. Л. Айрапетов, М. Д. Генкин. – Москва : Наука, 1973. – 212 с.

References

1 Airapetov, E. L. Deformability of planetary mechanisms / E. L. Airapetov, M. D. Genkin. – Moscow : Nauka, 1973. – 212 p.

2 **Калинин, Д. В.** Моделирование нелинейных колебаний цилиндрических зубчатых передач авиационных приводов / Д. В. Калинин, Ю. М. Темис // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2015. – Т. 14, № 3, ч. 1. – С. 193–202. – DOI 10.18287/2412-7329-2015-14-3-193-202.

3 **Борзенко, Е. И.** Кинематика течения жидкости Балкли – Гершеля со свободной поверхностью при заполнении канала / Е. И. Борзенко, И. А. Рыльцев, Г. Р. Шрагер // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2017. – № 5. – С. 53–64. – DOI 10.7868/S0568528117050061.

4 **Дунаев, П. Ф.** Конструирование узлов и деталей машин : учебное пособие для вузов / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. – 12-е изд. – Москва : Академия, 2013. – 496 с. – ISBN 978-5-7695-9686-5.

5 **ГОСТ 1643–81.** Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски : издание официальное : взамен ГОСТ 1643–72 : дата введения 1981–07–01. – Москва : Издательство стандартов, 1981. – 72 с.

6 Расчёт долговечности зубчатых механизмов электромеханических приводов / Г. А. Тимофеев, С. И. Красавин, П. Н. Сильченко, Е. С. Новиков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 9 (690). – С. 12–21. – DOI 10.18698/0536-1044-2017-9-12-21.

7 **Семёнов, Ю. А.** Внутренняя виброактивность машин с упругим передаточным механизмом / Ю. А. Семёнов, Н. С. Семёнова // Современное машиностроение. Наука и образование (ММЕСЕ-2021) : материалы 10-й Международной научной онлайн-конференции, 24 июня 2021 года. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – С. 165–178. – ISBN 978-5-7422-7213-4.

8 **Ишин, Н. Н.** Оценка фактического коэффициента перекрытия прямозубых зубчатых передач / Н. Н. Ишин, А. М. Гоман, А. С. Скороходов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 2 (23). – С. 24–29. – ISSN 1995-0470.

9 **Горелов, Ю. Н.** Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений (методы Рунге – Кутты) : учебное пособие / Ю. Н. Горелов. – Самара : Издательство Самарского университета, 2006. – 45 с.

10 **ГОСТ 21354–87.** Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчёт на прочность : издание официальное : взамен ГОСТ 21354–75 : дата введения 1989–01–01. – Москва : Издательство стандартов, 1988. – 128 с.

2 **Kalinin, D. V.** Modeling of nonlinear oscillations of cylindrical gear transmissions of aircraft drives / D. V. Kalinin, Yu. M. Temis // Bulletin of Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolev (National Research University). – 2015. – Vol. 14, No. 3, Part 1. – P. 193–202. – DOI 10.18287/2412-7329-2015-14-3-193-202.

3 **Borzenko, E. I.** Kinematics of Bulkley – Herschel fluid flow with a free surface during channel filling / E. I. Borzenko, I. A. Ryl'tsev, G. R. Shrager // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Fluid and Gas Mechanics. – 2017. – No. 5. – P. 53–64. – DOI 10.7868/S0568528117050061.

4 **Dunaev, P. F.** Design of machine components and parts : a textbook for universities / P. F. Dunaev, O. P. Lelikov. – 12th ed. – Moscow : Academy, 2013. – 496 p. – ISBN 978-5-7695-9686-5.

5 **GOST 1643–81.** Basic standards for interchangeability. Cylindrical gear transmissions. Tolerances : official edition : replaces GOST 1643–72 : date of introduction 1981–07–01. – Moscow : Publishing House of Standards, 1981. – 72 p.

6 Calculation of the durability of gear mechanisms of electromechanical drives / G. A. Timofeev, S. I. Krasavin, P. N. Silchenko, E. S. Novikov // Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering. – 2017. – No. 9 (690). – P. 12–21. – DOI 10.18698/0536-1044-2017-9-12-21.

7 **Semenov, Yu. A.** Internal vibration activity of machines with an elastic transmission mechanism / Yu. A. Semenov, N. S. Semenova // Modern mechanical engineering. Science and education (ММЕСЕ-2021) : proceedings of the 10th International scientific online conference, June 24, 2021. – Saint Petersburg : POLYTECH-PRESS, 2021. – P. 165–178. – ISBN 978-5-7422-7213-4.

8 **Ishin, N. N.** Evaluation of the actual overlap coefficient of spur gears / N. N. Ishin, A. M. Goman, A. S. Skorokhodov // Mechanics of machines, mechanisms and materials. – 2013. – No. 2 (23). – P. 24–29. – ISSN 1995-0470.

9 **Gorelov, Yu. N.** Numerical methods for solving ordinary differential equations (Runge–Kutta methods) : a tutorial / Yu. N. Gorelov. – Samara : Publishing house of Samara University, 2006. – 45 p.

10 **GOST 21354–87.** Cylindrical involute gear transmissions with external engagement. Strength calculation: official edition : replaces GOST 21354–75 : date of introduction 1989–01–01. – Moscow : Publishing House of Standards, 1988. – 128 p.

V. A. Krutova, D. S. Frolova, E. A. Timofeev

INFLUENCE OF ROTATIONAL SPEED AND TRANSMITTED TORQUE ON TOOTH PROFILE SEPARATION IN FINE-MODULE GEAR TRANSMISSIONS

Abstract. The paper considers the vibration process of a fine-module gear transmission operating in the tooth profile separation mode. The main groups of factors determining the vibration behavior are analyzed: excitation sources (manufacturing and assembly errors, kinematic eccentricity, shaft rotation irregularity, wear) and the inertia–stiffness parameters together with damping. A dynamic model of the gear pair is developed and a system of differential equations is derived that accounts for variable damping, backlash, and the multivalued kinematic error function. The system is simplified for engineering calculations, yielding an expression for the meshing force with an explicit dynamic load component. It is shown that the likelihood of transition into the profile separation mode increases as the rotation speed rises and the transmitted torque decreases.

Keywords: gear transmission, vibrations, tooth profile separation, backlash, kinematic error, damping, dynamic loads, fine-module gearbox, mathematical modeling.

For citation: Krutova, V. A. Influence of rotational speed and transmitted torque on tooth profile separation in fine-module gear transmissions / V. A. Krutova, D. S. Frolova, E. A. Timofeev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 219–225. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_219.

Сведения об авторах

Крутова Вероника Александровна
Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова,
кафедра «Механика деформируемого
твёрдого тела»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: krutova_va@voenmeh.ru

Фролова Дарья Сергеевна
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Проектирование и технология
производства машин»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: frolovads@rgups.ru

Тимофеев Егор Андреевич
Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова,
кафедра «Механика деформируемого
твёрдого тела»,
магистрант,
e-mail: timofeev_ea@voenmeh.ru

Information about the authors

Krutova Veronika Aleksandrovna
Baltic State Technical University “VOENMEH”
named after D. F. Ustinov,
Chair “Mechanics of a Deformable Solid”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: krutova_va@voenmeh.ru

Frolova Darya Sergeevna
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Machine Design and Production
Technology”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: frolovads@rgups.ru

Timofeev Egor Andreevich
Baltic State Technical University “VOENMEH”
named after D. F. Ustinov,
Chair “Mechanics of a Deformable Solid”,
Master's Student,
e-mail: timofeev_ea@voenmeh.ru

М. Е. Николаев, В. А. Перфилов, А. В. Романова, Г. С. Еремин

АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАНИПУЛЯТОРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АГРЕГАТА

Аннотация. При возведении сооружений, имеющих фундаментную основу, состоящую из свай, используются сваебойные коперы. Последовательность такого технологического процесса состоит из ряда операций: 1 – подготовка площадки; 2 – транспортировка свай к месту их погружения; 3 – установка сваи в молот; 4 – забивка по размеченным точкам. Все работы требуют задействования комплекса механизированных средств, состоящих из погрузчиков и транспортных машин. Недостатком такого технологического процесса является малая автоматизация технических средств. Предлагается автоматизировать технологический процесс за счет применения автоматизированного погрузочно-транспортного агрегата с манипуляторами. Предложена конструкция агрегата. Описан технологический процесс забивки свай с погрузочно-транспортными работами. Проведен кинематический расчет исполнительного механизма манипулятора относительно заданного положения. Найдена зависимость углов поворота звеньев манипулятора и изменения скоростей штоков исполнительных приводов от времени.

Ключевые слова: автоматизированный агрегат, сваи, манипулятор, грузозахватный орган, кинематика, шасси.

Для цитирования: Анализ кинематических характеристик манипулятора автоматизированного агрегата / М. Е. Николаев, В. А. Перфилов, А. В. Романова, Г. С. Еремин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 226–232. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_226.

Введение

В современное время при возведении свайного фундаментного основания широко применяются сваебойные коперы. Недостатком этого технологического процесса является малая автоматизация. Сваи необходимо доставить на строительную площадку, установить сваю в сваебойный молот, и произвести забивку. При этом используется комплекс механизированных средств, а также операторы, которые осуществляют контроль и мониторинг технологического процесса. С целью уменьшения количества ручного труда и задействованной техники предлагается использовать автоматизированный погрузочно-транспортный агрегат, на котором установлен манипулятор последовательной и параллельной структуры, снабженный универсальным трехступенным грузозахватным устройством с молотом. Предложена конструкция автоматизированного агрегата. Описан технологический процесс загрузки, транспортировки и забивки свай. Проведен кинематический расчет манипуляционного устройства. Найдена зависимость изменения исполнительных звеньев и изменения скоростей штоков исполнительных приводов манипулятора от времени [1, 2].

Цель исследования заключается в представлении конструкции агрегата для автоматизированной забивки свай, который заменит комплекс машин, а также описании кинематических характеристик исполнительного механизма манипулятора относительно заданного положения.

Основная часть

При возведении сооружений, имеющих фундаментную основу, состоящую из свай, используются сваебойные коперы. Последовательность технологического процесса состоит из ряда операций: 1 – подготовка площадки; 2 – транспортировка свай к месту их погружения; 3 – установка сваи в молот; 4 – забивка по размеченным точкам. Все работы требуют задействования комплекса механизированных средств, состоящих из погрузчиков и транспортных машин.

Предлагается использовать конструкцию агрегата, который заменит комплекс машин и автоматизирует процесс забивки свай. Автоматизированное техническое средство (рис. 1) состоит из двухосного гусеничного шасси 1; кузова 2 для транспортировки груза; кабины 3 на поворотном основании 4; манипуляторов последовательной и параллельной структуры, состоящих из звеньев 5, 6, 7; шарниров 8, 9, 10, 11, 12, 13, являющихся кинематическими парами пятого класса; исполнительных приводов 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20; трехступенного грузозахватного устройства 21, состоящего из тяг 22, привода 23; сваебойного молота 24; блока управления 25; датчика контроля положения свай 26; опорных устройств 27 [3, 4, 5].

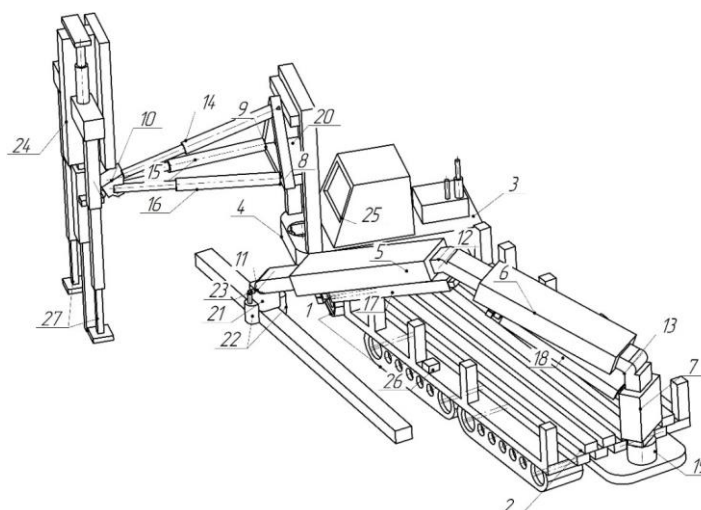


Рис. 1. Общий вид автоматизированного агрегата:

1 – шасси; 2 – кузова; 3 – кабины; 4 – поворотное основание; 5, 6, 7 – звенья;
8, 9, 10, 11, 12, 13 – шарниры; 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 – исполнительные приводы;
21 – трехступенное грузозахватное устройство; 22 – тяги; 23 – привод; 24 – свабойный молот;
25 – блок управления; 26 – датчик контроля положения свай; 27 – опорные устройства

С блока управления подается запрограммированный сигнал на исполнительные приводы 17, 18, 19 и в автоматическом режиме манипулятором последовательной структуры, установленным на раме кузова, с помощью звеньев 5, 6, 7 свая позиционируется и устанавливается в копер трёхступенным грузозахватным устройством (рис. 2).

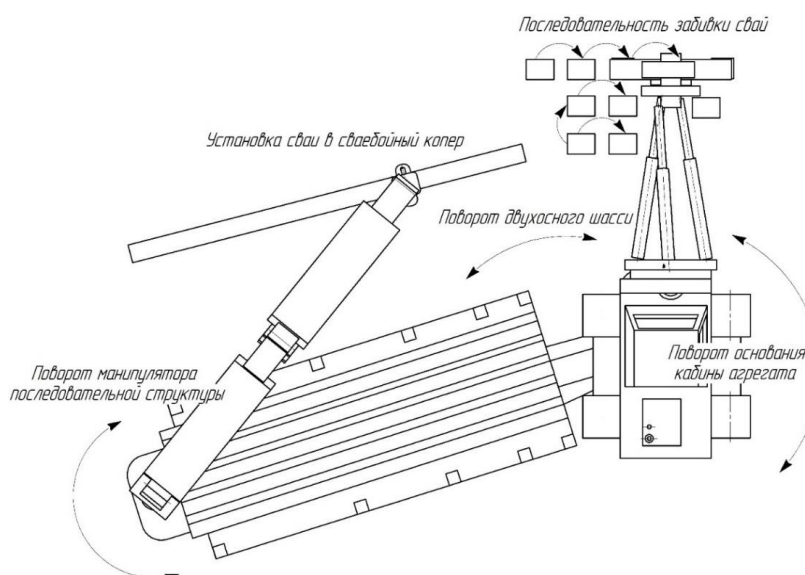


Рис. 2. Схема технологического процесса транспортировки и забивки свай

Далее так же в автоматическом режиме с помощью поворотного основания 4, манипуляционного механизма параллельной структуры и исполнительных приводов 14, 15, 16 копровая установка перемещается к месту забивки и осуществляется погружение сваи по заданным координатам.

Весь цикл технологического процесса повторяется до момента сигнала с датчика контроля 26 положения свай, что в кузове закончился груз [6, 7].

Для данного агрегата одним из ключевых узлов является манипулятор-трипод, который обеспечивает необходимую жесткость конструкции, при высоких нагрузках от забивки свай. Рассмотрим исполнительный механизм манипулятора относительно заданного положения, построенный по уравнениям кинематики (рис. 3).

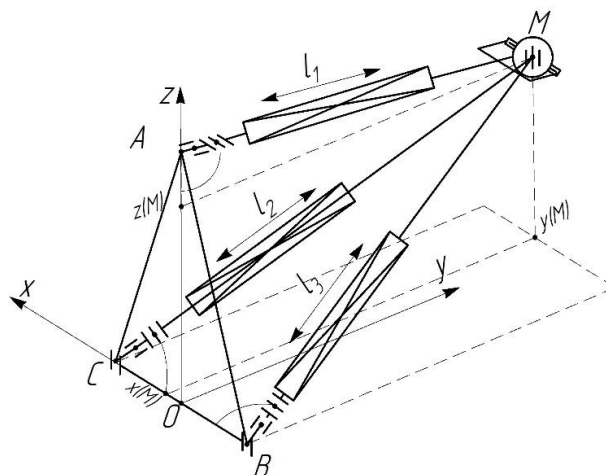


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора параллельной структуры

Принимаем, что для управляемых исполнительных механизмов найдены соотношения (прямая задача кинематики):

$$x(t) = F_1(q_s), y(t) = F_2(q_s), z(t) = F_3(q_s), \quad (1)$$

где $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ – координаты пространственного положения контролируемой точки манипулятора.

Задача формулируется следующим образом: в начальный момент времени при $t = 0$ положение контролируемой точки характеризуется значениями x_0 , y_0 , z_0 . Координаты в назначенной точке x_k , y_k , z_k . При $t = 0$ имеют место отклонения.

$$\Delta x = x_k - x_0, \quad \Delta y = y_k - y_0, \quad \Delta z = z_k - z_0. \quad (2)$$

Требуется построить законы задающих воздействий $q_s(t)$ приводных двигателей, при которых перемещение характерной точки манипулятора в назначенную точку x_k , y_k , z_k осуществляется таким образом, что отклонения координат $\Delta x(t)$, $\Delta y(t)$, $\Delta z(t)$ в процессе перемещения изменяются в соответствии с решением дифференциальных уравнений [8].

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{x}(t) + k_{11} \Delta \dot{x}(t) + k_{21} \Delta x(t) &= 0, \quad \Delta \ddot{y}(t) + k_{11} \Delta \dot{y}(t) + k_{21} \Delta y(t) = 0, \\ \Delta \ddot{z}(t) + k_{11} \Delta \dot{z}(t) + k_{21} \Delta z(t) &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где k_{ij} – коэффициенты, описывающие малые отклонения, и их скорости связаны между разными степенями свободы, i – номер уравнения (выходной степени свободы), j – номер переменной (входной степени свободы).

Закон изменения координат манипулятора является программным. Чтобы построить закон управления с обратными связями, необходимо вычислять выражения по текущим значениям обобщенных координат [9].

Из выражения (1) связываем декартовы координаты с обобщенными и получаем выражения проекций на $x(M)$, $y(M)$, $z(M)$:

$$\begin{cases} x(M) = \frac{CB^2 + l_1^2 - l_3^2}{2CB}, \\ y(M) = l_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{CB^2 + l_1^2 - l_3^2}{2CB} \right)^2}, \\ z(M) = \frac{OB \cdot (l_2^2 - l_1^2)}{AO^2}, \end{cases} \quad (4)$$

где CB , OB , AO – размеры треугольной фермы относительно начала координат $OXYZ$; l_1 , l_2 , l_3 – длины исполнительных приводов, являющиеся обобщенными координатами q_i .

Дифференцируем выражения (4) по следующим формулам:

$$\begin{cases} \dot{x}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_1}{\partial q_s} \dot{q}_s, \\ \dot{y}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_2}{\partial q_s} \dot{q}_s, \\ \dot{z}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_3}{\partial q_s} \dot{q}_s. \end{cases} \quad (5)$$

Получаем выражения проекций скоростей

$$\begin{cases} \dot{x}_M(t) = -\frac{(\dot{l}_3 \cdot l_3) + \dot{l}_1 \cdot l_1}{CB}, \\ \dot{y}_M(t) = \frac{(\dot{l}_3 + l_3 + \dot{l}_1 \cdot l_1) \cdot CB^2 + (\dot{l}_1 \cdot l_1 \cdot l_3^2 - l_3 \cdot l_3^3 + \dot{l}_1 \cdot l_1^3)}{l_1 \cdot CB^2 \cdot \sqrt{-\frac{CB^4 - 2 \cdot l_3^2 \cdot CB^2 + l_3^4 - 2 \cdot l_1^2 \cdot l_3^2 + l_1^4}{l_1^2 \cdot CB^2}} + 2}, \\ \dot{z}_M(t) = \frac{CB^2 + (2 \cdot \dot{l}_1 \cdot l_1 - 2 \cdot \dot{l}_3 \cdot l_3)}{2 \cdot CB}. \end{cases} \quad (6)$$

Дифференцируем выражения (6) по следующим формулам

$$\begin{cases} \ddot{x}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_1}{\partial q_s} \ddot{q}_s + \sum_{s=1}^n \sum_{n=i}^n \frac{\partial^2 F_1}{\partial q_s \partial q_i} \dot{q}_s \dot{q}_i, \\ \ddot{y}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_2}{\partial q_s} \ddot{q}_s + \sum_{s=1}^n \sum_{n=i}^n \frac{\partial^2 F_2}{\partial q_s \partial q_i} \dot{q}_s \dot{q}_i, \\ \ddot{z}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_3}{\partial q_s} \ddot{q}_s + \sum_{s=1}^n \sum_{n=i}^n \frac{\partial^2 F_3}{\partial q_s \partial q_i} \dot{q}_s \dot{q}_i. \end{cases} \quad (7)$$

Получаем выражения проекций ускорений

$$\begin{cases} \ddot{x}_M(t) = \frac{(\dot{l}_3 - \ddot{l}_3) \cdot l_3 + (\dot{l}_1 + \ddot{l}_1) \cdot l_1}{CB}, \\ \ddot{y}_M(t) = \frac{((\dot{l}_3 + \ddot{l}_3) \cdot l_3 + (\dot{l}_1 + \ddot{l}_1) \cdot l_1) \cdot CB^2 + ((\dot{l}_1 + \ddot{l}_1) \cdot l_1 \cdot l_3^2 - (\dot{l}_3 + \ddot{l}_3) \cdot l_3^3 + (\dot{l}_3 + \ddot{l}_3) \cdot l_1^2 \cdot l_3 - (\dot{l}_1 + \ddot{l}_1) \cdot l_1^3)}{l_1 \cdot CB^2 \cdot \sqrt{-\frac{CB^4 - 2 \cdot l_3^2 \cdot CB^2 + l_3^4 - 2 \cdot l_1^2 \cdot l_3^2 + l_1^4}{l_1^2 \cdot CB^2}} + 2}, \\ \ddot{z}_M(t) = \frac{2 \cdot OB \cdot ((\dot{l}_2 + \ddot{l}_2) \cdot l_2 - (\dot{l}_1 + \ddot{l}_1) \cdot l_1)}{OA^2}. \end{cases} \quad (8)$$

Принимаем начальные значения точки M грузозахватного устройства с координатами $x_{M0} = 1305$ мм, $y_{M0} = 3035$ мм, $z_{M0} = 1350$ мм, перемещаем в точку с координатами $x_M = 1653$ мм, $y_M = 4875$ мм, $z_M = 457$ мм, с периодом $\tau = 16$ с, по законам изменения обобщенных координат.

$$\begin{cases} l_1(t) = l_{10} - \Delta l_{10} (3\tau^{-t} - 3\tau^{-2t} + \tau^{-3t}), \\ l_2(t) = l_{20} - \Delta l_{20} (3\tau^{-t} - 3\tau^{-2t} + \tau^{-3t}), \\ l_3(t) = l_{30} - \Delta l_{30} (3\tau^{-t} - 3\tau^{-2t} + \tau^{-3t}). \end{cases} \quad (9)$$

Получаем изменения $\Delta l_{10} = 1873$ мм, $\Delta l_{20} = 454$ мм, $\Delta l_{30} = 1229$ мм, а также зависимости изменения исполнительных звеньев от времени (рис. 4) [10].

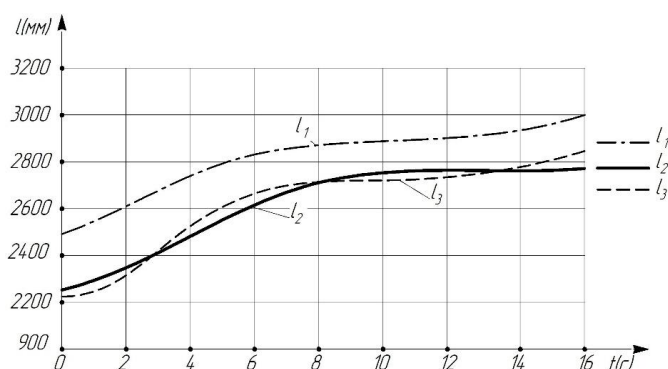


Рис. 4. Графическая зависимость изменения исполнительных звеньев от времени

Зависимость изменения скоростей исполнительных приводов представлена на рис. 5.

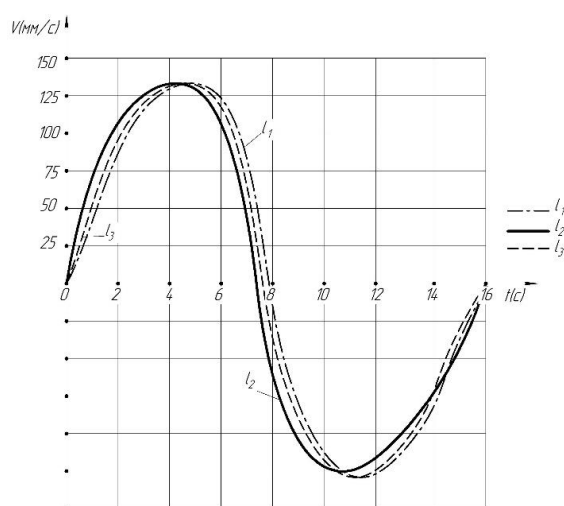


Рис. 5. Графическая зависимость изменения скоростей штоков исполнительных приводов

Выводы

В ходе исследований разработана конструкция погрузочно-транспортного механизма, позволяющего заменить комплекс машин и оборудования. Предложен технологический процесс забивки свай. Проведен кинематический анализ механизма с определением скоростей и ускорений исполнительных звеньев. Проведен кинематический расчёт исполнительного механизма манипулятора относительно заданного положения. Найдена зависимость изменения исполнительных звеньев и изменения скоростей штоков исполнительных приводов манипулятора от времени. Анализ которых показал, что на протяжении обоих графиков, с течением времени точка попадает в конечную область целевой точки с заданной точностью. При принятых значениях параметров системы управления отклонения от заданного положения не превышают 4 %.

Список литературы

- 1 Гусев, О. В. Решение прямой задачи кинематики для шестизвального робота-манипулятора / О. В. Гусев // Вестник кибернетики. – 2024. – № 2. – С. 39–48. – DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-5.
- 2 Белов, М. И. Теория механизмов и машин : учебное пособие / М. И. Белов, С. В. Сорокин. – 2-е изд. – Москва : РИОР : ИНФРА-М, 2020. – 322 с. – ISBN 978-5-9675-0567-1.

References

- 1 Gusev, O. V. The solution of a direct kinematics problem for a six-arm robot manipulator / O. V. Gusev // Bulletin of Cybernetics. – 2024. – No. 2. – P. 39–48. – DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-5.
- 2 Belov, M. I. Theory of mechanisms and machines : a tutorial / M. I. Belov, S. V. Sorokin. – 2nd ed. – Moscow : RIOR : INFRA-M, 2020. – 322 p. – ISBN 978-5-9675-0567-1.

3 Кинематический и динамический анализ плоских рычажных механизмов : учебное пособие / А. А. Туvin [и др.]. – Иваново : ИВГПУ, 2017. – 112 с.

4 **Николаев, М. Е.** Обоснование параметров клещевого захвата погрузочно-транспортного агрегата / М. Е. Николаев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса : Наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 1 (61). – С. 431–441. – DOI 10.32786/2071-9485-2021-01-41.

5 **Жадановский, Б. В.** Организация строительно-монтажных и погрузочно-разгрузочных работ в строительстве автомобильными кранами / Б. В. Жадановский, С. А. Синенко, И. М. Мирошникова // Системные технологии. – 2018. – № 2 (27). – С. 41–48. – ISSN 2227-5398.

6 **Николаев, М. Е.** Погрузочно-транспортный агрегат с увеличенной рабочей зоной / М. Е. Николаев, Е. Ю. Козловцева, А. В. Калачев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 16–21. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_16.

7 **Русских, С. В.** Динамика плоского движения космического крана-манипулятора типа руки с учетом изгиба звеньев / С. В. Русских, Ф. Н. Шклярчук // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 5. – С. 112–122. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-5-112-122.

8 Исследование кинематики привода мехатронного устройства на базе пространственного механизма / Ф. Ф. Хабибуллин, Р. Т. Исламов, Т. А. Мустафаев, В. Н. Крымова // Омский научный вестник. – 2022. – № 3. – С. 48–52. – DOI 10.25206/1813-8225-2022-183-48-52.

9 **Ту, Р.** Разработка программного модуля для моделирования кинематики и динамики манипулятора / Р. Ту // Прикладная математика и Физика. – 2023. – № 1. – С. 70–83. – DOI 10.52575/2687-0959-2023-55-1-70-83.

10 Justification Parameters and Planning Capture Trajectories for Robotic Loading and Transport / M. Nikolaev, I. Nesmianov, V. Zhoga, A. Ivanov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – P. 245. – DOI 10.1007/978-981-16-3349-2_20.

3 Kinematic and dynamic analysis of flat lever mechanisms : a tutorial / A. A. Tuvin [at al]. – Ivanovo : IVGPU, 2017. – 112 p.

4 **Nikolaev, M. E.** Substantiation of the parameters of the pincer grip of the loading and transport unit / M. E. Nikolaev // Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex : Science and higher professional education. – 2021. – No. 1 (61). – P. 431–441. – DOI 10.32786/2071-9485-2021-01-41.

5 **Zhadanovsky, B. V.** Organization of construction and assembly and loading and unloading operations in construction by truck cranes / B. V. Zhadanovsky, S. A. Sinenko, I. M. Miroshnikova // System technologies. – 2018. – No. 2 (27). – P. 41–48. – ISSN 2227-5398.

6 **Nikolaev, M. E.** Loading and transport unit with an enlarged working area / M. E. Nikolaev, E. Y. Kozlovtsseva, A. V. Kalachev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 16–21. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_16.

7 **Russkikh, S. V.** Dynamics of the flat motion of a hand-type space crane manipulator taking into account the bending of the links / S. V. Russkikh, F. N. Shklyarchuk // Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical engineering. – 2023. – No. 5. – P. 112–122. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-5-112-122.

8 Investigation of the kinematics of the drive of a mechatronic device based on a spatial mechanism / F. F. Khabibullin, R. T. Islamov, T. A. Mustafaev, V. N. Krymova // Omsk Scientific Bulletin. – 2022. – No. 3. – P. 48–52. – DOI 10.25206/1813-8225-2022-183-48-52.

9 **Tu, R.** Development of a software module for modeling kinematics and dynamics of a manipulator / R. Tu // Applied Mathematics and Physics. – 2023. – No. 1. – P. 70–83. – DOI 10.52575/2687-0959-2023-55-1-70-83.

10 Justification Parameters and Planning Capture Trajectories for Robotic Loading and Transport / M. Nikolaev, I. Nesmianov, V. Zhoga, A. Ivanov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – P. 245. – DOI 10.1007/978-981-16-3349-2_20.

M. E. Nikolaev, V. A. Perfilov, A. V. Romanova, G. S. Eremin

ANALYSIS OF THE KINEMATIC CHARACTERISTICS OF THE AUTOMATED UNIT'S MANIPULATOR

Abstract. When constructing structures with a foundation consisting of piles, pile drivers are used. This process consists of several steps: 1– preparing the site; 2 – transporting the piles to their placement location; 3 – installing the pile in the hammer; 4 – driving the piles at designated points. These tasks require the use of a range of mechanized equipment, including

loaders and transport vehicles. A disadvantage of this process is the limited automation of the equipment. It is proposed to automate the technological process by using an automated loading and transport unit with manipulators. The design of the unit is proposed. The technological process of pile driving with loading and transport operations is described. The kinematic calculation of the manipulator's executive mechanism is performed relative to the specified position. The dependence of rotation angles of the manipulator's links and the changes in the speeds of the executive drive rods is found.

Keywords: automated unit, piles, manipulator, load-handling device, kinematics, chassis.

For citation: Analysis of the kinematic characteristics of the automated unit's manipulator / M. E. Nikolaev, V. A. Perfilov, A. V. Romanova, G. S. Eremin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 226–232. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_2_226.

Сведения об авторах

Николаев Максим Евгеньевич

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного технического
университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

Перфилов Владимир Александрович

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного
технического университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: vladimirperfilov@mail.ru

Романова Анастасия Владимировна

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного
технического университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
магистрант,
e-mail: anastasiaromanova6802@mail.ru

Еремин Георгий Сергеевич

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного
технического университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
магистрант,
e-mail: zorik042001@mail.ru

Information about the authors

Nikolaev Maxim Evgenievich

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IA&C VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

Perfilov Vladimir Aleksandrovich

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IA&C VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: vladimirperfilov@mail.ru

Romanova Anastasia Vladimirovna

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IA&C VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Master's Student,
e-mail: anastasiaromanova6802@mail.ru

Eremin Georgy Sergeevich

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IA&C VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Master's Student,
e-mail: zorik042001@mail.ru

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.93

DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_233

*А. Е. Колоденкова, М. О. Бочкарев*РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОРЕЖИВАНИЯ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ
НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СХОДСТВА ЧЕРНО-БЕЛЫХ КАДРОВ

Аннотация. В настоящее время прореживание видеопоследовательностей играет важную роль в различных приложениях предварительной обработки видеоизображений, связанных с классификацией видеоизображений, обнаружением различных изменений и распознаванием объектов (дефектов, неисправностей, действий людей и т. п.). В работе предложен метод прореживания видеопоследовательностей, основанный на оценивании сходства двух последовательных черно-белых кадров с применением знаковой корреляционной функции вида «знак-знак» и коэффициентов ассоциативности, проверке соответствия рассчитанных значений метрик предельным интервалам и принятии решений относительно удаления кадров. Рассмотрена обобщенная схема предложенного метода с подробным описанием этапов, описан алгоритм поиска сходства и различий между двумя последовательными черно-белыми кадрами видеопоследовательностей. Метод позволяет уменьшить размер видеопоследовательностей за счет удаления избыточных или повторяющихся кадров, тем самым сокращая объем хранимой информации и повышая эффективность обнаружения ключевых моментов на видеоизображениях, полученных в условиях неконтролируемой среды. Представлены результаты исследований, которые показали, что предложенный метод позволяет сократить избыточность кадров в два раза без потери важной информации и качества видеопоследовательностей.

Ключевые слова: прореживание кадров, сходство кадров, видеопоследовательность, знаковая корреляционная функция вида «знак-знак», коэффициенты ассоциативности.

Для цитирования: Колоденкова, А. Е. Разработка метода прореживания видеопоследовательностей на основе оценки сходства черно-белых кадров / А. Е. Колоденкова, М. О. Бочкарев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 233–242. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_233.

Введение

В настоящее время предварительная обработка видеоизображений является критически важным этапом при подготовке данных для применения моделей, основанных на искусственных нейронных сетях при распознавании образов [1–3]. Одним из сложнейших этапов предварительной обработки видеоизображений является прореживание видеопоследовательностей, полученных в условиях неконтролируемой среды. Его сложность обусловлена нарастанием объемов видеоизображений вследствие постоянного увеличения числа видеокамер, устанавливаемых на объектах, засорением необходимых данных избыточными кадрами видеопоследовательностей, а также большим перекрытием соседними кадрами видеоизображений друг друга. Все это приводит к увеличению объема памяти и нагрузки на обработку видеопоследовательностей, а также к проблеме извлечения важной информации из различных фрагментов видеопоследовательностей.

Для решения данной проблемы необходимо применять современные эффективные методы и алгоритмы, которые позволят удалять избыточные кадры из видеопоследовательностей, оставляя лишь те кадры, которые наилучшим образом отражают ключевые моменты на видеозаписи.

Например, в работе [4] рассматривается подход для прореживания видеопоследовательностей, основанный на равномерной выборке с корректировкой шага и адаптивной выборке кадров с использованием визуальных (оптический поток, индекс структурного сходства) или семантических (представления признаков) различий. Для обучения и тестирования использовался набор данных *BDD100K*.

В работе [5] предлагается новый метод извлечения ключевых кадров, заключающийся в определении информативной области каждого кадра и выборе ключевых кадров на основе сходства между этими областями. Эксперименты проводились с использованием наборов данных *KTH* и *UCF-101* с

видеоклассификаторами на базе *ConvLSTM* (*Convolutional Long Short-Term Memory*). Результаты экспериментов показали эффективность предложенного метода, который позволяет надежно выбирать информативные кадры, тем самым повышая эффективность архитектур глубоких нейронных сетей для классификации видеоизображений.

В работе [6] предлагается метод извлечения ключевых кадров путем анализа масштаба и направления траектории движения на пространственно-временном срезе. В качестве показателя для извлечения ключевых кадров используются локальные и глобальные изменения состояния движения объекта. Кадры с отклонениями масштаба и направления траектории движения извлекаются в качестве ключевых кадров. Результаты экспериментов показали, что предложенный метод превосходит существующие современные методы с точки зрения точности для различных видеозаписей, требуя при этом меньше времени для вычислений.

Авторы работы [7] для измерения сходства изображений использовали алгоритм *ORB* (*Oriented Fast Rotated Brief*), индекс структурного сходства (*Structural Similarity Index, SSIM*), сходство пикселей, а также расстояние Левенштейна. Исследования показали, что алгоритм *ORB* работает быстрее по сравнению с другими метриками.

В работе [8] рассматривается подход к определению сходства набора данных с помощью векторных представлений на примере набора данных с изображениями лиц людей. Для получения векторных представлений использовалась сеть *ResNet18* без слоя классификации. Предлагается эффективная метрика сходства наборов данных, которая позволяет определять меру их сходства и выбирать набор данных, наиболее близкий к образцу.

Несмотря на большое количество публикаций по данной теме, прореживание видеопоследовательностей до сих пор является актуальной задачей, поскольку существующие методы имеют недостатки. Во-первых, большинство методов работают только со статичным видеоизображением; во-вторых, при выборе ключевых кадров не учитывается информация о движении объекта, что может привести к потере важной информации; в-третьих, методы, основанные на применении искусственных нейронных сетей, требуют значительных вычислительных ресурсов.

В связи с этим предлагается метод прореживания видеопоследовательностей, основанный на оценивании сходства двух последовательных черно-белых кадров с применением знаковой корреляционной функции вида «знак-знак» и коэффициентов ассоциативности, позволяющий свести избыточность кадров к минимуму за счет исключения дублирующих и повторяющихся кадров.

1 Обобщенная схема метода прореживания видеопоследовательностей

Обобщенная схема реализации метода прореживания видеопоследовательностей, состоящего из семи этапов, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная схема метода прореживания видеопоследовательностей

Этап 1. Формирование кадров. На данном этапе каждое исходное видеоизображение преобразуются в упорядоченную видеопоследовательность кадров V с использованием библиотеки *OpenCV* и декодера *FFmpeg*

$$V = \{f_1, f_2, \dots, f_k\},$$

где k – число кадров; f_i – текущий кадр; $i = k$, $H \times W \times C$ – размерность кадра; H – высота изображения в пикселях; W – ширина изображения в пикселях; C – количество каналов.

Этап 2. Представление кадров в матричной форме. Пусть текущий кадр $f_i(x, y)$ содержит H строк и W столбцов, тогда значения координат (позиции) (x, y) становятся дискретными величинами, для которых для большей наглядности и удобства записи используются целые значения (рис. 2).

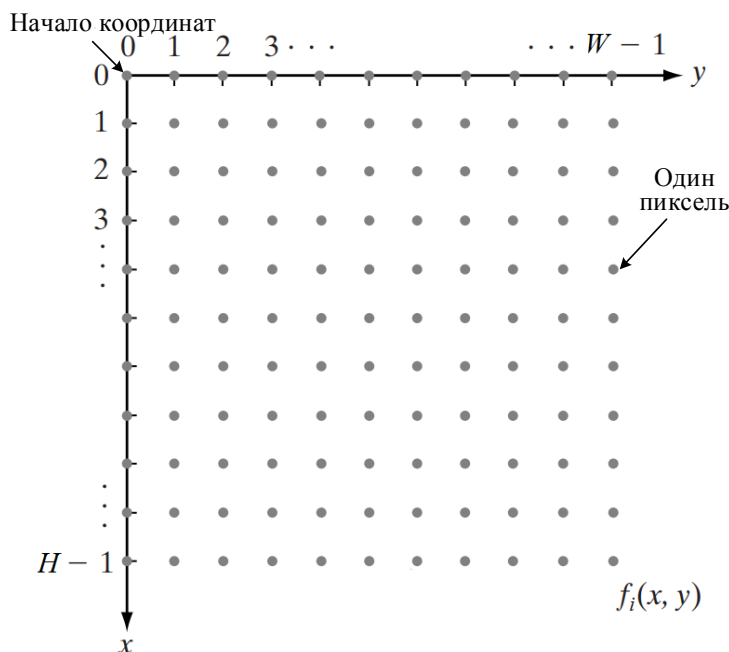


Рис. 2. Представление кадра

Таким образом, значения координат в начале системы координат равны $(x, y) = (0, 0)$. Следующие значения координат в первой строке кадра представлены в виде $(x, y) = (0, 1)$.

Следовательно, текущий кадр $f_i(x, y)$ размером $H \times W$, $C = 1$ можно представить в компактной матричной форме [9]:

$$f_i(x, y) = \begin{bmatrix} a(0, 0) & a(0, 1) & \dots & a(0, W-1) \\ a(1, 0) & a(1, 1) & \dots & a(1, W-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a(H-1, 0) & a(H-1, 1) & \dots & a(H-1, W-1) \end{bmatrix},$$

где a – значение интенсивности пикселя от 0 до 255 с координатами (x, y) .

Отметим, что сравнение двух кадров может выполняться по пикселям и по окнам. Размер окна был выбран от 8 до 34 пикселей с шагом 2.

Этап 3. Бинаризация кадров. На данном этапе осуществляется переход к черно-белым кадрам путем применения пороговой бинаризации с двойным условием:

$$f_i^*(x, y) = \begin{cases} 0, & a(x, y) \leq T, \\ 1, & a(x, y) > T, \end{cases}$$

где $f_i^*(x, y)$ – функция классификации пикселей (результат бинаризации); T – пороговое значение, которое подбирается экспериментально.

С учетом пороговой бинаризации текущий кадр $f_i(x, y)$ можно представить в следующей матричной форме:

$$f_i^*(x, y) = \begin{bmatrix} a^*(0, 0) & a^*(0, 1) & \dots & a^*(0, W-1) \\ a^*(1, 0) & a^*(1, 1) & \dots & a^*(1, W-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a^*(H-1, 0) & a^*(H-1, 1) & \dots & a^*(H-1, W-1) \end{bmatrix}.$$

Этап 4. Вычисление метрик. На данном этапе осуществляется сходство между двумя последовательными черно-белыми кадрами f_i f_{i+1} с применением коэффициентов ассоциативности [10]:

$$S_1 = \frac{p_{11}}{p_{10} + p_{11} + p_{01}}, S_2 = \frac{p_{11} + p_{00}}{p}, S_3 = \frac{p_{11}}{p},$$

и знаковой корреляционной функцией вида «знак-знак» [11]:

$$S_4 = \frac{2p_{11}}{2p_{11} + p_{10} + p_{01}}, S_5 = \frac{2(p_{11} + p_{01})}{p + p_{11} + p_{00}}, S_6 = \frac{p_{11}}{p_{11} + 2(p_{10} + p_{01})}, S_7 = \frac{p_{11} + p_{00}}{p_{11} + 2(p_{10} + p_{01})},$$

где $p = p_{00} + p_{01} + p_{10} + p_{11}$, p_{00} – частота, с которой приращения пикселей на первом и втором кадрах одновременно принимают черный цвет; p_{01} – частота, с которой приращение пикселя на первом бинарном кадре принимает черный цвет, а на втором бинарном кадре принимает белый цвет; p_{10} – частота, с которой приращение пикселя на первом бинарном кадре принимает белый цвет, а на втором бинарном кадре принимает черный цвет; p_{11} – частота, с которой приращения пикселей на первом и втором кадрах одновременно принимают белый цвет.

Значения метрик находятся в диапазоне $[0; 1]$, где 1 – указывает на сходство между кадрами видеопоследовательности, 0 – различие между кадрами.

Этап 5. Проверка соответствия значений метрик предельному интервалу. Оценивание сходства двух последовательных черно-белых кадров сводилось к проверке соответствия вычисленных метрик предельному интервалу, который задается на основе проведенных исследований.

По результатам проведенных исследований было установлено следующее:

1) *коэффициенты ассоциативности:*

– коэффициент S_1 чувствителен к явным отличиям. Рекомендуется использовать в качестве основного коэффициента для оценки общего сходства двух черно-белых кадров;

– коэффициент S_2 устойчив к явным отличиям, чувствителен к незначительным отличиям. Рекомендуется использовать в качестве основного коэффициента для оценки изменения фона;

– коэффициент S_3 чувствителен к изменениям освещения, а также к незначительным изменениям на кадре. При этом коэффициент устойчив к явным отличиям на кадрах. Не рекомендуется использовать в качестве основного коэффициента для обнаружения движения объекта;

2) *знаковая корреляционная функция вида «знак-знак»:*

– коэффициент S_4 устойчив к незначительным изменениям, чувствителен к явным отличиям.

При этом слабо реагирует на незначительные отличия и почти неотличимые кадры;

– коэффициент S_6 устойчив к явным отличиям, чувствителен к незначительным изменениям.

Показывает стабильные результаты при явных отличиях между кадрами;

– коэффициенты S_5 и S_7 показывают нестабильные результаты, поэтому их не рекомендуется использовать.

На основе проведенных авторами исследований предлагаются следующие шкалы для оценки сходства двух черно-белых кадров по пикселям с применением метрик S_1, S_2, S_3, S_4, S_6 (табл. 1).

Таблица 1

Оценки сходства черно-белых кадров по пикселям

Метрики	Численные значения	Вербальное описание
1	2	3
S_1	$[0, 0,7)$	Явные отличия
	$[0,7, 0,9)$	Незначительные отличия
	$[0,9, 1]$	Почти неотличимы
S_2	$[0, 0,9)$	Явные отличия
	$[0,9, 0,98)$	Незначительные отличия
	$[0,98, 1]$	Почти неотличимы

Окончание табл. 1

1	2	3
S_3	[0, 0,3)	Явные отличия
	[0,3, 0,6)	Незначительные отличия
	[0,6, 1]	Почти неотличимы
S_4	[0, 0,8)	Явные отличия
	[0,8, 0,95)	Незначительные отличия
	[0,95, 1]	Почти неотличимы
S_6	[0, 0,6)	Явные отличия
	[0,6, 0,83)	Незначительные отличия
	[0,83, 1]	Почти неотличимы

Шкалы для оценки сходства двух черно-белых кадров по окнам размера $N \times N$ пикселей с применением метрик S_1, S_2, S_3, S_4, S_6 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценки сходства черно-белых кадров по окнам

Метрики	Численные значения	Вербальное описание
1	2	3
S_1	[0, 0,3)	Явные отличия
	[0,3, 0,8)	Незначительные отличия
	[0,8, 1]	Почти неотличимы
S_2	[0, 0,7)	Явные отличия
	[0,7, 0,9)	Незначительные отличия
	[0,9, 1]	Почти неотличимы
S_3	[0, 0,2)	Явные отличия
	[0,2, 0,7)	Незначительные отличия
	[0,7, 1]	Почти неотличимы
S_4	[0, 0,2)	Явные отличия
	[0,2, 0,65)	Незначительные отличия
	[0,65, 1]	Почти неотличимы
S_6	[0, 0,15)	Явные отличия
	[0,15, 0,72)	Незначительные отличия
	[0,72, 1]	Почти неотличимы

Этап 6. Формирование таблицы вычисленных метрик. На данном этапе для наглядности и удобства принятия решений относительно удаления избыточных кадров формируется таблица вычисленных метрик, где на пересечении столбца и строки находится вербальное описание, которое соответствует сравниваемым кадрам f_i и f_{i+1} .

Этап 7. Принятие решения относительно удаления кадров. На данном этапе рассматриваются условия принятия решения относительно удаления кадров:

1) если два последовательных кадра f_i и f_{i+1} почти неотличимы друг от друга, то один из двух кадров удаляется из видеопоследовательностей как избыточный;

2) если два последовательных кадра f_i и f_{i+1} имеют явные или незначительные отличия друг от друга, то кадры не удаляются из видеопоследовательностей.

Далее на рис. 3 представлен алгоритм, реализующий процедуру поиска сходства и различий между двумя последовательными черно-белыми кадрами по пикселям.

Новизна предложенного метода прореживания видеопоследовательностей заключается как в оценивании сходства двух последовательных черно-белых кадров на основе знаковой корреляционной функции вида «знак-знак» и коэффициентов ассоциативности, так и в проверке соответствия рассчитанных значений метрик предельным интервалам. Это позволяет принимать научно обоснованные решения относительно удаления избыточных кадров без риска потери важной информации и качества видеопоследовательностей, тем самым уменьшая объем памяти и сложность вычислений.



238

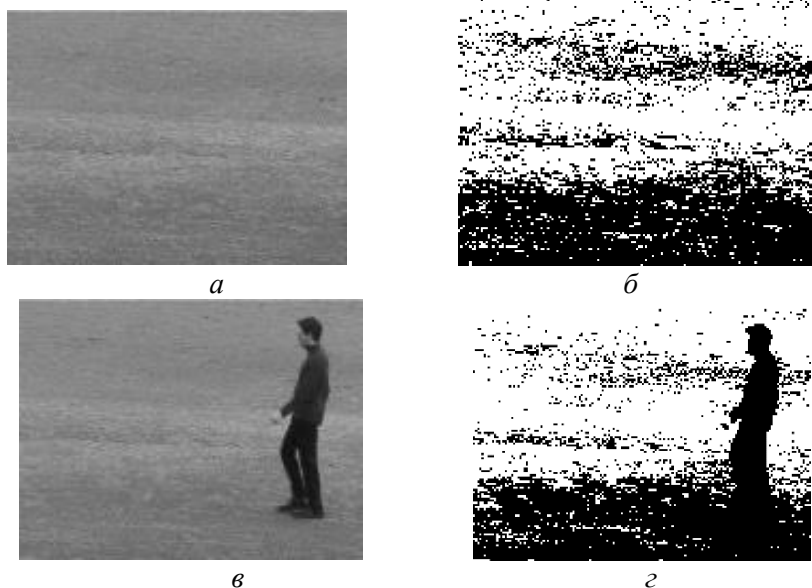


Рис. 4. Кадры для эксперимента 1:

а – исходный кадр № 1; *б* – бинарное представление кадра № 1;
в – исходный кадр № 2; *г* – бинарное представление кадра № 2

На рис. 5 представлены кадры для эксперимента 2.



Рис. 5. Кадры для эксперимента 2:

а – исходный кадр № 1; *б* – бинарное представление кадра № 1;
в – исходный кадр № 2; *г* – бинарное представление кадра № 2

Фрагмент результатов сравнения двух черно-белых кадров для эксперимента 2 показан ниже:

- сравнение по окнам размером 8×8 : $S_1 = 0,36$, $S_2 = 0,96$, $S_3 = 0,27$, $S_4 = 0,39$, $S_6 = 0,32$;
- сравнение по окнам размером 14×14 : $S_1 = 0,42$, $S_2 = 0,96$, $S_3 = 0,27$, $S_4 = 0,47$, $S_6 = 0,37$;
- сравнение по окнам размером 22×22 : $S_1 = 0,49$, $S_2 = 0,96$, $S_3 = 0,26$, $S_4 = 0,55$, $S_6 = 0,42$;
- сравнение по окнам размером 28×28 : $S_1 = 0,54$, $S_2 = 0,96$, $S_3 = 0,25$, $S_4 = 0,6$, $S_6 = 0,46$;
- сравнение по окнам размером 34×34 : $S_1 = 0,58$, $S_2 = 0,96$, $S_3 = 0,25$, $S_4 = 0,65$, $S_6 = 0,49$;
- сравнение по пикселям: $S_1 = 0,87$, $S_2 = 0,96$, $S_3 = 0,27$, $S_4 = 0,93$, $S_6 = 0,77$.

Из результатов видно, что кадры, представленные на рис. 5, имеют незначительные отличия, следовательно, сравниваемые кадры не удаляются из видеопоследовательности.

На рис. 6 представлены кадры для эксперимента 3.

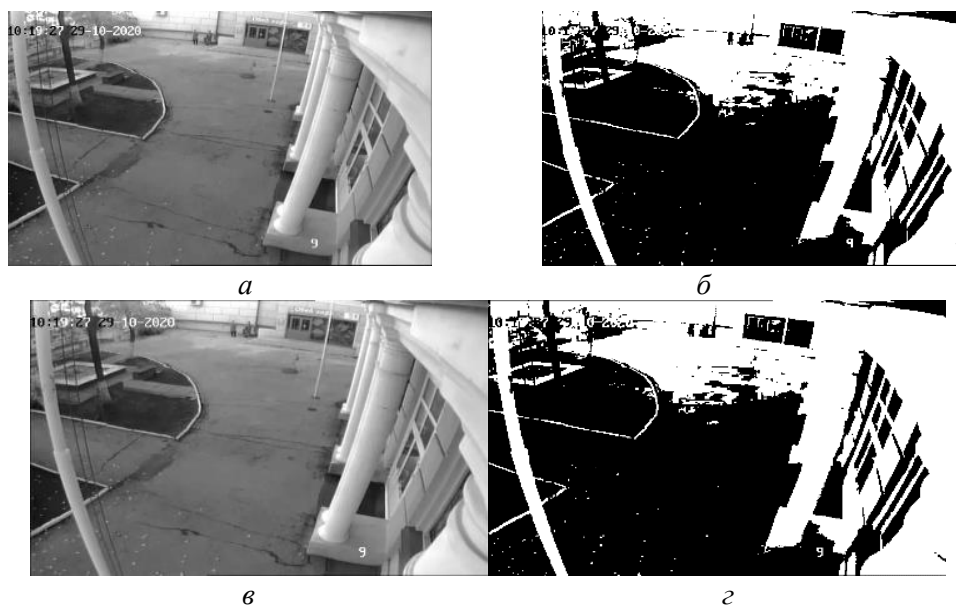


Рис. 6. Кадры для эксперимента 3:

а – исходный кадр № 1; *б* – бинарное представление кадра № 1;
в – исходный кадр № 2; *г* – бинарное представление кадра № 2

Фрагмент результатов сравнения двух черно-белых кадров для эксперимента 3 показан ниже:

- сравнение по окнам размером 8×8 : $S_1 = 0,46$, $S_2 = 0,96$, $S_3 = 0,41$, $S_4 = 0,49$, $S_6 = 0,43$;
- сравнение по окнам размером 14×14 : $S_1 = 0,49$, $S_2 = 0,95$, $S_3 = 0,4$, $S_4 = 0,53$, $S_6 = 0,45$;
- сравнение по окнам размером 22×22 : $S_1 = 0,54$, $S_2 = 0,95$, $S_3 = 0,4$, $S_4 = 0,59$, $S_6 = 0,48$;
- сравнение по окнам размером 28×28 : $S_1 = 0,55$, $S_2 = 0,95$, $S_3 = 0,38$, $S_4 = 0,6$, $S_6 = 0,49$;
- сравнение по окнам размером 34×34 : $S_1 = 0,56$, $S_2 = 0,94$, $S_3 = 0,38$, $S_4 = 0,62$, $S_6 = 0,49$;
- сравнение по пикселям: $S_1 = 0,91$, $S_2 = 0,96$, $S_3 = 0,41$, $S_4 = 0,95$, $S_6 = 0,84$.

Из результатов видно, что кадры, представленные на рис. 6, почти неотличимы, следовательно, один из кадров может быть удален из видеопоследовательности как избыточный.

Таким образом, с помощью предлагаемого метода из 180 000 кадров было удалено 95 580 кадров (53,1 %) без потери важной информации, что позволило значительно сократить объем хранимой информации.

Заключение

В настоящей работе для оптимизации видеопоследовательностей предлагается метод прореживания, основанный на оценке сходства двух последовательных черно-белых кадров с применением знаковой корреляционной функции вида «знак-знак» и коэффициентов ассоциативности. Данный метод позволяет сократить количество избыточных кадров в два раза без потери важной информации, тем самым обеспечивая содержательное представление видеопоследовательностей за счет оставшихся значимых кадров, которые получают более компактными.

Список литературы

1 Quality-guided key frames selection from video stream based on object detection / Chen Mingju, Xiaofeng Han, Hua Zhang [et al.] // Journal of Visual Communication

References

1 Quality-guided key frames selection from video stream based on object detection / Chen Mingju, Xiaofeng Han, Hua Zhang [et al.] // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2019.

and Image Representation. – 2019. – Vol. 65 (24). – Article no. 102678. – DOI 10.1016/j.jvcir.2019.102678.

2 Best frame selection to enhance training step efficiency in video-based human action recognition / A. A. Gharabagh, V. Hajhashemi, M. C. Ferreira [et al.] // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12 (4). – Article No. 1830. – DOI 10.3390/app12041830.

3 Too many frames, not all useful: efficient strategies for long-form video QA / J. Park, K. Ranasinghe, K. Kahatapitiya [et al.] // Proceedings of the 19th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics. – 2024. – P. 3569–3588. – DOI 10.48550/arXiv.2406.09396.

4 **Yoon, J.** Exploring video frame redundancies for efficient data sampling and annotation in instance segmentation / J. Yoon, M.-K. Choi // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). – 2023. – P. 3308–3317. – DOI 10.1109/CVPRW59228.2023.00333.

5 **Kızıltepe, R. S.** A novel keyframe extraction method for video classification using deep neural networks / R. S. Kızıltepe, J. Q. Gan, J. J. Escobar // Neural Computing and Applications. – 2023. – Vol. 35. – P. 24513–24524. – DOI 10.1007/s00521-021-06322-x.

6 Similarity score of two images using different measures / V. Appana, T. M. Guttikonda, D. Shree [et al.] // 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). – 2021. – P. 741–746. – DOI 10.1109/ICICT50816.2021.9358789.

7 Video key frame extraction based on scale and direction analysis / Y. Dong, Y. Zhang, J. Zhang, X. Zhang // The Journal of Engineering. – 2022. – P. 910–918. – DOI 10.1049/tje2.12173.

8 **Усатов, А. А.** Оценка сходства между наборами данных с помощью векторных представлений / А. А. Усатов, А. М. Недзведь, Го Цзижань // Доклады БГУИР. – 2025. – Т. 23, № 3. – С. 70–76. – DOI 10.35596/1729-7648-2025-23-3-70-76.

9 **Narasimharao, J.** Digital image processing / J. Narasimharao. – AGPH Books (Academic Guru Publishing House), 2023. – 201 p. – ISBN 978-93-95468-31-2.

10 **Пугачев, В. С.** Основы статистической теории автоматических систем / В. С. Пугачев, И. Е. Казаков, Л. Г. Евланов. – Москва : Машиностроение, 1974. – 400 с.

11 Оптимизация структур распределенных баз данных в АСУ / А. Г. Мамиконов, В. В. Кульба, С. А. Косыаченков, И. А. Ужастов. – Москва : Наука, 1990. – 240 с. – ISBN 5-02-014389-8.

– Vol. 65 (24). – Article no. 102678. – DOI 10.1016/j.jvcir.2019.102678.

2 Best frame selection to enhance training step efficiency in video-based human action recognition / A. A. Gharabagh, V. Hajhashemi, M. C. Ferreira [et al.] // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12 (4). – Article No. 1830. – DOI 10.3390/app12041830.

3 Too many frames, not all useful : efficient strategies for long-form video QA / J. Park, K. Ranasinghe, K. Kahatapitiya [et al.] // Proceedings of the 19th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics. – 2024. – P. 3569–3588. – DOI 10.48550/arXiv.2406.09396.

4 **Yoon, J.** Exploring video frame redundancies for efficient data sampling and annotation in instance segmentation / J. Yoon, M.-K. Choi // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). – 2023. – P. 3308–3317. – DOI 10.1109/CVPRW59228.2023.00333.

5 **Kızıltepe, R. S.** A novel keyframe extraction method for video classification using deep neural networks / R. S. Kızıltepe, J. Q. Gan, J. J. Escobar // Neural Computing and Applications. – 2023. – Vol. 35. – P. 24513–24524. – DOI 10.1007/s00521-021-06322-x.

6 Similarity score of two images using different measures / V. Appana, T. M. Guttikonda, D. Shree [et al.] // 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). – 2021. – P. 741–746. – DOI 10.1109/ICICT50816.2021.9358789.

7 Video key frame extraction based on scale and direction analysis / Y. Dong, Y. Zhang, J. Zhang, X. Zhang // The Journal of Engineering. – 2022. – P. 910–918. – DOI 10.1049/tje2.12173.

8 **Usatov, A. A.** Assessing similarity between data sets using vector representations / A. A. Usatov, A. M. Nedzved, Guo Jizhan // BSUIR Proceedings. – 2025. – Vol. 23, No. 3. – P. 70–76. – DOI 10.35596/1729-7648-2025-23-3-70-76.

9 **Narasimharao, J.** Digital image processing / J. Narasimharao. – AGPH Books (Academic Guru Publishing House), 2023. – 201 p. – ISBN 978-93-95468-31-2.

10 **Pugachev, V. S.** Fundamentals of the statistical theory of automatic systems / V. S. Pugachev, I. E. Kazakov, L. G. Evlanov. – Moscow : Mashinostroenie, 1974. – 400 p.

11 Optimization of distributed database structures in automated control systems / A. G. Mamikonov, V. V. Kulba, S. A. Kosyachenkov, I. A. Uzhastov. – Moscow : Nauka, 1990. – 240 p. – ISBN 5-02-014389-8.

A. E. Kolodenkova, M. O. Bochkarev

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR REDUNDANT FRAME REMOVAL
IN VIDEO SEQUENCES BASED ON ASSESSMENT
OF THE BLACK-AND-WHITE FRAMES SIMILARITY**

Abstract. Video sequences redundant frame removal currently plays an important role in various video preprocessing applications related to video classification, change detection, and object recognition (e.g., defects, faults, human actions, etc.). This paper proposes a video sequence subsampling method based on estimating the similarity of two consecutive black-and-white frames using a "sign-sign" correlation function and associativity coefficients, verifying the compliance of the calculated metric values with threshold intervals, and making decisions regarding frame removal. A generalized scheme of the proposed method is considered with a detailed description of the stages, and an algorithm for finding similarities and differences between two consecutive black-and-white frames of video sequences is described. This method reduces the size of video sequences by removing redundant or repeated frames, thereby reducing the amount of stored information and increasing the efficiency of detecting key moments in video images obtained in uncontrolled environments. Research results are presented, demonstrating that the proposed method can halve frame redundancy without losing important information or improving the quality of video sequences.

Keywords: frame subsampling, frame similarity, video sequence, sign-sign correlation function, associativity coefficients.

For citation: Kolodenkova, A. E. Development of a method for redundant frame removal in video sequences based on assessment of the black-and-white frames similarity / A. E. Kolodenkova, M. O. Bochkarev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026 – No. 2. – P. 233–242. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_233.

Сведения об авторах

Колоденкова Анна Евгеньевна

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева (Самарский университет),
кафедра «Информационные системы и технологии»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: anna82_42@mail.ru

Бочкарев Михаил Олегович

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева (Самарский университет),
кафедра «Информационные системы и технологии»,
ассистент,
mixail19997@gmail.com

Information about the authors

Kolodenkova Anna Evgenievna

Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara University),
Chair "Information Systems and Technologies",
Doctor of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: anna82_42@mail.ru

Bochkarev Mikhail Olegovich

Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara University),
Chair "Information Systems and Technologies",
Assistant,
e-mail: mixail19997@gmail.com

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 $\lim$, $\ln$, $\arg$, $\cos$, $\sin$, $\min$, $\max$ 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 подписи 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.ppressa-ru.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

**№ 2 (102)
2026**

Уважаемые читатели!

Вы можете подписаться на наш журнал на сайте www.pressa-rf.ru.

Индекс журнала по каталогу 53720

Полнотекстовая версия статей находится в открытом доступе на сайтах:

Российской научной электронной библиотеки: <https://www.elibrary.ru/>

Научной электронной библиотеки «КиберЛенинка» <https://cyberleninka.ru/>

Национальной платформы периодических научных изданий (РЦНИ) <https://journals.rcsi.science>

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 29.06.2026.

Дата выхода в свет 30.06.2026.

Печать офсетная.

Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.

Усл. печ. л. 28,5.

Тираж 510 экз.

Цена свободная.

Бумага офсетная.

Изд. № 38.

Заказ .

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.